



# PROVINCIA DI PISA

DIPARTIMENTO DEL TERRITORIO  
SEVIZIO DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE  
U.O.O. IDRAULICA  
UFFICIO DIFESA DELLA COSTA

## PROGRAMMA DI INTERVENTI PRIORITARI DI RECUPERO E RIEQUILIBRIO DEL LITORALE D.C.R. n.47 del 11.03.2003

### LAVORI URGENTI PER LA STABILIZZAZIONE DELLA LINEA DI RIVA IN LOC. GOMBO

TITOLO DEL DOCUMENTO

**RELAZIONE GENERALE**

TAV. N°

**A**

CODICE PROGETTO

DATA

SCALA

## INDICE

- 1. PREMESSE**
- 2. EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE**
- 3. CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA DEL PARAGGIO**
  - 3.1 Dati disponibili*
  - 3.2 Analisi dei dati*
  - 3.3 Validazione dei dati*
- 4. ATTIVITÀ D'INDAGINE PRELIMINARE**
- 5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI**
  - 5.1 Descrizione dello stato attuale*
  - 5.2 Descrizione dello stato di progetto*
- 6. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI**
  - 6.1 Materiale sabbioso per ripascimento e ripristino dunale*
  - 6.2 Materiali lapidei*
  - 6.3 Materiali sintetici*
- 7. ORGANIZZAZIONE DEL CANTIERE E MODALITÀ ESECUTIVE DELLE OPERE**
- 8. ASPETTI AMBIENTALI**
- 9. MANUTENZIONE E MONITORAGGIO DEGLI INTERVENTI**
  - 9.1 Piani di manutenzione*
  - 9.2 Monitoraggio*

## 1. PREMESSE

Il litorale pisano si estende dalla foce del canale Scolmatore d'Arno a Sud al fosso della Bufalina a Nord per una lunghezza di 26 km, interamente compresi nel tratto che va dal porto di Livorno a quello di Viareggio. Tale litorale costituisce la parte meridionale di una unità fisiografica, lunga 65 km, delimitata a Nord da Punta Bianca (ultima propaggine di Monte Marcello) e a Sud dal Porto di Livorno.

Il litorale pisano è stato oggetto negli ultimi anni di numerosi studi e ricerche, comprendenti anche l'esecuzione di rilevamenti sperimentali, per cui risulta nota, almeno a livello generale, la sua dinamica evolutiva. Fra i tanti ricordiamo quelli presi a riferimento per le valutazioni tecnico-progettuali:

- "L'evoluzione del litorale pisano" A. Noli, L. Franco - 1989
- "Interventi di contenimento dell'erosione del litorale" V. Milano, A. Noli – 1996
- "Progetto generale per il riequilibrio del litorale pisano" P.L. Aminti – 1998
- "Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano" Università di Firenze – Dipartimento Scienze della Terra – 1998
- "Protezione del litorale compreso tra la foce dell'Arno ed il Gombo" P.L. Aminti - 1998
- "Morfodinamica e dinamica dei sedimenti del litorale della toscana settentrionale" L.E. Cipriani, S. Ferri, P. Iannotta, F. Paolieri, E. Pranzini – 2000
- "Studio del litorale costiero nell'area di Bocca d'Arno" DEAM - 2003

Questi studi hanno consentito di acquisire conoscenze di elementi molto importanti, quali la granulometria, la natura e la provenienza dei sedimenti, il regime dei venti e dei mari, le caratteristiche delle onde al largo, la rifrazione del moto ondoso sotto costa, la direzione prevalente del trasporto solido parallelo al litorale e le variazioni temporali dei relativi apporti, costituendo il supporto scientifico alla realizzazione degli interventi di difesa già attuati.

Negli ultimi 100 anni, tutto il tratto a Nord del delta del Fiume Arno è stato interessato pressoché uniformemente da un costante fenomeno erosivo. Tale fenomeno, dapprima localizzato nel tratto di costa prossimo alla foce dell'Arno, si sta estendendo e, attualmente, si è spinto fino ad interessare la foce del Fiume Serchio.

In conseguenza di ciò, l'Amministrazione della Tenuta di San Rossore ha predisposto, nel 1997<sup>1</sup>, un progetto per la difesa della fascia litoranea nota come “*Lame della gelosia*”, che andava ad inserirsi in un più ampio piano di riassetto del litorale pisano elaborato dal Comune di Pisa.

Detto intervento di “Protezione del litorale compreso fra la foce dell'Arno ed il Gombo” ha trovato attuazione negli anni 2000-2001 sotto la gestione diretta della Tenuta di San Rossore ed è consistito nella realizzazione di quattro pennelli con tratto soffolto particolarmente esteso, così da intercettare il flusso sedimentario diretto dalla vicina foce verso nord, e cinque pennelli di ridotta estensione con funzione di “rompitratte”, ossia di riduzione delle falcature residue e contenimento del previsto ripascimento in ghiaia che, realizzato parzialmente, non ha avuto buon esito.



Foto 1 - Tratto fra il Gombo e Bocca d'Arno (ripresa aerea del luglio 2004)



Foto 2 - Tratto fra il Fiume Morto Nuovo e il Gombo, con evidenziata l'area d'intervento (ripresa aerea del luglio 2004)

L'intervento attuato ha raggiunto il risultato di stabilizzare la linea di riva e quindi frenare il processo erosivo locale, primo elemento per garantire la protezione dell'entroterra, caratterizzato dalla presenza di uno dei più rilevanti ecosistemi delle zone umide dell'Alto Tirreno. Le *Lame della gelosia* sono, infatti, stagni costieri nei quali vanno a raccogliersi le acque di pioggia e le acque dolci della falda superficiale; qui sono presenti biotipi osofilo di grandissimo interesse faunistico. Le ripetute mareggiate che hanno interessato il litorale antistante le *Lame*, non trovando alcun ostacolo alla loro penetrazione, hanno provocato l'ingresso di acqua salata all'interno dello stagno,

<sup>1</sup> Si veda, in proposito, la delibera N. 1247 della Giunta Regionale del 3 novembre 1997.

trasformandolo in ambiente alofilo. Oltre a ciò è molto elevato il rischio di distruzione del bosco retrostante anch'esso di elevato valore ambientale.

Solo un significativo ripascimento artificiale della spiaggia può garantire la necessaria protezione di tali aree con possibilità di nuova formazione del sistema dunale ormai distrutto.

Mentre il primo intervento attuato tra il Gombo e il Fiume Arno ha frenato il fenomeno di arretramento della linea di riva, rimane ancora assai critica la situazione del tratto di costa immediatamente a nord, principalmente tra il Gombo ed il Fiume Morto, dove una profonda falcatura è in fase di rapida evoluzione minacciando da nord la "Villa presidenziale del Gombo" e le relative strutture ricettive.

Il fenomeno si è ulteriormente aggravato a seguito di alcune intense mareggiate verificatesi tra la scorsa fine di settembre e l'inizio di ottobre, fatto che ha portato l'Ente Parco Regionale di Migliarino-San Rossore a richiedere un intervento urgente di protezione, anticipando quindi l'attuazione di quanto previsto nel "Programma regionale di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale della Provincia di Pisa" (D.C.R. n. 47 dell'11 marzo 2003) di cui la Provincia di Pisa è ente attuatore per la fascia costiera di propria competenza.

E' stato quindi predisposto il presente progetto stralcio di difesa del tratto costiero antistante il Gombo, che consiste, in sintesi, nella realizzazione di due pennelli trasversali alla linea di riva, nella ricostruzione di un breve tratto di duna fortemente eroso dagli ultimi eventi e nell'eventuale ripascimento con materiale sabbioso proveniente da un contemporaneo intervento di riqualificazione ambientale delle limitrofe Lame.

Tali opere costituiscono un ridotto stralcio funzionale dei "lavori di completamento della stabilizzazione della linea di riva tra il fiume Arno e la foce del fiume Serchio", la cui progettazione è già stata sviluppata a livello preliminare ed ha ottenuto l'approvazione della Commissione Tecnica di cui all'art. 4 del protocollo d'intesa tra Regione Toscana e Province costiere nella riunione del 3 maggio 2005.

La necessità di rapida attuazione di un primo stralcio dei lavori di difesa nasce dalla recente evoluzione del fenomeno erosivo in atto, che negli ultimi mesi ha causato un di notevole arretramento della linea di riva localizzato principalmente nel tratto immediatamente a Nord della loc. Gombo, fatto che costituisce il motivo di alcune segnalazioni dell'Ente Parco di Migliarino-San Rossore riguardo il pericolo di danneggiamento o perdita delle strutture e pertinenze limitrofe alla villa presidenziale del "Gombo". Le opere in oggetto si configurano quindi come "urgenti ed indifferibili".

L'intervento, pur garantendo la difesa costiera localizzata del tratto costiero più in crisi, avrà anche valore sperimentale per alcune nuove tecnologie di difesa di recente applicazione in campo marittimo, così come dettagliato nei successivi capitoli.

In relazione alla relativa ridotta entità delle opere (rispetto alle previsioni di difesa complessive) ed al loro carattere urgente, non si procederà a V.I.A., riferendosi a quanto già autorizzato e prescritto nella procedura relativa all'attuazione dell'intervento a sud, che già prevedeva parte delle opere in argomento, non successivamente attuate.

## 2. EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE

Il paraggio interessato dalle opere in argomento si sviluppa da Bocca d'Arno alla foce del Fiume Serchio, per una lunghezza di circa 11 chilometri, comprende l'apparato deltizio del Fiume Arno ed è fortemente influenzato dalla sua evoluzione.

Il delta di foce è stato inizialmente caratterizzato da un notevole sviluppo a seguito del forte apporto sedimentario dovuto all'elevato tasso di erosione del suolo conseguente al disboscamento di estese parti del bacino idrografico. Una prima cuspidè deltizia appare in epoca romana e testimonia l'intenso disboscamento a cui era soggetto il territorio probabilmente già in epoca etrusca.

Nell'alto medioevo, il crollo demografico e l'abbandono delle opere idrauliche romane determinò una riduzione dell'apporto sedimentario e l'erosione della prima cuspidè.

La crescita demografica ed economica, approssimativamente collocata intorno all'anno mille, venne registrata dal delta dell'Arno con una rapida espansione e con la formazione di cordoni di spiaggia sempre più convergenti verso il mare. Questo processo si fece sempre più rapido con il passare dei secoli, quale conseguenza di un più intenso taglio dei boschi.

L'evoluzione del delta fu in realtà più complessa di quanto non appaia in questa breve sintesi e fasi di stallo ed inversioni di tendenza si registrarono anche in periodi di rapido accrescimento e sono tutti correlabili con variazioni demografiche verificatesi in questa parte della toscana.

Il delta attuale dell'Arno si è formato a partire dal 1606 quando la foce fu spostata artificialmente verso nord di 1550 m con il "*taglio ferdinando*". L'avanzamento delle spiagge alla foce fu un processo molto rapido alimentato dalle sabbie provenienti dal vecchio delta e da un forte incremento di trasporto solido del fiume dovuto all'aumento della pendenza del tratto terminale che si era venuta a determinare a causa della deviazione.

Da rilievi attendibili della linea di battigia risulta che il delta, dopo un continuo accrescimento fino al 1785, ebbe tra tale anno e il 1850 un ulteriore avanzamento di 320 m sul lobo sinistro e 250 m sul destro, evoluzione particolarmente concentrata negli ultimi quattro anni del periodo.

Dopo il 1850 iniziò la scomparsa del lobo sinistro e, nel 1878, anche quella del destro: il processo erosivo del delta risultò ancor più rapido di quello evolutivo (come si può riscontrare dalla cartografia storica).<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> V. Milano, A. Noli (1996) - op. cit.

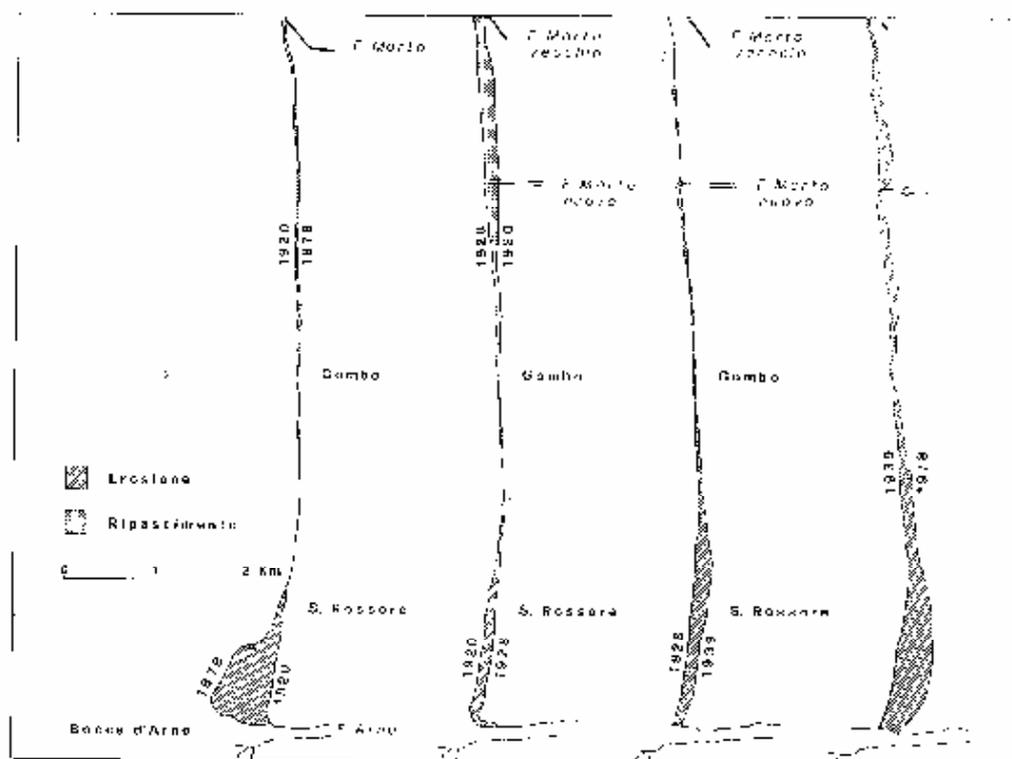


Fig. 1 - Evoluzione della Linea di riva tra il 1938 e il 1978 da Bocca d'Arno al Fiume Morto Vecchio (E. Pranzini "L'evoluzione del delta dell'Arno", 1983)

Dal 1878 al 1983 la parte più protesa del lobo destro dell'Arno subì un arretramento di 1200 m, mentre per il lobo sinistro tale fenomeno risultò contenuto in circa 300 m, visto che già dal 1898 furono realizzate le prime scogliere per la difesa del litorale di Marina di Pisa.

Oggi il litorale di sinistra del fiume è più aggettante in mare di 700 m circa rispetto a quello di destra. Una discontinuità di battigia, così localizzata ed estesa, che trova pochi riscontri lungo le coste italiane.



Foto 3 - L'evidente arretramento della riva destra del Fiume Arno rispetto a quella di sinistra (ripresa aerea del luglio 2004)

I fenomeni erosivi a nord dell'Arno sono fondamentalmente dovuti ad un deficit di sedimenti, essendo l'apporto solido del corso d'acqua notevolmente diminuito nel tempo, fino a risultare insufficiente a compensare il trasporto solido longitudinale e le perdite di materiale dovute all'asportazione verso il largo da parte del moto ondoso.

In particolare, nel quadro generale dell'evoluzione del delta, si inserisce, dal 1926, l'effetto della costruzione del pennello in sponda destra della foce dell'Arno per due motivi principali, il primo diretto, il secondo indiretto:

- il primo tratto costiero posto a Nord del pennello non riceve più un'alimentazione diretta da parte dell'Arno;
- le modifiche al campo di moto ondoso (in particolare la riflessione delle onde da parte del pennello) e alla circolazione locale hanno determinato un moto di sedimenti verso Nord e verso largo.

La combinazione di tali effetti innescò una modifica della configurazione del litorale che, dal 1928 al 1938, assunse una conformazione decisamente concava.

Nel 1939 vennero costruiti i pennelli di foce del Fiume Morto Nuovo che interruppero, almeno in parte, il trasporto litoraneo diretto verso Nord, innescando processi erosivi sulla spiaggia settentrionale e determinano la stabilizzazione (o avanzamento, se si considerano le linee di riva del 1976 e 1983) per un tratto di circa un chilometro a Sud.



*Foto 4 - Pennelli alla foce del Fiume Morto Nuovo (ripresa aerea del luglio 2004)*

Nel periodo dal 1954 al 1967 tutto il tratto di litorale a Nord dell'Arno risultava in erosione, con tassi di arretramento compresi tra gli 8 e i 10 metri all'anno.

Per arginare il fenomeno in corrispondenza della Villa presidenziale del Gombo, fra il 1962 e il 1968, vennero costruite cinque scogliere parallele. Tuttavia il loro effetto fu localmente assai limitato, con unico beneficio per il litorale a Nord dove si registrò una riduzione del trend erosivo.

Dopo il 1978 il settore protetto dalle scogliere del Gombo subì un'accentuata erosione e proprio qui si raggiunse uno dei tassi di arretramento più elevati, tanto che, nel 1984, le quattro scogliere meridionali vennero allungate e conseguentemente ridotta la dimensione dei varchi.

Tale intervento provocò la rapida evoluzione della spiaggia con formazione di quattro tomboli di collegamento tra le scogliere e la riva: tale collegamento a terra delle scogliere, avvenuto in modo assai brusco molti anni dopo la loro costruzione, generò un "effetto pennello" favorendo la sedimentazione del tratto di costa sottoflutto ed aggravando il deficit sedimentario delle spiagge sovraflutto.

Si ebbe, quindi, una espansione del tratto in avanzamento presente immediatamente a Sud delle scogliere con una riduzione del tasso di erosione sul litorale meridionale, per uno sviluppo complessivo di circa un chilometro. Viceversa, più a Sud l'erosione raggiunse contemporaneamente un tasso di 11 metri all'anno, doppio rispetto a quello medio del periodo precedente.

A Nord del Gombo, tra i due punti fissi rappresentati dalle scogliere foranee e dalla foce armata del Fiume Moro, si è evoluta una configurazione della linea di riva fortemente a spirale con centro spostato nella meridionale di tale tratto costiero, dove oggi si trova una profonda insenatura, analoga a quella che si forma sottoflutto ad opere che intercettano in modo consistente il drift litoraneo.

Negli ultimi mesi il fenomeno erosivo sulla porzione di litorale immediatamente a Nord del Gombo è parso accentuarsi, soprattutto a fronte di alcuni eventi meteo-marini particolarmente intensi (settembre–ottobre 2005). Il confronto tra due rilievi della linea di riva, ripetuti a distanza di pochi mesi a cavallo di tali eventi, ha infatti mostrato un arretramento medio di circa 10m, condizione che ha provocato l'accentuarsi della crisi del sistema dunale residuo prospiciente la "Villa presidenziale" nonché il crollo delle recinzioni perimetrali di recente adeguamento.



Foto 5 – Particolari del tratto dunale recentemente eroso (dicembre 2005)

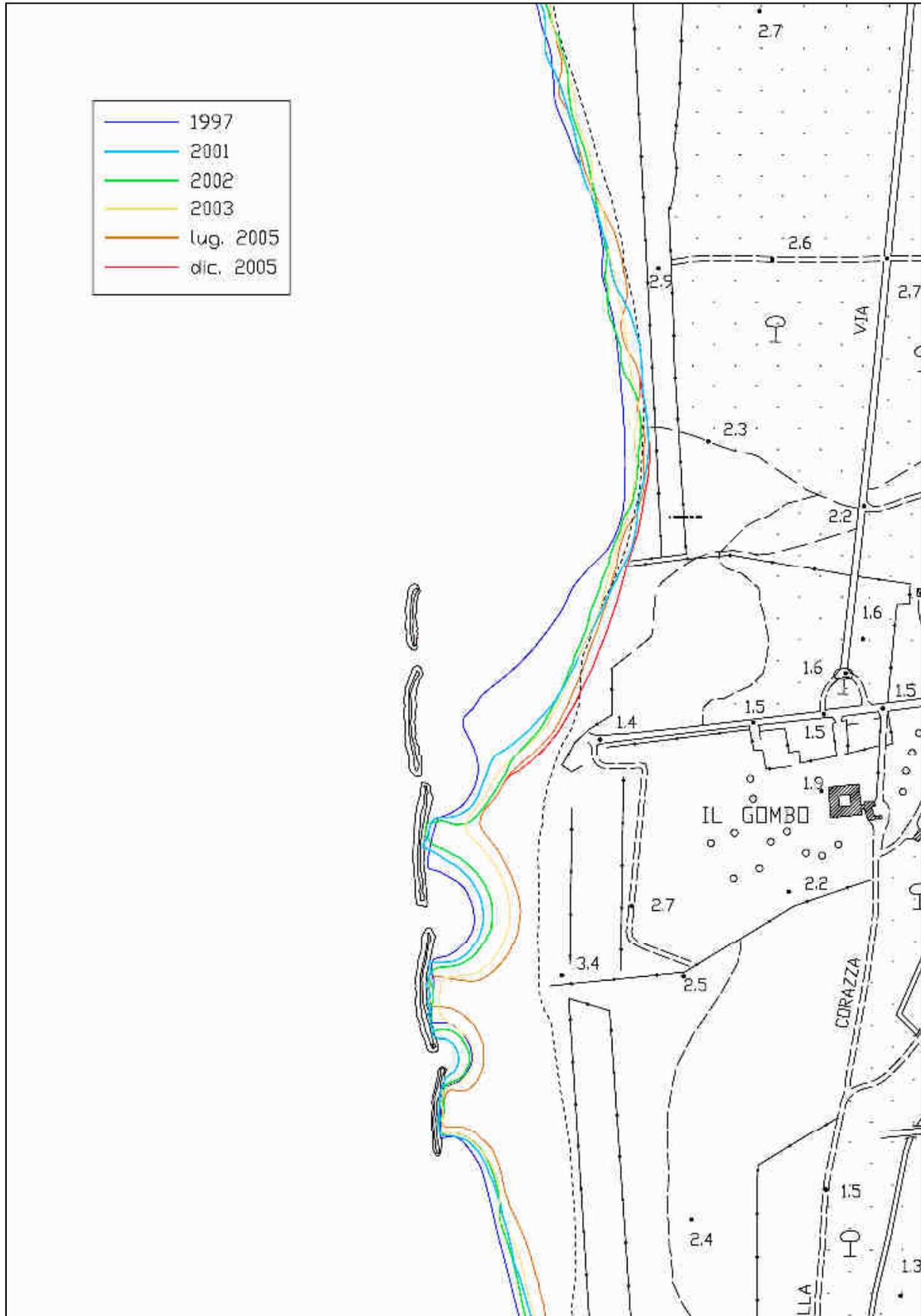


Fig. 2 - Evoluzione della Linea di riva dal 1997 al 2005 in loc. Il Gombo

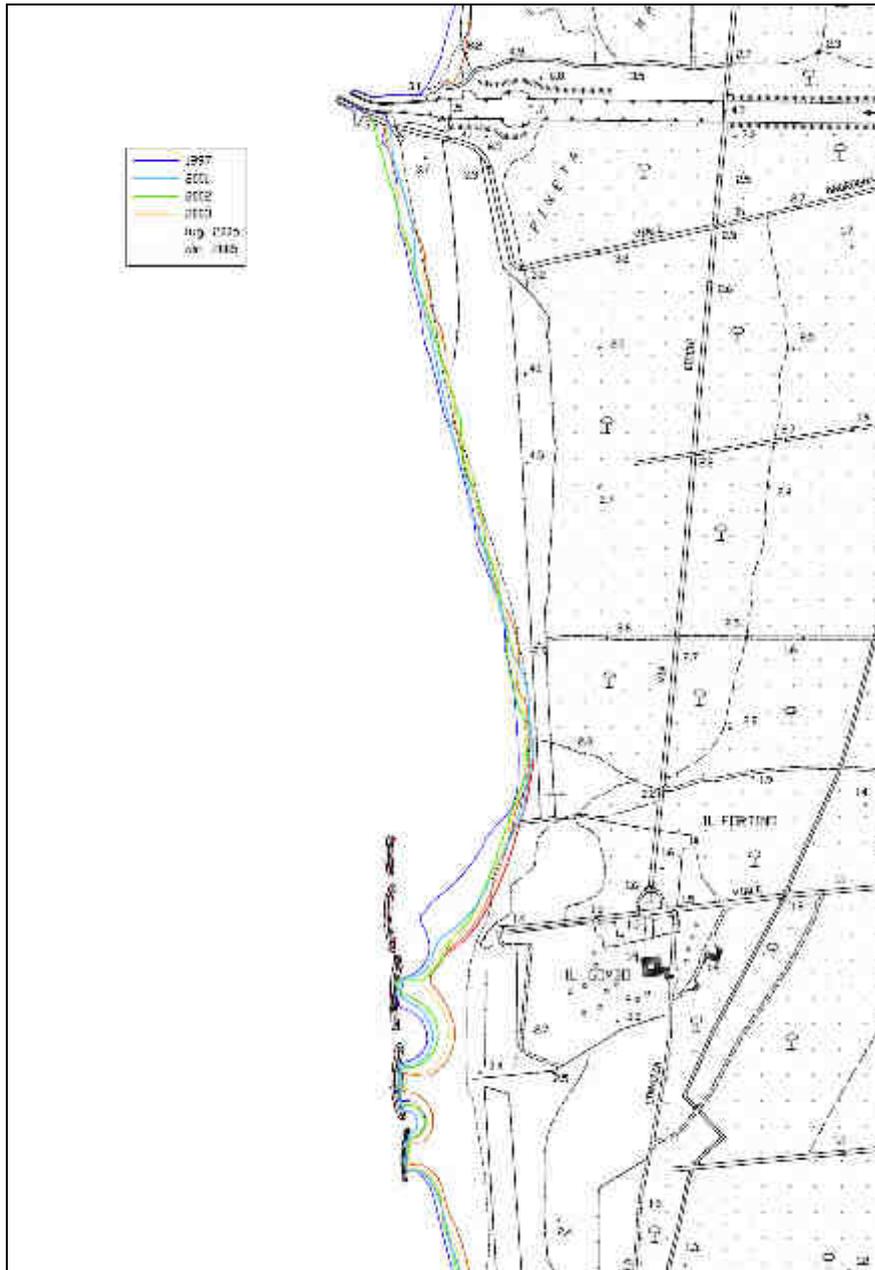


Fig. 3 - Evoluzione della Linea di riva dal 1997 al 2005 tra il Fiume Morto Nuovo ed Il Gombo

Dall'analisi della sua evoluzione negli anni più recenti emerge, pertanto, l'estrema dinamicità di questo litorale, intesa come capacità di invertire od amplificare tendenze evolutive apparentemente consolidate, condizione che rende indispensabile una accurata valutazione degli effetti indotti da qualsiasi intervento che modifichi l'assetto del paraggio in esame.

### 3. CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA DEL PARAGGIO

Per la definizione del clima marino nella zona in studio sono state utilizzate le elaborazioni condotte mediante modello matematico dalla Soc. D.E.A.M. che collabora con l'Amministrazione Provinciale per lo sviluppo di un modello morfodinamico tridimensionale finalizzato alla valutazione degli effetti conseguenti l'attuazione degli interventi di difesa.

Si riporta di seguito una sintesi relativa all'elaborazione dei dati di vento, moto ondoso e marea:

#### 3.1 Dati disponibili

Sono stati reperiti sia dati misurati che dati ricostruiti con modelli numerici, risultanti cioè dalla simulazione di processi fisici mediante modellazione matematica.

##### 3.1.1 Dati misurati

E' purtroppo ben noto che esiste una totale mancanza di misure di moto ondoso lungo la costa toscana: le uniche misure disponibili sono quelle rilevate dall'ondametro direzionale di La Spezia, che fa parte della rete RON (Rete Ondametrica Nazionale). Tale ondametro è ubicato in acque profonde alle coordinate 43° 55.7' N, 9° 49.6' E e rileva dati, con frequenza 3-oraria, dal 1989.

Per quanto concerne il vento, l'ARSIA della Regione Toscana ha installato negli ultimi anni una serie di stazioni meteorologiche: sono stati reperiti i dati orari della stazione di Gorgona relativi al periodo 1/4/2000-20/6/2005, in quanto sono considerati rappresentativi delle condizioni anemologiche al largo della costa in esame. La stazione è ubicata a 255 m rispetto al l.m.m. e l'anemometro è posto alla quota di 10 m.

Anche il Servizio Idrografico Regionale, che ha fornito i dati di livello del mare a Bocca d'Arno e Bocca di Serchio, ha installato alcuni anemometri sulle proprie stazioni: sono stati quindi messi a disposizione i dati di vento rilevati a Bocca d'Arno e a Forte dei Marmi.

##### 3.1.2 Dati ricostruiti da modelli numerici

Sono stati resi disponibili dalla Regione Toscana i dati di vento e moto ondoso estratti dagli archivi ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) di Reading, Inghilterra.

I dati di vento sono quelli simulati dal ben noto modello meteorologico ECMWF.

I dati di moto ondoso sono simulati mediante il modello spettrale WAM, a cui vengono forniti in input i campi di vento simulati dall'ECMWF, e sono stati validati attraverso il confronto con i dati altimetrici rilevati dal satellite Topex.

I dati si riferiscono al periodo 1 Luglio 1992 - 31 Dicembre 2004 ed hanno un passo temporale di 6 ore: sono cioè disponibili 4 dati/giorno alle ore sinottiche 0, 6,12,18 GMT e si riferiscono ai seguenti 9 punti griglia (Fig. 4):

- 44.0°N, 9.5°E      • 43.5°N, 9.5°E      • 43.5°N, 10.0°E      • 43.0°N, 10.0°E
- 42.5°N, 10.0°E    • 42.5°N, 10.5°E    • 42.0°N, 10.5°E    • 42.0°N, 11.0°E    • 42.0°N, 11.5°E

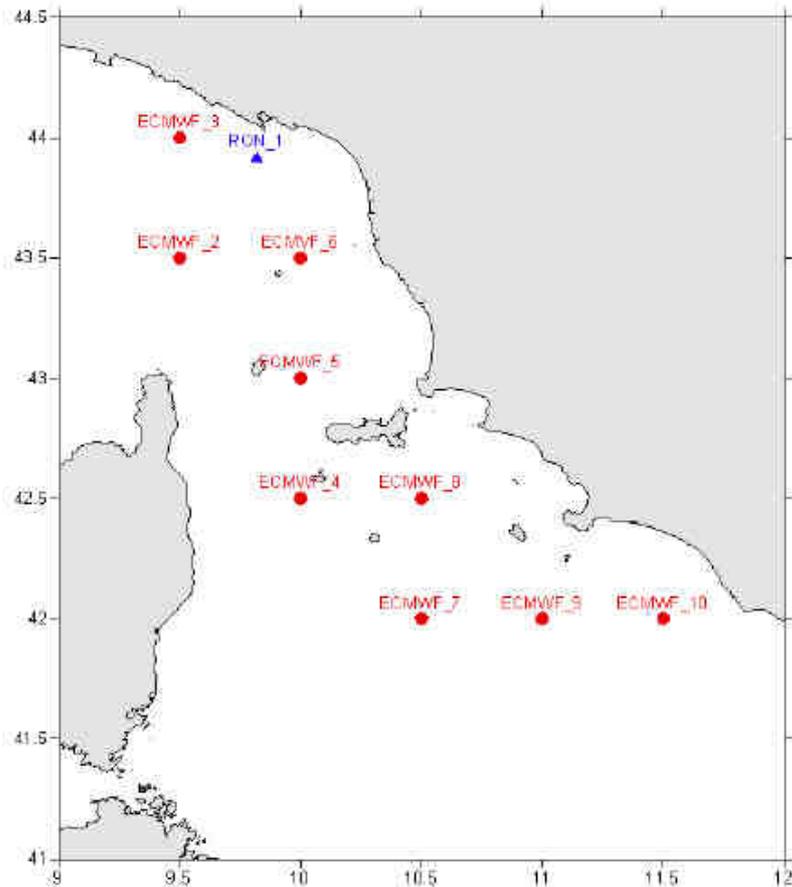


Fig. 4 - Ubicazione dei punti-griglia e dell'ondametro di La Spezia

I dati si riferiscono ai seguenti parametri:

- Hm0 : Altezza d'onda significativa (m.)
- Tm: Periodo medio (s.) calcolato dai momenti spettrali m-1 e m0
- Tp : Periodo di picco dello spettro (s)
- DM: Direzione media di provenienza dell'onda (°N)
- Hm0s : Altezza dello Swell (m.)
- Hm0w : Altezza del Wind Sea (m.)
- Tmsw : Periodo medio per lo Swell (s.)
- Tmws : Periodo medio per il Wind Sea (s.)
- Dsw : Direzione media di provenienza dell'onda per lo Swell (°N)
- Dws : Direzione media di provenienza per il Wind Sea (°N)
- W: Velocità media su 10' del vento alla quota di 10 m l.m.m. (m/s)
- DW: Direzione media su 10' di provenienza del vento alla quota di 10 m l.m.m. (°N)

### 3.1.3 Dati di livello del mare

Il Servizio Idrologico Regionale ha messo a disposizione i dati di livello del mare rilevati, mediante mareografi di tipo acustico, a Bocca d'Arno dal 1992 al 2004 e quelli rilevati a Bocca di Serchio dal 2000 al 2004.

Ha messo inoltre a disposizione anche i dati di Forte dei Marmi, rilevati dal 2001 al 2005, che, pur riferiti ad un'area non strettamente interessata dallo studio, risultano di particolare utilità in quanto permettono di analizzare le variazioni spaziali lungo costa.

## 3.2 Analisi dei dati

### 3.2.1 Dati di vento

Nella Fig. 5a sono mostrati, a titolo di esempio, gli andamenti temporali, per i mesi di ottobre-novembre 2000 (il vento della prima settimana di novembre ha generato una violenta mareggiata che ha creato enormi problemi nel levante ligure e lungo le coste settentrionali della Toscana) di velocità e direzione del vento. Sui grafici vengono riportati gli andamenti temporali dedotti dalle misure di Gorgona e del punto-griglia 6, che risulta il più vicino all'isola di Gorgona.

Dall'esame complessivo dei dati si è rilevato che l'accordo in velocità risulta soddisfacente, soprattutto al crescere dell'intensità del vento, come pure è risultato soddisfacente l'accordo in direzione.

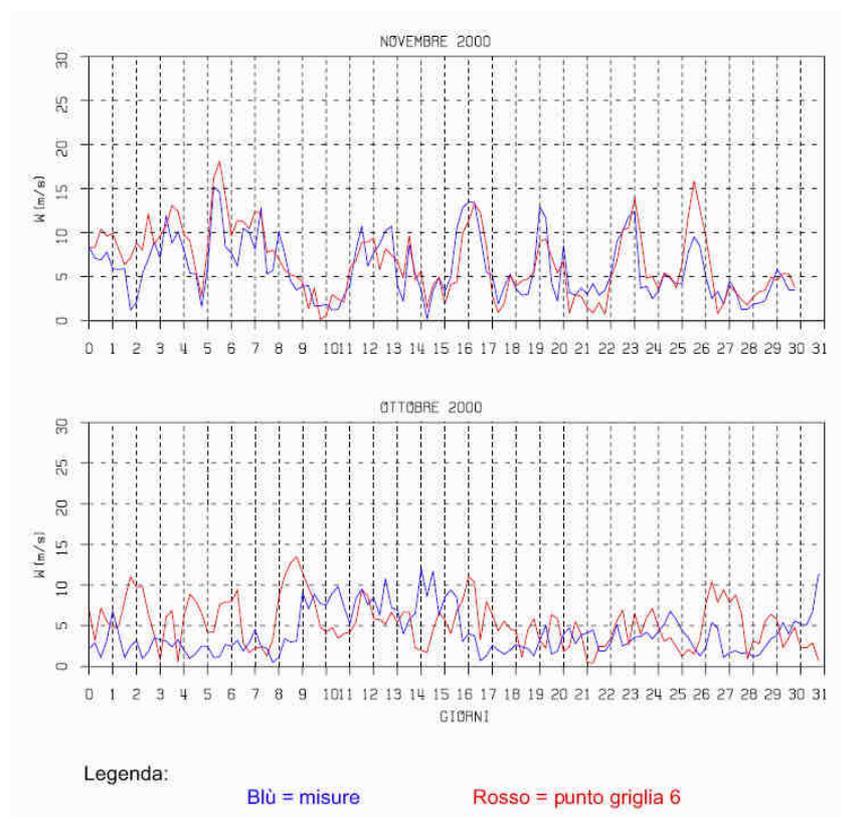


Fig. 5a - Esempio di andamento temporale delle velocità del vento misurate e ricostruite

### 3.2.2. Dati di moto ondoso

Analogamente a quanto effettuato per il vento, nella Fig.5b vengono mostrati, a titolo di esempio, gli andamenti temporali, per i mesi di ottobre-novembre di altezza delle onde. Sui grafici vengono riportati gli andamenti temporali dedotti dalle misure dell'ondametro di la Spezia, quelli del punto-griglia 3, che risulta il più vicino al punto di ancoraggio dell'ondametro (meno di 30 Km) e quelli del punto-griglia 6, i cui valori sono utilizzati per lo studio del litorale pisano.

Dall'esame complessivo dei dati si è rilevato, per quanto concerne Hs (altezza d'onda significativa), un ottimo accordo nella fase, mentre appare evidente una certa sovrastima dei dati simulati, così come sono risultati sovrastimati i periodi. L'accordo tra le direzioni è invece da considerarsi soddisfacente.

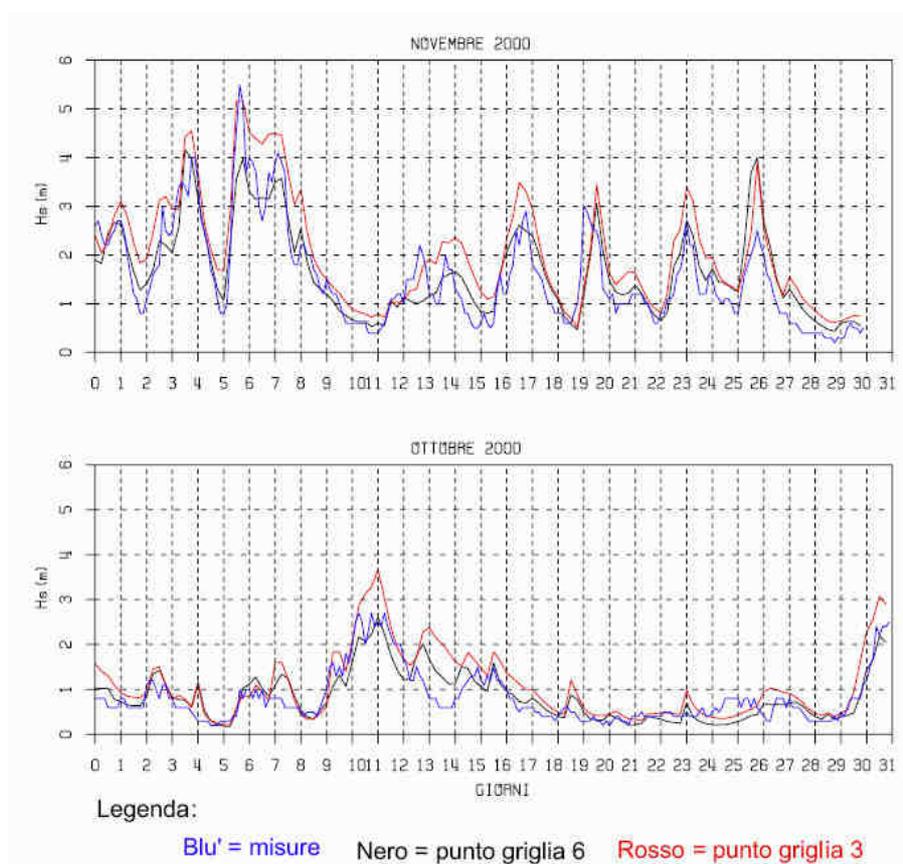


Fig. 5b - Esempio di andamento temporale delle altezze d'onda misurate e ricostruite

### 3.2.3 Dati di livello del mare

I dati di livello sono stati prima corretti con l'offset dello strumento, 40 cm per Bocca d'Arno e 37 cm per Bocca di Serchio, e poi attentamente analizzati per eliminare gli *spikes*, presenti in buon numero, ed i dati che risultavano particolarmente dubbi. Nella Fig. 5c vengono mostrati, a titolo di esempio, le serie temporali relative ad un mese dei valori di livello depurati dall'oscillazione di marea (serie aperiodica residua), la stessa serie filtrata per metterne in luce l'andamento alle alte frequenze, la stessa serie filtrata alle basse frequenze per il mareografo di Bocca d'Arno.

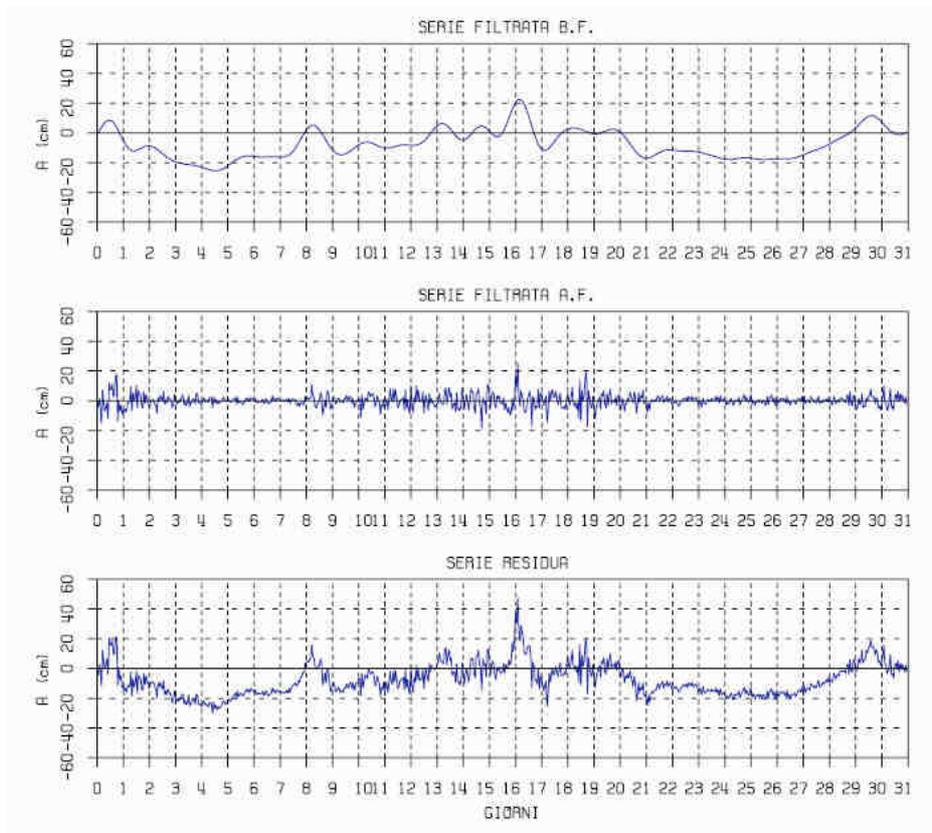


Fig. 5c - Esempio di andamento temporale del livello del mare serie residua e serie filtrata ad alta e bassa frequenza

## 3.3 Validazione dei dati

I dati di vento e moto ondoso sono stati validati, al fine di verificare la loro adeguatezza a descrivere la fenomenologia tipica dell'area in esame, attraverso il confronto con le misure disponibili.

### 3.3.1 Dati di vento

Per quanto riguarda il vento, per la validazione si è fatto riferimento alla stazione di Gorgona: dalla serie temporale di velocità e direzione del vento sono stati estratti i valori simultanei a quelli ricostruiti dal modello e sono stati confrontati con quelli relativi al Punto 6, ubicato alle coordinate 43.50° N, 10.00° E, quindi il punto più vicino all'isola di Gorgona.

Le distribuzioni omnidirezionali misurate e ricostruite sono mostrate nella Fig. 6a: i punti rappresentano le percentuali delle varie classi, le rette rappresentano il *best-fit* dei dati.

Dall'analisi della figura appare evidente che il punto-griglia 6 è caratterizzato da valori più elevati di velocità; le differenze tendono tuttavia a divenire minime alle alte velocità. Essendo il confronto condotto tra dati rilevati a terra e dati simulati in mare, con quote di riferimento sostanzialmente diverse, la loro differenza (generalmente inferiore o uguale a 2 m/s) può essere ragionevolmente accettata.

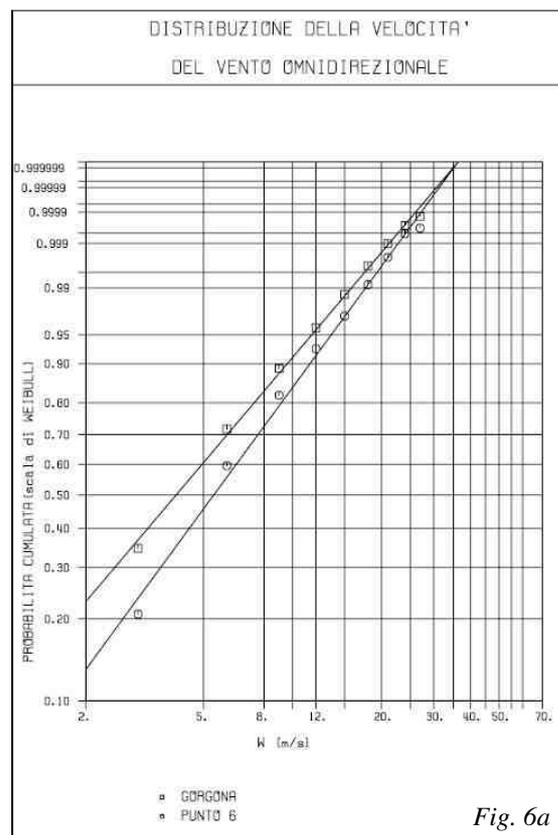


Fig. 6a

Riguardi i valori estremi della velocità del vento, analizzando la seguente tabella si nota che i valori estremi calcolati per il punto 6 sono molto simili, o quasi coincidenti, a quelli misurati.

	PERIODO DI RITORNO (anni)			
	1	10	50	100
PUNTO 6	26.9	31.1	33.8	34.9
GORGONA	25.8	30.4	33.4	34.8

Per la distribuzione direzionale del vento le Figg. 6b e 6c mostrano la distribuzione direzionale del vento in forma grafica ("rosa dei venti"): la prima si riferisce ai dati misurati, la seconda a quelli ricostruiti. Nelle Tabb. 1a e 1b vengono mostrate le distribuzioni della velocità del vento in funzione della direzione di provenienza. Le classi di velocità hanno una risoluzione di 3 m/s, mentre le classi di direzione hanno una risoluzione di 22.5°: tale scelta è giustificata dal fatto che il vento misurato ha una risoluzione direzionale di soli 22.5°.

Il confronto risulta dunque praticamente impossibile. Dall'esame delle tabelle e delle figure si nota infatti uno scarso accordo: va però tenuto conto che la stazione, ubicata sull'isola, potrebbe risultare parzialmente schermata per alcune direzioni. Inoltre, la notevole differenza nelle quote di riferimento comporta differenti rotazioni del campo di vento con conseguenti distribuzioni direzionali differenti.

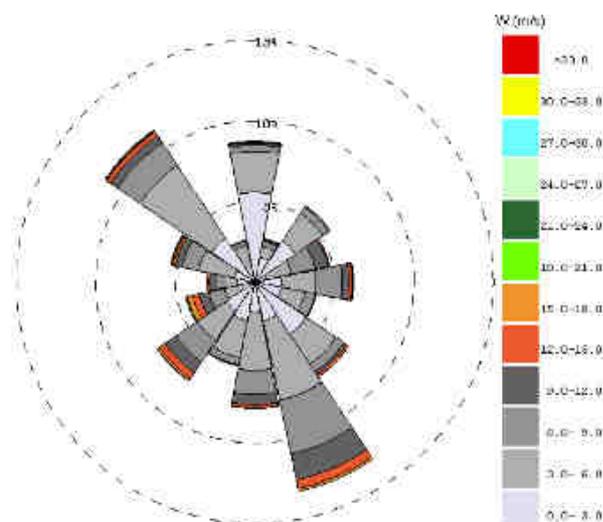


Fig. 6b – Rosa dei venti Stazione di Gorgona

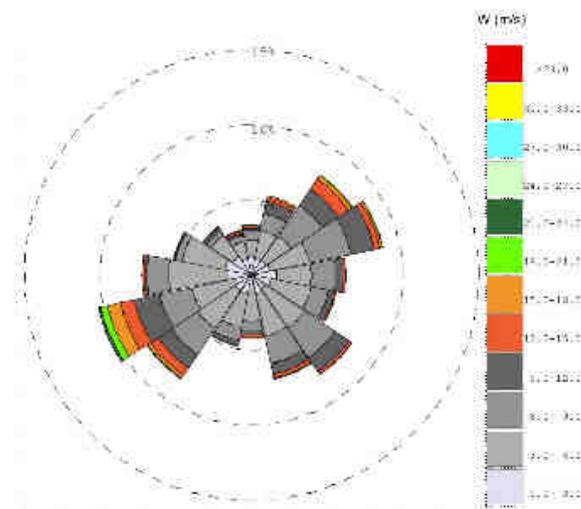


Fig. 6c – Rosa dei venti – Punto griglia 6

DIR	W (m/s)												TOTALE	
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	≥33		
(N)	3	5	9	15	15	18	21	24	27	30	33	≥33		
N	0.06	2.50	0.40	0.14	0.07	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	8.70
NNE	1.67	0.71	0.30	0.10	0.08	0.03	0	0	0	0	0	0	0	2.77
NNE	1.08	2.08	0.45	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.89
NE	2.79	1.69	1.61	0.81	0.19	0.31	0	0	0	0	0	0	0	4.81
E	1.84	2.22	1.63	0.42	0.20	0.08	0.03	0	0	0	0	0	0	8.19
ESE	1.71	1.5	0.88	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.23
SE	3.90	2.28	0.60	0.13	0.17	0	0.01	0	0	0	0	0	0	7.13
SSE	2.46	0.54	3.41	1.04	0.35	0.17	0	0	0	0	0	0	0	10.28
S	1.88	0.81	1.48	0.05	0.18	0.04	0	0	0	0	0	0	0	7.86
SSW	2.43	2.38	0.42	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.33
SW	2.15	2.23	1.81	0.61	0.42	0.18	0.05	0	0	0	0	0	0	7.40
WSW	0.79	1.19	1.02	0.62	0.12	0.32	0.09	0.03	0	0	0	0	0	1.41
W	1.14	0.79	0.58	0.55	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	5.21
WNW	1.31	2.80	1.05	0.42	0.19	0.08	0.06	0	0	0	0	0	0	8.39
NW	3.28	5.44	1.69	0.53	0.23	0.08	0.38	0.03	0.01	0	0	0	0	11.88
NNW	0.97	1.37	0.26	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.68
TOTALE	34.54	37.25	17.00	7.01	5.78	0.95	0.26	0.07	0.01	0	0	0	0	100.00

Tab. 1a – Distribuzione della velocità del vento misurato per settore di provenienza – Stazione di Gorgonia

DIR	W (m/s)												TOTALE	
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	≥33		
(N)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	≥33		
N	1.26	1.08	0.65	0.17	0.12	0.05	0	0.02	0	0	0	0	0	3.36
NNE	1.15	1.89	1.15	0.82	0.24	0.14	0	0	0	0	0	0	0	5.41
NNE	1.17	1.98	2.48	1.29	0.82	0.26	0.05	0	0	0	0	0	0	8.07
NNE	1.24	2.89	2.80	1.57	0.37	0.14	0.05	0	0	0	0	0	0	8.87
E	1.86	2.27	1.57	0.66	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	6.21
ESE	1.31	2.71	1.17	0.40	0.1	0.02	0	0	0	0	0	0	0	5.72
SE	1.08	3.17	2.41	1.12	0.19	0.05	0	0	0	0	0	0	0	8.03
SSC	1.29	2.87	1.87	0.79	0.24	0.05	0.03	0	0	0	0	0	0	7.19
S	0.86	2.22	0.88	0.24	0.17	0.05	0	0	0	0	0	0	0	4.23
SSW	1.26	2.29	0.91	0.31	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	4.83
SW	1.26	3.04	2.08	1.06	0.58	0.24	0.03	0.02	0	0	0	0	0	8.34
WSW	1.14	2.90	2.17	1.73	0.91	0.89	0.44	0.14	0.02	0	0	0	0	10.34
W	1.59	3.88	1.43	0.19	0.12	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	7.26
WNW	1.82	2.87	0.44	0.07	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	5.25
NW	1.50	1.78	0.37	0.21	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	3.90
NNW	1.15	1.17	0.42	0.14	0.16	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	3.08
TOTALE	20.78	36.8	22.82	10.67	4.30	1.86	0.65	0.17	0.02	0	0	0	0	100.00

Tab. 1b – Distribuzione della velocità del vento ricostruito da modello per settore di provenienza – Punto Griglia 6

### 3.3.2 Dati di moto ondoso

Per quanto concerne il moto ondoso, per la validazione è stata condotta con riferimento all'ondametro direzionale di La Spezia: dalla serie temporale di altezza, periodo e direzione dell'onda sono stati estratti i valori simultanei a quelli ricostruiti dal modello e sono stati confrontati con quelli relativi al Punto 3, ubicato alle coordinate  $44.00^\circ$  N,  $9.50^\circ$  E, quindi il punto più vicino alla posizione dell'ondametro di Spezia.

E' tuttavia da tenere in considerazione che il dato simulato si riferisce ad una maglia che ha una risoluzione spaziale molto maggiore di un "punto", ed è calcolato assumendo in input un campo di vento, anch'esso generato da un modello, che ha risoluzione spaziale maggiore o uguale a quella del modello di moto ondoso. Anche la risoluzione spaziale, 3 ore per le misure e 6 ore per il modello, è diversa nei due casi.

Per effettuare un confronto oggettivo sono stati eliminati dalle 2 serie i dati mancanti: le serie sono dunque composte dallo stesso numero di dati simultanei.

Le distribuzioni omnidirezionali dell'altezza d'onda significativa misurate e ricostruite sono mostrate nella Fig. 7a: i punti rappresentano le percentuali delle varie classi, le rette rappresentano il *best-fit* dei dati.

L'utilizzo della carta probabilistica di Weibull deriva dal fatto che, in via preliminare, si sono calcolati i valori estremi mediante la distribuzione estemale di Weibull, come generalmente effettuato negli studi meteo-marini.

Si noti che le due distribuzioni risultano parallele, indice dello stesso clima ondoso, ma che la retta corrispondente ai dati ricostruiti dal modello si trova alla destra di quella relativa alle misure: se ne deduce che il modello è in grado di rappresentare con una buona affidabilità il clima ondoso, ma sovrastima le altezze d'onda rispetto alle misure di La Spezia.

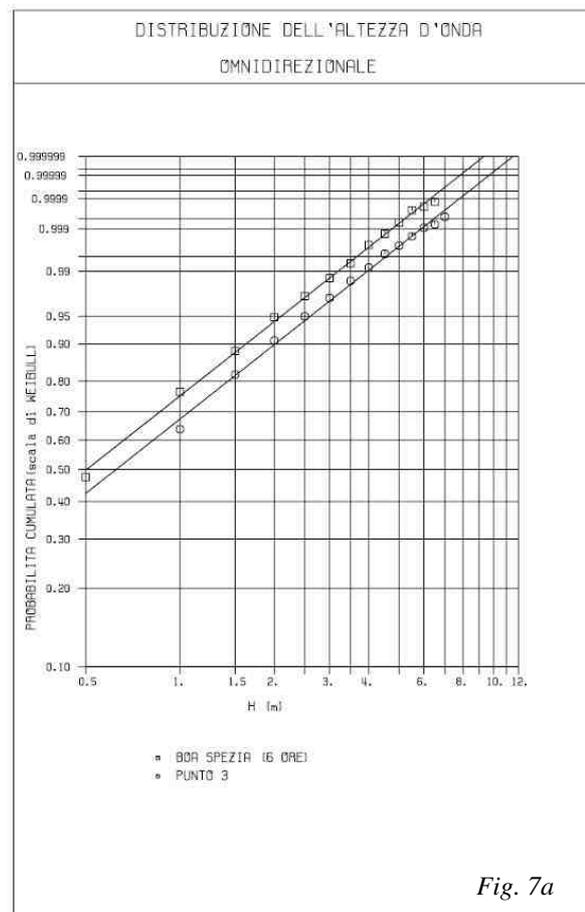


Fig. 7a

Riguardo i valori estremi dell'altezza d'onda significativa, analizzando la seguente tabella:

	PERIODO DI RITORNO (anni)			
	1	12	50	100
PUNTO 3	Hs = 5.3 m	7.1 m	8.0 m	8.4 m
BOA DI SPEZIA	Hs = 4.9 m	6.6 m	7.4 m	7.8 m

si nota che i valori estremi calcolati per il punto 3 sono sempre superiori; in particolare che il valore estremo dei 12 anni per la boa di Spezia risulta 6.6 m, quindi in sostanziale accordo con il valore massimo misurato nei 12 anni di misura (6.5 m), mentre quello simulato è superiore di mezzo metro.

Le Figg. 7b e 7c mostrano la distribuzione direzionale dell'altezza d'onda in forma grafica (“rosa delle onde”): la prima si riferisce ai dati misurati, la seconda a quelli ricostruiti. Nelle Tabb. 2a e 2b vengono mostrate le distribuzioni dell'altezza d'onda significativa in funzione della direzione di provenienza delle onde: le classi di altezza hanno una risoluzione di 0.5 m, mentre le classi di direzione hanno una risoluzione di 15°. Dall'esame delle tabelle si nota un andamento del tutto analogo, ad eccezione dei settori 225, 240, 255 e 270°N: mentre la percentuale complessiva è praticamente identica nei due casi (60% per le misure, 61% per il modello) sembra esistere uno spostamento massimo di 10-15° tra misure e simulazioni.

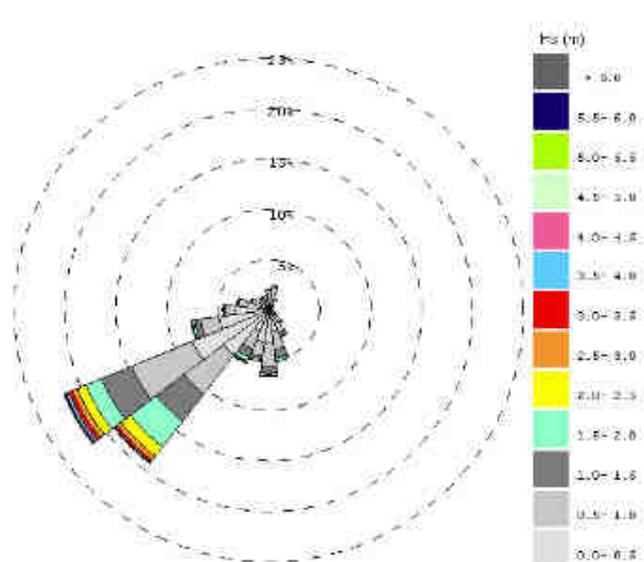


Fig. 7b – Rosa delle onde derivare dalle misure simulazioni

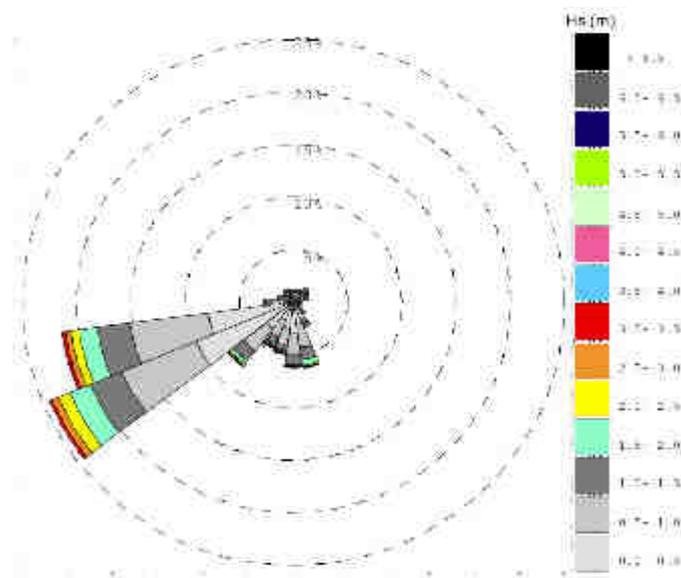


Fig. 7c – Rosa delle onde derivate dalle simulazioni

DIR	Waves													TOTALE
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	>33		
N	5.55	2.55	0.40	0.14	0.07	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	8.78
NNE	1.97	0.71	0.30	0.10	0.05	0.03	0	0	0	0	0	0	0	2.77
NE	2.08	0.40	0.45	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.03
NCE	0.75	1.38	1.51	0.61	0.10	0.01	0	0	0	0	0	0	0	4.31
E	1.61	2.22	1.53	0.12	0.20	0.08	0.03	0	0	0	0	0	0	6.19
ESE	1.71	1.5	0.61	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.93
SE	1.90	2.25	0.60	0.19	0.17	0	0.01	0	0	0	0	0	0	7.13
SSE	2.16	5.01	3.11	1.67	0.55	0.17	0	0	0	0	0	0	0	13.28
S	1.88	3.63	1.48	0.03	0.31	0.04	0	0	0	0	0	0	0	7.48
SSW	2.43	2.06	0.42	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.03
SW	2.18	2.23	1.31	0.51	0.42	0.26	0.03	0	0	0	0	0	0	7.40
WSW	0.75	1.15	1.02	0.52	0.42	0.32	0.09	0.03	0	0	0	0	0	4.24
W	1.14	0.78	0.58	0.35	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	3.01
WNW	1.31	2.30	1.35	0.42	0.34	0.20	0.05	0	0	0	0	0	0	6.30
NW	1.28	5.44	1.89	0.53	0.29	0.08	0.05	0.05	0.01	0	0	0	0	11.30
NNW	0.97	1.37	0.26	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.66
TOTALE	64.64	17.20	17.08	7.01	2.78	0.83	0.26	0.07	0.01	0	0	0	0	100.00

Tab. 2a - Frequenza (%) dell'altezza d'onda misurata per la direzione di provenienza

DIR	Waves													TOTALE
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	>33		
N	1.25	0.05	0.85	0.17	0.12	0.05	0	0.02	0	0	0	0	0	3.39
NNE	1.13	1.45	1.15	0.82	0.24	0.14	0	0	0	0	0	0	0	5.21
NE	1.17	1.98	2.46	1.29	0.42	0.26	0.05	0	0	0	0	0	0	6.37
NCE	1.24	2.65	2.80	1.57	0.37	0.14	0.05	0	0	0	0	0	0	6.87
E	1.68	2.22	1.57	0.56	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	6.21
ESE	1.37	2.71	1.17	0.40	0.1	0.02	0	0	0	0	0	0	0	5.77
SE	1.08	3.17	2.41	1.72	0.15	0.05	0	0	0	0	0	0	0	6.33
SSE	1.25	2.87	1.87	0.73	0.24	0.05	0.03	0	0	0	0	0	0	7.10
S	0.85	2.22	0.86	0.24	0.17	0.05	0	0	0	0	0	0	0	4.25
SSW	1.28	2.25	0.31	0.31	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	4.35
SW	1.25	3.04	2.05	1.05	0.55	0.27	0.03	0.02	0	0	0	0	0	8.34
WSW	1.14	2.90	2.17	1.73	0.91	0.60	0.44	0.14	0.02	0	0	0	0	10.34
W	1.53	3.38	1.43	0.19	0.12	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	7.26
WNW	1.82	2.87	0.44	0.07	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	5.25
NW	1.52	1.75	0.37	0.21	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	3.30
NNW	1.15	1.17	0.42	0.1	0.15	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	3.38
TOTALE	20.75	38.5	22.82	10.17	4.42	1.98	0.83	0.17	0.02	0	0	0	0	100.00

Tab. 2b - Frequenza (%) dell'altezza d'onda ricostruita per la direzione di provenienza

Riguardo la distribuzione dei periodi delle onde, nelle Figg. 8a e 8b sono riportate graficamente le due distribuzioni dei periodi di picco  $T_m$  e  $T_p$  misurati in funzione di quelli ricostruiti. Dal confronto tra le distribuzioni si nota che, per il periodo medio, i periodi inferiori ai 9s vengono sottostimati dal modello, mentre quelli superiori sovrastimati; in entrambi i casi l'errore massimo è però dell'ordine di 0.5 s.

Il periodo medio misurato è mediamente inferiore al periodo simulato, ma, per onde aventi altezza superiore ai 2 m, l'accordo è generalmente buono.

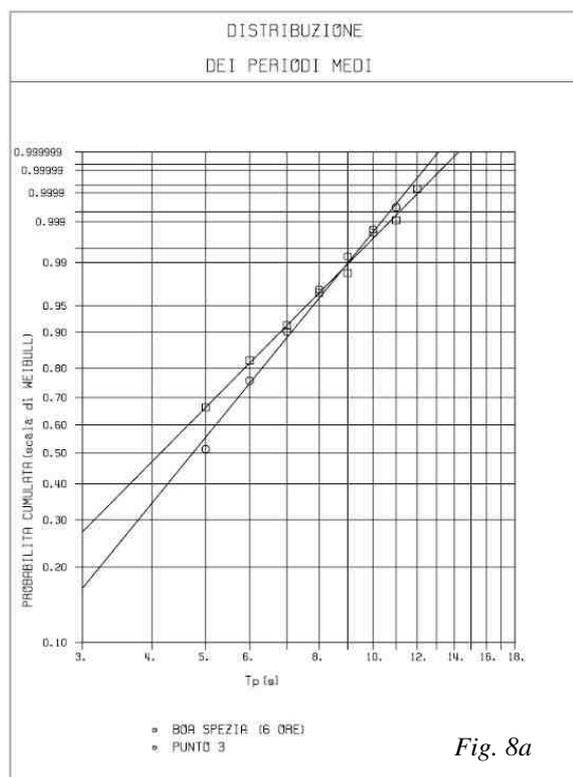


Fig. 8a

Per il periodo di picco si ha invece una sovrastima in tutti i casi e l'errore cresce al crescere di  $T_p$ , fino ad arrivare a circa 2 s per periodi maggiori di 10 s. Il periodo di picco misurato è comunque sempre inferiore a quello simulato.

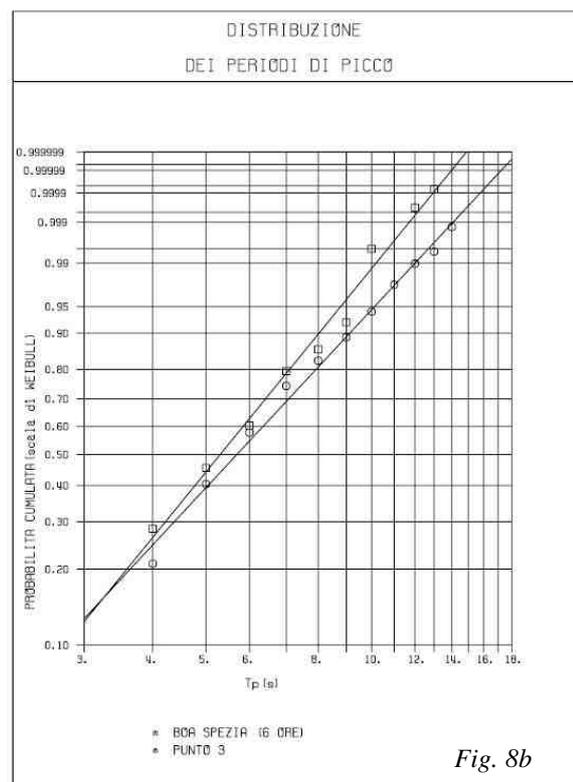


Fig. 8b

La relazione altezza-periodo d'onda H-T è decisamente importante nel clima ondoso, sia per le conseguenze che ha in termini di ripidità dell'onda (e quindi nella tipologia di frangimento), sia perché è attraverso questa relazione che vengono associati i periodi alle onde estreme.

Le Tabb. 3a e 3b mostrano l'andamento del periodo medio e del periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda significativa, mentre nelle Figg. 9a e 9b sono mostrati gli scatter-diagrams H-T per i dati relativi al Punto 3 e per quelli misurati dalla Boa di Spezia.

Tm	Hs [m]														TOTALE
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	>6.5	
<3	0.48	0.70	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.31
4	7.30	9.78	7.71	0.33	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20.33
5	11.64	10.5	5.59	2.05	0.44	0.39	0.01	0	0	0	0	0	0	0	30.26
6	7.49	7.73	4.31	2.31	1.28	0.52	0.21	0.01	0.05	0	0	0	0	0	23.96
7	1.17	4.65	3.21	2.03	1.32	0.92	0.50	0.26	0.10	0.05	0.02	0.01	0	0	14.22
8	0.21	1.13	1.76	1.31	0.81	0.51	0.37	0.25	0.22	0.07	0.07	0.01	0.01	0	7.04
9	0.06	0.32	0.54	0.40	0.26	0.15	0.21	0.1	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01	0.03	2.29
10	0.01	0.03	0.09	0.10	0.11	0.07	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0.83
11	0	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0.11
12	0.01	0	0.01	0.02	0	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.06
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALE	28.37	35.22	18.23	6.69	4.30	2.30	1.35	0.68	0.44	0.18	0.13	0.06	0.02	0.03	100.00

Tab. 3a – Distribuzione del periodo medio in funzione dell'altezza d'onda significativa

Tp	Hs [m]														TOTALE
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	>6.5	
<3	7.91	1.24	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.25
4	7.17	7.96	1.02	0.10	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.15
5	8.58	6.97	3.99	1.07	0.23	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0	0	18.89
6	5.09	5.65	3.25	1.82	0.51	0.17	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0	17.10
7	3.23	5.78	3.19	2.01	1.41	0.76	0.38	0.13	0.06	0.01	0.01	0	0	0	16.96
8	1.07	2.71	1.01	0.96	0.63	0.47	0.31	0.22	0.11	0.03	0.02	0.01	0	0	8.27
9	0.01	2.01	1.48	0.01	0.51	0.42	0.23	0.10	0.11	0.07	0.05	0.01	0.01	0	6.63
10	0.50	1.36	1.37	0.82	0.42	0.21	0.19	0.09	0.06	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	5.15
11	0.19	1.04	0.07	0.59	0.27	0.14	0.10	0.09	0.05	0.03	0.02	0.02	0	0.01	3.41
12	0.08	0.38	0.38	0.27	0.15	0.06	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	1.41
13	0.11	0.11	0.17	0.16	0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0.74
TOTALE	28.37	35.22	18.73	8.69	4.30	2.30	1.35	0.68	0.44	0.18	0.13	0.06	0.02	0.03	100.00

Tab. 3b - Distribuzione del periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda significativa

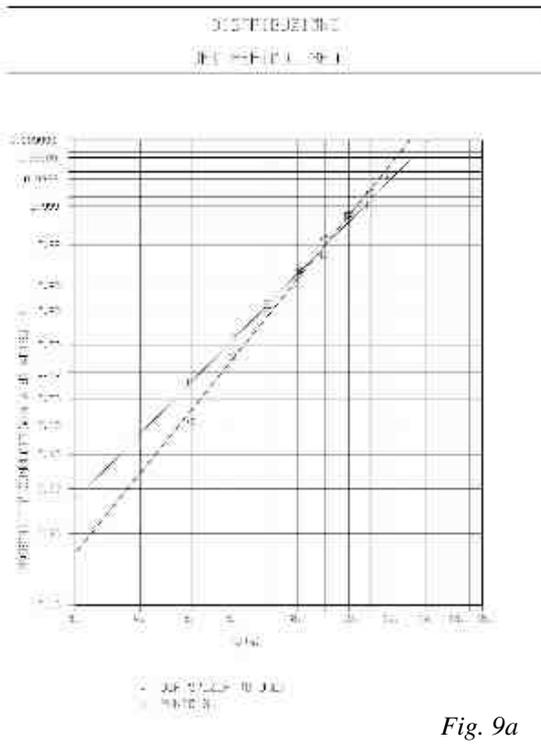


Fig. 9a

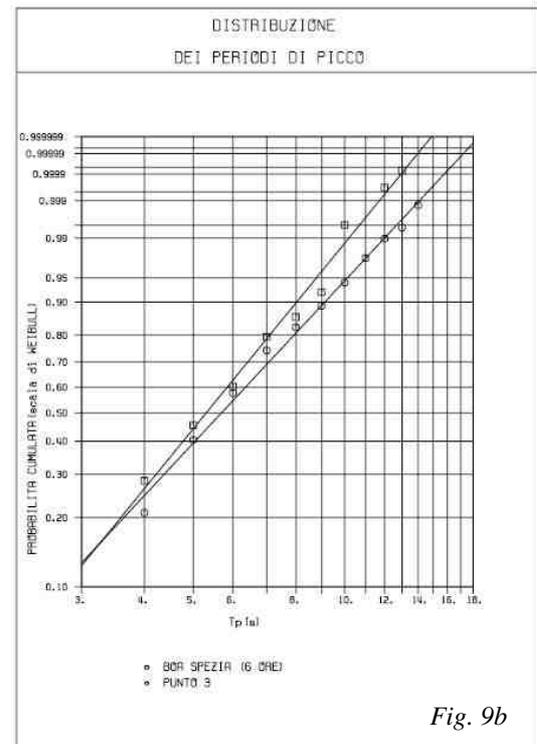


Fig. 9b

Le relazioni ottenibili dall'analisi dei dati risultano le seguenti:

$$H_s = 0.09 T_m^2 \quad (\text{periodo medio}) \quad [1]$$

$$H_s = 0.05 T_p^2 \quad (\text{periodo di picco}) \quad [2]$$

$$H_s = 0.06 T_s^2 \quad (\text{periodo significativo}) \quad [3]$$

Dall'esame dei dati Hs-Tm, per La Spezia ed il Punto 3, si è potuto osservare quanto segue:

- le relazioni H-T di *best-fit* sono abbastanza simili se vengono considerate tutte le onde, mentre sono un po' diverse se vengono considerate solo le onde maggiori di 2 m;
- la relazione [1] riproduce in maniera perfetta l'andamento del mare da vento misurato, in maniera sufficiente quello ricostruito.

Dall'esame dei dati Hs-Tp, per La Spezia ed il Punto 3, si è potuto osservare quanto segue:

- le relazioni H-T di *best-fit* sono abbastanza simili se vengono considerate tutte le onde, mentre sono identiche se vengono considerate solo le onde maggiori di 2 m;
- la relazione [2] riproduce in maniera perfetta l'andamento del mare da vento misurato, in maniera sufficiente quello ricostruito.

### 3.3.3 Dati di livello

La validazione ha permesso di disporre, per Bocca d'Arno, di una serie temporale decennale, dal 1995 al 2004, per un totale di 84413 dati orari, che rappresentano il 96.4% dei dati possibili.

Per Bocca di Serchio sono disponibili i dati dal 2000 al 2004, per un totale di 41448 dati orari che rappresentano il 94.6% dei dati possibili.

Le serie temporali sono state sottoposte ad analisi armonica prima, per separare la parte deterministica (marea) da quella aperiodica: in tal modo si è verificato che il contenuto delle armoniche soddisfa ciò che le tavole di marea riportano, relativamente alle caratteristiche generali dell'oscillazione di marea (costanti armoniche).

Successivamente sono stati effettuati vari filtraggi in frequenza sulla serie temporale residua (componente aperiodica) per analizzare le variazioni a breve, medio e lungo termine.

Ancora si è cercata la correlazione vento-livello, i cui risultati hanno permesso di verificare l'adeguatezza della serie nel descrivere la fenomenologia costiera.

I risultati sopra descritti non sono qui riportati, nelle Fig. 10a e 10b vengono mostrati, a titolo di esempio, gli istogrammi dei valori di livello per la serie originale, per quella armonica (marea) e per la serie residua sia per il mareografo di Bocca d'Arno che per quello di Bocca di Serchio.

I risultati confermano la sostanziale validità delle serie orarie definite ai fini dello studio.

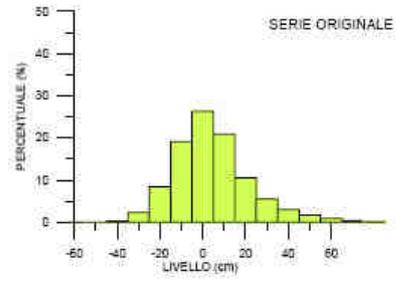
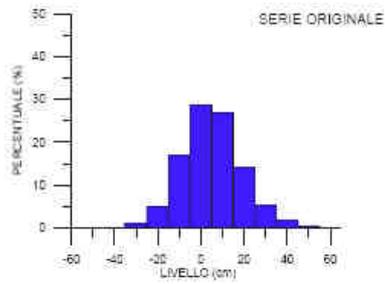
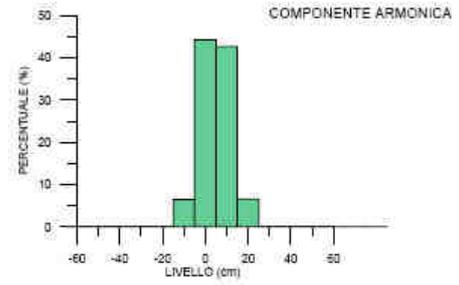
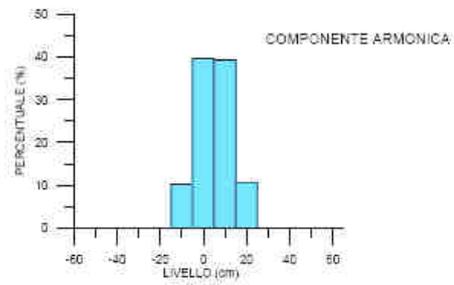
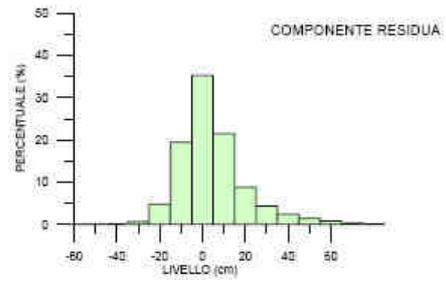
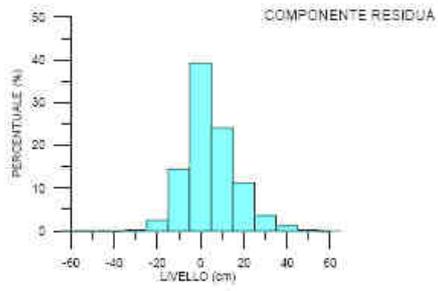


Fig. 10a - distribuzione dei valori di livello del mare a bocca d'Arno

Fig. 10b - distribuzione dei valori di livello del mare a bocca di Serchio

#### 4. ATTIVITÀ D'INDAGINE PRELIMINARE

La presente intervento, pur di natura urgente, si inserisce nel quadro di interventi del “Programma regionale di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale” (D.C.R.T. n. 47 del 11 marzo 2003) ed in particolare fa riferimento all’Intervento n. 4 “Fiume Serchio - Bocca d’Arno”.

In tale ambito è stata prevista una campagna d’indagine sull’intera fascia costiera in provincia di Pisa, consistente in:

##### *Rilievi batimetrici e della spiaggia emersa*

Da un primo inquadramento degli interventi emerse la necessità di impostare gli studi e le progettazioni su un quadro morfologico aggiornato della costa, sia relativamente alla batimetria che alla conformazione della spiaggia emersa.

Tali indagini sono risultate indispensabili per il completamento del quadro conoscitivo di evoluzione della linea di riva, che per il tratto d’interesse specifico è già stata oggetto di stretto monitoraggio negli ultimi anni.

I rilievi topo-batimetrici hanno ad oggi consentito di definire le caratteristiche morfologiche della spiaggia emersa e dei fondali sino alla batimetria -1m (sezioni previste mediamente ad interazze di 50 m), essendo l’indagine batimetrica completa ancora in corso.

Un primo rilievo della fascia litoranea interessata dalle opere è stato condotto nel luglio 2005, tuttavia, a fronte di alcune mareggiate significative verificatesi tra il settembre e l’ottobre 2005, è risultato indispensabile condurre un aggiornamento locale funzionale alla redazione del presente progetto (dicembre 2005).

##### *Analisi dei processi costieri*

Anche riguardo a questo argomento, dall’analisi preliminare delle necessità, emerse una carenza di dati recenti che rappresentassero in modo unitario la situazione attuale; è stato quindi necessario programmare analisi specifiche delle caratteristiche granulometriche e petrografiche su campioni prelevati in sito sia sulla spiaggia emersa che sommersa, la cui localizzazione è stata fissata in ragione dell’estensione ed alla tipologia dell’opera in progetto. E’ così possibile valutare l’ampiezza della spiaggia sommersa che risulta coinvolta dai processi di trasporto solido longitudinale e trasversale.

Nel tratto in esame sono stati effettuati prelievi su transetti interdistanti 150 m con estrazione di 10 campioni per sezione sedimentologica, da sottoporre ad analisi granulometrica e, per un numero ridotto, petrografica.

### *Analisi meteo-marine e modellazione matematica*

Con le analisi meteo-marine sono stati individuati il settore di traversia relativo al paraggio, il moto ondoso al largo, l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva e la determinazione dello stato del mare di progetto.

E' stato quindi affidata la creazione di un modello matematico "specifico" per il tratto di litorale oggetto d'interventi che fornisca non solo l'evoluzione previsionale della linea di costa allo stato attuale, ma anche quella corrispondente all'attuazione degli scenari di progetto.

Questo consentirà, stimando i relativi costi di manutenzione, una valutazione anche sulla "fattibilità economica" degli interventi.

### *Caratterizzazione chimico-microbiologica e bentonica dei sedimenti*

Nell'ambito del piano complessivo d'intervento sono previste alcune aree che potranno essere destinate a cave di sabbia litoranee, per far fronte ai più urgenti fabbisogni di tale materiale, nonché aree ove si prevede un rinascimento artificiale degli arenili. Per queste zone sono in corso indagini specifiche (ai sensi del D.M. 24 gennaio 1996) mediante una campagna di prelievi necessari ad una caratterizzazione di maggior dettaglio, principalmente consistente in:

- caratterizzazione chimica (metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi, sostanze organiche, ecc.)
- caratterizzazione microbiologica (coliformi totali e fecali, streptococchi, salmonella, enterovirus, miceti, ecc.)

Oltre a ciò è prevista l'indagine a più ampio raggio delle porzioni di spiaggia "sommersa ed emersa" finalizzata alle seguenti attività:

- individuazione e studio dei biotracianti: consistente nell'individuazione di organismi micro e macrobentonici esclusivi o preferenziali di particolari biocenosi bentoniche, che possono fungere da traccianti naturali e quindi risultano utili alla comprensione della dinamica del litorale;
- studio sedimentologico e vegetazionale delle dune costiere: finalizzato alla loro conservazione e ricostituzione quali elementi fondamentali di conservazione della spiaggia stessa e di protezione dell'entroterra;
- studio delle forme di fondo (bedform) tramite indagine subacquea: in particolare saranno effettuate analisi e misure dei ripples marks, delle dune subaquee ed individuati eventuali rip-channel;
- studio delle correnti prossimali attraverso traccianti artificiali (drifters);
- integrazione degli studi geologici mediante realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo.

## 5. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Le seguenti previsioni urgenti d'intervento sono fondate sugli elementi (rilievi topografici, modellazione, ecc.) desumibili dalla progettazione dell'intervento già attuato a protezione del litorale tra il Fiume Arno e il "Gombo" e dal seguente monitoraggio condotto negli anni 2001-2003. Tali scelte saranno da sottoporre ad opportuna verifica preventiva alla progettazione esecutiva, principalmente in merito allo sviluppo dei pennelli sommersi e alla loro inclinazione relativa rispetto alla linea di costa, sulla base dei risultati dello studio morfodinamico su modello matematico tridimensionale del paraggio ancora in corso.

L'urgente necessità di contenere l'arretramento della linea di riva, per la salvaguardia degli insediamenti del "Gombo", offre l'occasione di condurre una contestuale sperimentazione in merito all'applicazione di nuovi materiali e tecnologie innovative per la difesa costiera, da poter successivamente applicare a più ampia scala nell'attuazione dell'intervento di protezione complessivo. L'adozione di tali nuove strutture consentiranno non solo una significativa riduzione dei costi ma anche una maggiore rapidità di realizzazione, indispensabile, come nel caso specifico, per interventi da attuare in tempi ridotti. Purtroppo ad oggi l'utilizzo di tali tecnologie è stato condotto in situazioni non propriamente analoghe a quelle in progetto, principalmente in termini di sollecitazione da parte del moto ondoso, poiché la durabilità in ambiente marino è ampiamente dimostrata da applicazioni condotte già da 10-15 anni. Da ciò la necessità di sperimentarne l'efficienza, non solo teorica ma di pratica applicazione alle condizioni meteo-marine dei nostri litorali.

### 5.1 Descrizione dello stato attuale

Come già sinteticamente descritto in premessa, l'Ente Parco di Migliarino-San Rossore ha ormai da tre anni concluso la realizzazione delle seguenti opere tra la foce dell'Arno e le scogliere del Gombo:

- cinque pennelli trasversali, per la maggior parte emergenti e con sviluppo 75-80 m, localizzati prevalentemente nella parte Sud della zona d'intervento ed aventi funzione di interruzione fisica dell'evoluzione erosiva a spirale della linea di costa e di contenimento di un parziale ripascimento;
- quattro pennelli, parzialmente sommersi, aventi funzione di contenimento e d'intercettazione del trasporto litoraneo, di lunghezza pari a circa 130 m;
- il prolungamento di circa 70 m della scogliera radente posta alla radice del pennello di foce d'Arno;

- un limitato ripascimento, nella zona immediatamente a Nord della foce d'Arno con materiali grossolani (ghiaia).

L'intervento comprendeva, ancora, la realizzazione di ulteriori due pennelli a difesa della fascia costiera antistante la Villa presidenziale, il completamento del ripascimento e la realizzazione di una duna, parallela alla costa, necessaria ad evitare l'arretramento della ghiaia di ripascimento e l'infiltrazione di acqua marina verso l'interno. Previsioni che tuttavia, in relazione all'entità del finanziamento iniziale, sono rimaste tali.

## 5.2 Descrizione dello stato di progetto

L'intervento urgente, oggetto della presente relazione, consisterà nel:

- realizzare di un pennello totalmente emerso, in corrispondenza della quarta scogliera del Gombo (la penultima andando verso Nord), che vada ad arginare il movimento di materiale attualmente in atto e che sta provocando il graduale arretramento della spiaggia retrostante le scogliere stesse. Tale opera avrà uno sviluppo di circa 200m, di sezione trapezia con sommità di 5,00m posta a quota massima di +1,50m s.l.m. e scarpe laterali 2:1. Al fine di contenere l'utilizzo di materiale lapideo, così da ridurre costi e tempi di realizzazione, ma soprattutto per limitare l'incidenza dei trasporti sul delicato ecosistema dell'entroterra (parco naturale di san Rossore), si prevede la realizzazione del pennello con un nucleo in "geotubo" di polipropilene riempito in sabbia, protetto con apposita guaina sempre in polipropilene ad alta resistenza e rivestito con scogli di 2° categoria marittima.
- realizzazione di un pennello solo parzialmente emerso con funzione di contenimento sia dell'arenile esistente che del previsto ripascimento. Di lunghezza pari a circa 150 m, di cui la porzione emersa (circa 80m) realizzata con sezione analoga al precedente pennello, ben ammorzata a terra, ma totalmente in scogli naturali e parte soffolta (circa 70m) da realizzare mediante posa di più sezioni di "geotubo" in polipropilene (diametro nominale 4m) riempito in sabbia.
- ricostruzione del sistema dunale degradato tra i due precedenti pennelli, per uno sviluppo di circa 300m. Tale operazione sarà condotta con l'utilizzo di tecniche d'ingegneria naturalistica di recente sperimentazione, consistenti nel riutilizzo di materiali naturali spiaggiati. Il nucleo dunale sarà ricostituito utilizzando tronchi di recupero (o qualora non sufficienti di nuova fornitura) infissi nel terreno a quinconce e collocati orizzontalmente a formare una palizzata di contenimento di altre ramaglie di recupero poste a tergo, il tutto per la formazione di un rinforzo al piede della struttura dunale che contrasti un'eventuale azione erosiva del moto ondoso e che conservi un aspetto naturale anche qualora esposto per erosione del mantello superficiale. Le parti superficiali del

profilo dunale saranno ricostruite con una miscela di sabbia e residui spiaggiati di poseidonia o materiale legnoso di recupero cippato, così da creare una matrice di maggior contenimento della sabbia nei confronti dell'azione eolica.

- eventuale ripascimento in materiale sabbioso, per complessivi 60.000mc, del tratto di arenile contenuto tra i pennelli per il raggiungimento di una condizione stabile della linea di riva e della retrostante duna che, in periodo transitorio, risulterebbe alimentata dal nuovo materiale e quindi in grado di raggiungere un equilibrio morfologico così da poter essere nuovamente vegetata anche mediante successivi interventi di protezione.

## 6. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI

### 6.1 Materiale sabbioso di ripascimento e ripristino dunale

Per il reperimento del materiale necessario alla costituzione del ripascimento, vista l'impossibilità di disporre in tempi certi della cava di prestito terrestre preliminarmente prevista per l'intervento complessivo di difesa del litorale a Nord dell'Arno (arenile in accrescimento a Sud di Viareggio), si prevede di utilizzare il materiale sabbioso derivante dall'attuazione di un contestuale intervento nella limitrofa loc. Le Lame. In tale area sono, infatti, di imminente realizzazione lavori, gestiti direttamente dell'Ente Parco, di ripristino delle aree umide ormai colmate dai sedimenti sabbiosi, mediante un programma di escavazione di circa 60.000mc di sabbia. Detto materiale, di caratteristiche granulometriche analoghe a quello in sito, è però superficialmente interessato da intrusioni vegetali, dovrà pertanto essere oggetto di vagliatura preventiva alla stesa, operazione per la quale si prevede la perdita di circa il 10% del volume disponibile. La sabbia potrà così essere utilizzata per la ricostituzione dell'arenile protetto dalla nuove opere rigide, previa verifica di compatibilità ambientale.

Per la ricostituzione del cordone dunale sarà possibile prevedere l'utilizzo, unitamente al materiale sabbioso disponibile, del materiale spiaggiato sul litorale limitrofo all'intervento (rami, tronchi) da utilizzare intero per la formazione di un nucleo stabilizzante o adeguatamente triturato e ridotto in fibre di matrice legnosa. Quest'ultimo, unito alla sabbia, ha funzione di matrice stabilizzante della superficie dunale nei confronti dell'azione eolica. La stessa funzione è ottenibile utilizzando i residui di posidonia spiaggiata, questi non sono direttamente disponibili nell'area d'intervento ma in diverso sito posto circa 20 km a sud della stessa, sulla fascia costiera limitrofa alla foce del Canale Scolmatore d'Arno, così come individuato nell'allegata tav. 4.2 .

L'eventuale ulteriore ipotesi di approvvigionamento della sabbia da cave sottomarine, oltre ad risultare oggi inattuabile essendo ancora in corso la campagna di ricerca in mare delle stesse, sarebbe economicamente non conveniente in relazione ai ridotti quantitativi necessari per l'intervento urgente.

La componente strutturale dell'intervento previsto ha una sua funzionalità indipendentemente dalla realizzazione o meno del ripascimento (contemporaneo, futuro o addirittura assente). In caso di attuazione delle sole strutture di difesa, infatti, è comunque garantito l'ottenimento almeno della stabilizzazione della linea di riva e quindi l'arresto o la notevole riduzione del trend erosivo in atto (così come dimostrato dal monitoraggio svolto sull'intervento parziale già attuato).

Il ripascimento in sabbia costituisce invece un elemento fondamentale per il mantenimento e la ricostituzione del sistema dunale residuale presente nel tratto d'intervento.

## 6.2 Materiali lapidei

A supporto del programma provinciale di interventi di difesa costiera e dell'intervento in progetto è stato effettuato uno studio finalizzato alla individuazione di siti idonei, per qualità e quantità, dove reperire il materiale lapideo necessario al soddisfacimento dei fabbisogni stimati.

### *Materiali utilizzati nei precedenti interventi*

Lo studio ha preso avvio dalla analisi dei materiali impiegati nell'ambito degli ultimi interventi realizzati dal Ente Parco di Migliarino-San Rossore-Massaciuccoli.

La conoscenza delle varietà litologiche utilizzate costituisce un elemento importante da considerare per le nuove scelte progettuali al fine di conseguire un inserimento armonico rispetto all'esistente delle opere di nuova realizzazione, oltre che individuare l'esistenza e la disponibilità di eventuali materiali adatti ad essere impiegati per gli scopi e le finalità di un intervento quale quello in oggetto.

Nell'ambito dell'intervento attuato a protezione del litorale delle "Lame" sono stati impiegati massi ciclopici per la realizzazione di pennelli (in prevalenza marmo, *Bianco Ordinario* o *Bianco Venato* provenienti dal bacino estrattivo dell'area Apuana).

### *Analisi qualitativo-quantitativa dei materiali disponibili*

La ricerca si è orientata verso l'individuazione delle differenti tipologie di materiale presenti sul mercato, delle quantità immediatamente disponibili in rapporto ad fabbisogno urgente approssimativamente stimato in 3000mc, le relative caratteristiche mineralogico-petrografiche e fisico-meccaniche da cui dipende l'idoneità ad un impiego quale quello in oggetto.

Sono in tal modo stati individuati gli ambiti potenzialmente idonei per qualità e quantità del giacimento. Per ogni sito idoneo sono stati effettuati sopralluoghi al fine di verificare direttamente oltre alle tipologie di materiale presente anche i quantitativi di immediata fornitura e potenzialmente disponibili in banco, provvedendo in alcuni casi al prelievo di campioni da sottoporre a specifiche analisi di laboratorio al fine di verificarne le caratteristiche fisico-meccaniche del materiale estratto e confrontarle con i dati esistenti.

Sono stati, pertanto, considerati, per i bacini estrattivi apuani, sia marmi delle varietà merceologiche non colorate, sia marmi colorati quali il Bardiglio/Bardiglietto. L'utilizzo di questi ultimi presenta un duplice vantaggio di carattere ambientale, in quanto non si va ad incrementare ulteriormente la

domanda di materiale da estrarre e consente inoltre di trovare un idoneo impiego ed adeguata collocazione al materiale stoccato nelle discariche o nei ravaneti di cava.

	<b><i>Marmo Bardiglio</i></b>
Peso Specifico <sup>(1)</sup>	2,69 t/mc
Carico di rottura a compressione <sup>(2)</sup> massimo – minimo – medio (analisi su 5 campioni)	1.304 – 1.040 – 1.145 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente d'imbibizione d'acqua <sup>(1)</sup>	0,22 %
Resistenza all'urto <sup>(1)</sup>	48,5 cm
Resistenza all'abrasione <sup>(1)</sup>	4,1 mm

(1) dato di bibliografia (2) dato desunto dalle prove

Tab. 4

Per quanto riguarda invece le varietà di marmo non colorate, in questa fase, si è fatto riferimento alla documentazione reperibile in letteratura per la definizione delle relative caratteristiche, anche in considerazione della grande variabilità delle qualità merceologiche presenti.

	<b><i>Marmo Bianco Comune</i></b>
Peso Specifico	2,69 t/mc
Carico di rottura a compressione	1.202 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente d'imbibizione d'acqua	0,18 %
Resistenza all'urto	60,1 cm
Resistenza all'abrasione	4,30 mm

Tab. 5

In conclusione il miglior materiale disponibile, a parità di costo, è risultato essere il *Marmo Bardiglio*, tuttavia, in analogia con quanto ad oggi realizzato, potrà essere anche utilizzato *Marmo Bianco*. Tale scelta si rimanda alla fase esecutiva e sarà principalmente condizionata da eventuali prescrizioni di natura paesaggistico-ambientale che dovessero emergere in sede autorizzativa dell'intervento.

### 6.3 Materiali sintetici

Per le porzioni sommerse dei pennelli e per il nucleo delle scogliere emerse, è prevista l'adozione di strutture in "geotubi", ossia elementi di forma tubolare preconfezionati in stabilimento, ricorrendo a specifiche tecniche di cucitura ad elevata resistenza ed impiegando geotessuti realizzati con filamenti in fibre fibrillate di polipropilene ad elevata tenacità additivati in fase di produzione allo scopo di assicurare la necessaria resistenza nei confronti dell'attacco dei raggi UV e del salmastro, dimensionati in base alle specifiche esigenze di progetto. Questi vengono poi riempiti con l'ausilio di idonei apparati di pompaggio con una miscela di acqua e sedimenti disponibili in sito e stesi sul fondo sino ad una profondità massima di -6 m.

L'utilizzo di tale tecnologia, a parità di prestazioni, consente una riduzione dei tempi di lavorazione e un significativo risparmio economico. L'intervento in questione avrà quindi anche valore di campo prova sperimentale per l'applicazione più diffusa di tali strutture nella difesa costiera dei nostri litorali.

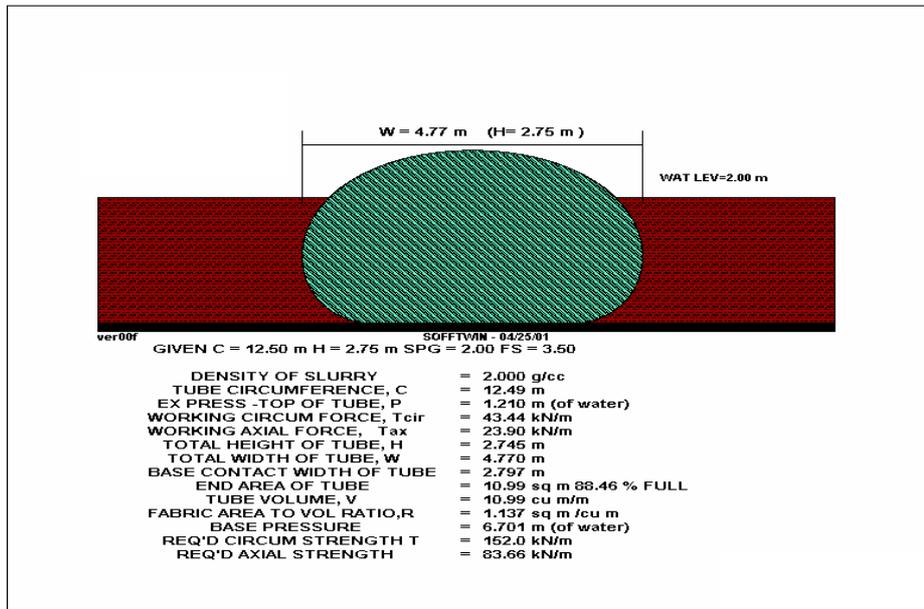


Fig. 11 - Dimensionamento Geotubi

I "geotubi" sono caratterizzati da:

- elevata resistenza meccanica in fase di riempimento ed in fase di esercizio grazie agli elevati valori di resistenza meccanica a trazione caratteristici dei geotessuti impiegati ed alle specifiche tecniche di cucitura ad elevata resistenza utilizzate per il confezionamento dei geotubi.
- elevata permeabilità per consentire la rapida espulsione dell'acqua contenuta nella miscela di riempimento associata a ridotti valori del diametro caratteristico di filtrazione dei geotessuti impiegati in modo tale da garantire il trattenimento delle particelle più fini della miscela di riempimento.
- elevata resistenza all'azione dei raggi UV ed all'azione del salmastro agli specifici additivi impiegati in fase di produzione.
- elevata adattabilità dimensionale alle specifiche esigenze progettuali.

<b>Proprietà meccaniche</b>		
<b>In direzione longitudinale</b>		
Resistenza nominale a trazione	kN/m	200
Allungamento alla resistenza nominale a trazione	%	14
Resistenza a trazione al 10% della deformazione	kN/m	150
Resistenza a trazione al 5% della deformazione	kN/m	50
Resistenza a trazione al 2% della deformazione	kN/m	10
<b>In direzione ortogonale</b>		
Resistenza nominale a trazione	kN/m	200
Allungamento alla resistenza nominale a trazione	%	13
<b>Resistenza al punzonamento statico (C.B.R.)</b>		
Forza perforante	kN	20
Resistenza al punzonamento dinamico (Cone Drop)	mm	6
<b>Proprietà idrauliche e di filtrazione</b>		
Portata d'acqua con battente $\Delta h = 100$ mm	Litri/mq s	25
Battente d'acqua a $v = 10$ mm/s	mm	20
Permittività	1/s	0,5
Permeabilità all'acqua	m/s	0,010
Apertura caratteristica dei pori $O_{90}$ (a secco)	micron	500
Apertura caratteristica dei pori $O_{90}$	micron	230
<b>Durabilità</b>		
Resistenza agli agenti atmosferici a $50$ MJ/m <sup>2</sup>	%	>90
Classificazione	classe	C
Resistenza alla termo ossidazione	classe	B
<b>Proprietà fisiche</b>		
Massa nell'unità di area	g/m <sup>2</sup>	900
Spessore	mm	3,3
Larghezza del rotolo	m	5,2
Lunghezza del rotolo	m	200
Diametro del rotolo	m	0,78
Peso del rotolo	kg	990

Tab. 6 – Caratteristiche fisico meccaniche dei geotubi

Il ricorso all'impiego dei "geotubi", oltre a consentire economie consistenti (a seguito della riduzione costi di approvvigionamento inerti necessari per la realizzazione dell'opera e della contrazione dei tempi di esecuzione), riducono l'invasività dell'intervento in virtù di:

- impiego di materiali disponibili in sito.
- riduzione impatto sulla rete viaria locale (traffico, usura, condizioni ambientali,...).
- riduzione temporale degli eventuali impatti ambientali o sociali (sulle attività locali).

Nei casi in cui il geotubo è utilizzato come nucleo di scogliere, prima del rivestimento in materiale lapideo, si dovrà proteggere mediante posa di una guaina protettiva di polipropilene di stessa resistenza rispetto al geotessuto sottostante.

## 7. ORGANIZZAZIONE DEL CANTIERE E MODALITA' ESECUTIVE DELLE OPERE

Nelle zone dove dovranno essere eseguiti i lavori occorrerà attuare tutti i possibili accorgimenti e precauzioni in modo da arrecare il minor impatto possibile all'ambiente.

L'esecuzione delle opere è prevista nel pieno rispetto delle prescrizioni e raccomandazioni avanzate in sede di autorizzazione dalla Regione Toscana – Determinazione Dirigenziale n. 167 del 20 marzo 2000 pubblicata sul B.U.R.T. n. 16 del 19/04/2000. In linea di massima, le misure che dovranno essere attuate a causa della presenza del cantiere, dovranno riguardare:

### *a) Viabilità e approvvigionamento dei materiali*

Il programma di movimentazione dei materiali terrà conto del limite massimo complessivo di 10 viaggi-autocarro a pieno carico al giorno, da prevedere ad intervalli temporali non minori di 30 minuti.

In relazione all'entità dei materiali necessari alla realizzazione delle opere si stima un traffico complessivo pari a 150 veicoli che, nell'ipotesi di applicazione dei suddetti limiti, presuppone una durata dell'approvvigionamento pari a 20 giorni.

Si prevede di effettuare l'approvvigionamento in periodo invernale (di minor "disturbo" per flora e fauna) accumulando il materiale direttamente nell'area di successivo collocamento, qualora non sia possibile un suo immediato posizionamento in opera.

Al fine di ridurre al minimo le interferenze dei mezzi d'opera con il traffico ordinario, si è individuato il seguente percorso ottimale per raggiungere e smistare i mezzi d'opera presso il cantiere di lavoro, tenendo conto della geometria stradale e relativa capacità :

Percorso in andata e ritorno:

- cava di carico (varia localizzazione);
- percorso autostradale sino alla stazione Pisa Centro;
- percorrenza della S.G.C. sino alla loc. Pisa Aeroporto
- utilizzo della viabilità provinciale e comunale e vicinale (Via Aurelia – Viale delle Lenze – viabilità interna al Parco concordata con l'Ente gestore) per il raggiungimento del cantiere di destinazione;
- ritorno con percorso inverso.

Gli autocarri utilizzati per il trasporto dei materiali dovranno essere revisionati e procedere a velocità ridotta.

Dovranno adottarsi tecniche per la riduzione della propagazione delle polveri, quali: bagnatura delle piste non pavimentate, lavaggio delle ruote in uscita dal cantiere, copertura con teloni del materiale trasportato dagli autocarri.

*b) Utilizzo delle macchine operatrici*

Tutte le macchine utilizzate per i lavori, quali ad esempio quelle per movimenti terra (escavatori, pale meccaniche, ecc.), compressori, gruppi elettrogeni, martelli demolitori, ecc. dovranno essere del tipo silenziato e di moderna concezione, con marmitte perfettamente efficienti.

Al fine di limitare il rischio di rilascio di carburanti, lubrificanti ed altri idrocarburi in mare dovrà essere posta particolare attenzione all'esecuzione dei relativi rifornimenti ai mezzi meccanici e prevedere un controllo giornaliero dei circuiti oleodinamici.

*b) Modalità di posa dei geotubi*

Le modalità di posa dei "geotubi" si differenziano a seconda che il piano di posa sia posizionato al di sotto o al di sopra del livello del pelo libero dell'acqua.

Nel primo caso le operazioni di posa si articolano nei seguenti punti:

- posizionare dei paletti, con funzione di guida provvisoria, su entrambi i lati del geotubo con opportuno passo longitudinale (circa 15m) e trasversale (funzione delle dimensioni del tubo).
- srotolare completamente il geotubo in modo tale che i bocchettoni siano posizionati sul lato superiore dello stesso.
- fissare il geotubo ai paletti, sfruttando le asole disposte sui lati del geotessile avendo di cura di non tenderlo eccessivamente in modo tale da assecondare gli spostamenti dovuti al riempimento.
- collegare il bocchettone di riempimento al primo boccaporto dopo aver chiuso gli altri con un cordino.
- impiegare inizialmente una mistura di riempimento costituita prevalentemente da acqua e successivamente incrementare la quota di sedimenti sino al 15% massimo.
- monitorare continuamente l'altezza del geotubo durante le operazioni di riempimento per evitare di superare l'altezza di progetto ( $H = ca. 0,6 D_{nominale}$ ). L'altezza del geotubo può essere controllata aprendo uno o più bocchettoni a cominciare da quello più lontano da quello impiegato per il riempimento.
- controllare continuamente il livello di sedimenti all'interno del geotubo durante le operazioni di riempimento. Quando la quantità di sabbia in prossimità del boccaporto di riempimento è tale da impedire il flusso nel resto del geotubo, si deve procedere con le operazioni di riempimento impiegando il boccaporto più lontano ed eventualmente anche quello centrale.

- al termine delle operazioni di riempimento sfilare i paletti dopo aver slegato i cordini di fissaggio.
- i boccaporti possono essere indifferentemente cuciti o legati e ripiegati all'interno del geotubo al termine delle operazioni di riempimento

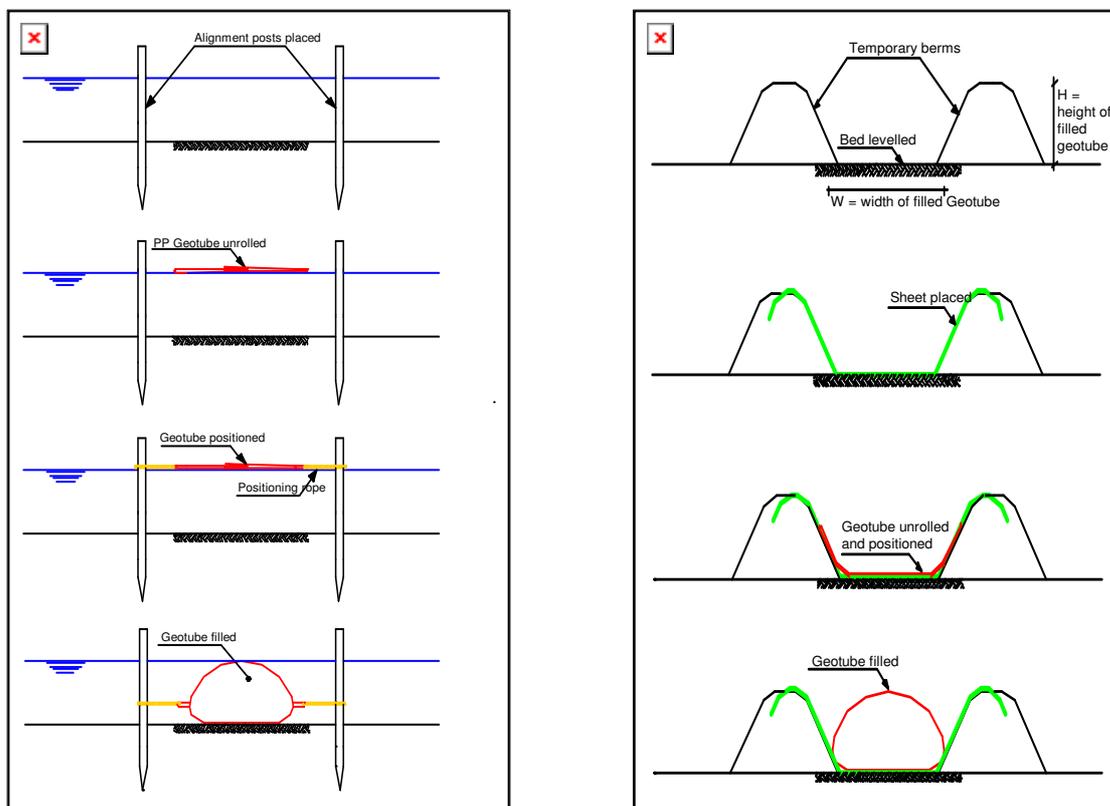


Fig. 12 - Modalità di posa di un Geotubo

Nel secondo caso, piano di posa al di sopra del livello del pelo libero, le operazioni di posa si articolano invece nei seguenti punti:

- preparare il piano di posa livellando e asportando eventuali corpi contundenti che potrebbero essere causa di danneggiamento della struttura.
- Realizzare eventualmente due berme temporanee impiegando materiale disponibile in sito su entrambi i lati del geotubo allo scopo di assicurare una azione di contenimento durante le operazioni di riempimento.
- posizionare a protezione del piano di posa un tessuto in polipropilene allo scopo di impedire l'erosione dovuto al dilavamento del terreno di appoggio causato dall'acqua che filtra attraverso il tessuto del geotubo durante le operazioni di riempimento.
- srotolare completamente il geotubo in modo tale che i bocchettoni siano posizionati sul lato superiore dello stesso.

- collegare il bocchettone di riempimento al primo boccaporto dopo aver chiuso gli altri con un cordino.
- impiegare inizialmente una mistura di riempimento costituita prevalentemente da acqua e successivamente incrementare la quota di sabbia.
- monitorare continuamente l'altezza del geotubo durante le operazioni di riempimento per evitare di superare l'altezza di progetto. L'altezza del geotubo può essere controllata aprendo uno o più bocchettoni a cominciare da quello più lontano da quello impiegato per il riempimento.
- controllare continuamente il livello di sabbia all'interno del geotubo durante le operazioni di riempimento. Quando la quantità di sabbia in prossimità del boccaporto di riempimento è tale da impedire il flusso nel resto del geotubo, si deve procedere con le operazioni di riempimento impiegando il boccaporto più lontano ed eventualmente anche quello centrale.
- al termine delle operazioni di riempimento sfilare i paletti dopo aver slegato i cordini di fissaggio.
- i boccaporti possono essere indifferentemente cuciti o legati e ripiegati all'interno del geotubo al termine delle operazioni di riempimento

In entrambi i casi, qualora il geotubo debba essere coperto con materiale lapideo risulta necessario prevedere la posa di un geotessuto in fibre fibrillate di polipropilene, dotato di asole di fissaggio disposte con regolarità sulla superficie del geotessuto stesso per facilitare le operazioni di posa in opera, allo scopo di prevenire il danneggiamento per punzonamento meccanico del manufatto.



*Fig. 13 - Geotessuto a protezione meccanica del Geotubo*

Qualora si operi su sottofondi caratterizzati da scadenti caratteristiche geomeccaniche è opportuno prevedere un intervento di bonifica da realizzarsi mediante la posa di uno strato di opportuno spessore di materiale granulare confinato da un geotessuto in fibre fibrillate in polipropilene, dotato di asole di

fissaggio disposte con regolarità sulla superficie del geotessuto stesso per consentire il fissaggio degli elementi di zavorra, con funzione di rinforzo e separazione da dimensionarsi sulla base delle specifiche esigenze.

Qualora invece come nella situazione in esame il sottofondo presenti adeguate caratteristiche meccaniche è sufficiente ricorrere ad un geotessuto in monofilamenti in polietilene, dotato di asole di fissaggio disposte con regolarità sulla superficie del geotessuto stesso per consentire il fissaggio degli elementi di zavorra, con funzione di filtrazione e separazione posizionato direttamente fra sottofondo e geotube o se necessario a confinamento di uno strato di bonifica di opportuno spessore di materiale granulare.

Analoghi accorgimenti si adotteranno, nella creazione di strutture soffolte, per la protezione del “piede” del geotudo dalle correnti longitudinali o trasversali, che ne provocherebbero lo scalzamento. Tale protezione sarà opportunamente estesa per almeno 10m laterali al tubo stesso.

## 8. ASPETTI AMBIENTALI

I processi erosivi in atto sulle spiagge a nord della foce dell'Arno sono stati studiati e monitorati da tempo ed è risultato evidente che negli ultimi 100 anni tutto il tratto nord del delta dell'Arno è interessato da una costante e generalizzata erosione che si sta estendendo fino alla foce del Serchio.

Quest'area fa parte del Parco Regionale di Migliarino San Rossore Massaciuccoli che si sviluppa lungo la fascia costiera per circa 32 km su una fascia larga da 3 a 6 km con una superficie complessiva di 24000 ha. La Tenuta occupa la zona compresa fra l'Arno ed il fiume Serchio, rappresenta una delle più importanti aree naturali della Toscana per la presenza e l'integrità di estese formazioni forestali, per l'interesse botanico e faunistico. La tenuta rimane come ultimo esempio in questa zona di quelle selve retrocostiere che un tempo si estendevano lungo tutta la fascia costiera toscana.

I litorali in prossimità della foce dell'Arno, come accade per altri fiumi della Toscana, sono soggetti ad evidenti fenomeni erosivi dovuti principalmente a interventi umani nel bacino idrografico. Per quanto riguarda la foce dell'Arno, l'erosione della costa è stata controllata con importanti opere di difesa sul lato sud per proteggere l'abitato di Marina di Pisa ma sulle spiagge a nord, in assenza di interventi, è stata perduta una superficie di circa 150 ettari negli ultimi 70 anni.

Il dato più preoccupante è rappresentato dai tassi di erosione registrati in conseguenza di alcune mareggiate che hanno investito il litorale pisano nel periodo 1994-1997, che in alcune zone hanno causato arretramenti della linea di riva fino a 20 m all'anno. A circa 1500 m dalla foce dell'Arno sono presenti degli stagni costieri, noti come *Lame*, in cui si raccolgono le acque di pioggia e le acque dolci della falda superficiale; in quest'area sono presenti biotipi caratteristici di zone umide di grande rilevanza.

Le mareggiate hanno provocato l'ingresso di acqua salata all'interno delle *Lame* provocandone una trasformazione in ambiente alofilo; soprattutto, è attualmente molto alto il rischio di distruzione del bosco igrofilo retostante con danni sempre più gravi alla foresta planiziaria, di eccezionale valore ambientale e scientifico.

Ormai da tempo le dune costiere sono scomparse e quindi non esiste più alcun ostacolo all'ingresso di acqua di mare nelle zone interne.

Tale danno è stato ritenuto inaccettabile e pertanto è stato ritenuto necessario un intervento di difesa.

L'Amministrazione della Tenuta di San Rossore ha pertanto conferito l'incarico, dando esecuzione alla delibera della Giunta Regionale n. 1247 del 3 novembre 1997, di predisporre un progetto per la protezione della zona delle Lame nel litorale di San Rossore limitatamente al tratto fra la foce dell'Arno ed il Gombo, inserito nel contesto generale di un piano di riassetto dell'intero litorale pisano da parte del Comune di Pisa.

Il progetto è stato essenzialmente un progetto di protezione ambientale per la salvaguardia di un tratto di costa di grande valore all'interno del Parco Regionale di Migliarino San Rossore Massaciuccoli, istituito con L.R. n. 61/79.

Per le opere progettate sono stati privilegiati gli aspetti di efficienza sugli aspetti di compatibilità estetica con il paesaggio del Parco. È stato comunque deciso di ridurre per quanto possibile le opere emergenti, preferendo un intervento basato sul ripascimento artificiale in materiali grossolani (ghiaia) protetto da opere trasversali di contenimento.

Il progetto definitivo prevedeva di eseguire:

- la creazione di una spiaggia in ghiaia (ad oggi non completata) al fine di stabilizzare il litorale con contenimento a terra da parte di una duna artificiale (mai realizzata) per impedire la migrazione verso terra della ghiaia ed il deflusso dell'acqua di infiltrazione verso la zona delle Lame;
- procedendo verso nord dalla foce dell'Arno al Gombo, la costruzione di pennelli in pietrame di cui tre con una lunghezza di 75-80 m prevalentemente emergenti per ostacolare il flusso longitudinale della ghiaia, tre, parzialmente sommersi ed altri tre prevalentemente emersi di lunghezza maggiore (circa 130 m) aventi funzione di contenimento e di intercettazione del trasporto litoraneo. Inoltre tale progetto prevedeva già la realizzazione di un pennello emerso di collegamento a riva delle scogliere del "Gombo", che non ha trovato attuazione nei precedenti lavori ed è pertanto riproposto nell'ambito dell'intervento urgente in argomento.

È stato eseguito uno studio di impatto ambientale (P.L. Aminti, E. Pranzini 1998), ai sensi del DPR 12 aprile 1996, (che prevede l'esecuzione di tale studio per tutte le opere di protezione dall'erosione realizzate in aree protette) che ha preso in esame i possibili impatti sul suolo, sull'ambiente marino, sulla flora e fauna terrestri, sia in fase di costruzione sia in fase di esercizio.

L'intervento dell'Ente Parco "Protezione del litorale compreso tra la foce dell'Arno ed il Gombo" nella Tenuta di S. Rossore, Comune di Pisa, presentato dalla Regione Toscana Dipartimento delle Politiche Territoriali ed Ambientali – Area Difesa del Suolo e Tutela delle Risorse Idriche, è stato sottoposto alla procedura di V.I.A ai sensi della L. R. 79/98 ottenendo con Determinazione

Dirigenziale n. 167 del 20 marzo 2000 pubblicata sul B.U.R.T. n. 16 del 19/04/2000 pronuncia positiva di compatibilità ambientale subordinatamente al rispetto delle prescrizioni e raccomandazioni riportate nel Rapporto Istruttorio allegato al provvedimento.

Il presente progetto riguarda l'attuazione di opere urgenti a protezione delle strutture ricettive del Gombo, in tale ambito si ripropone la realizzazione di un pennello emerso di collegamento a terra delle scogliere frangiflutti, già previsto e valutato in termini di impatto ambientale all'interno del primo progetto di difesa, oltre a una nuovo pennello a nord, previsto nel progetto preliminare complessivo di difesa del litorale a Nord dell'Arno ma il cui inserimento ambientale non è stato valutato nell'ambito degli studi già condotti. Analogamente non è stata analizzata l'incidenza ambientale del ripascimento a nord del Gombo.

*Tra le opere in progetto, quelle non rientranti nel primo intervento e quindi non sottoposte alla procedura di V.I.A., risultano di entità molto limitata rispetto alla sistemazione definitiva del litorale a Nord del Fiume Arno prevista nel nuovo programma regionale d'interventi di difesa costiera (per il quale è in corso apposito studio di impatto ambientale con valutazione di incidenza) e ripropongono tipologie analoghe a quelle già realizzate e ritenute ambientalmente compatibili. Pertanto, non comportando sostanziali variazioni rispetto a quanto già verificato per il primo lotto di lavori attuato dall'Ente Parco ed in considerazione dell'urgente necessità di attuazione dell'intervento, si ritiene di poter procedere alla loro realizzazione attenendosi alle stesse prescrizioni previste nella precedente Determinazione Dirigenziale R.T. n. 167 del 20 marzo 2000 (pubblicata sul B.U.R.T. n. 16 del 19/04/2000) conclusiva della procedura di V.I.A. sul primo lotto di opere.*

Tali interventi saranno comunque sottoposti a valutazione da parte dell'Ente Parco, a cui compete la decisione in tal senso.

## 9. MANUTENZIONE E MONITORAGGIO DEGLI INTERVENTI

### 9.1 Piani di manutenzione

Relativamente agli aspetti manutentivi, questi si configurano essenzialmente nella manutenzione delle scogliere costituenti i nuovo pennelli, attività che riveste un carattere del tutto straordinario e sarà successivamente programmata in relazione alle effettive necessità.

Anche l'eventuale necessità di ulteriori ripascimenti dell'arenile, attività sempre straordinaria, potrà essere programmata sulla base delle risultanze del modello morfodinamico di evoluzione della linea di riva, in corso di elaborazione, che tuttavia terrà conto della completa attuazione del programma di opere di difesa costiera previste a Nord dell'Arno.

### 9.2 Monitoraggio

Al fine di verificare l'interazione esistente degli interventi in progetto sull'evoluzione del litorale, sarà necessario monitorare con regolarità il tratto costiero in oggetto. Si tratterà di un monitoraggio a "scala locale", indispensabile nel caso specifico data anche la natura "sperimentale" delle opere.

Questo potrà attuarsi attraverso le seguenti fasi:

#### *Rilievi topografici e batimetrici*

L'obiettivo sarà quello di valutare mediante rilievi batimetrici le eventuali perdite di materiale che si potrebbero verificare nel tempo e di tarare di conseguenza le strategie di manutenzione, di monitorare gli effetti positivi o negativi sulle porzioni di litorale limitrofe oltre che di verificare l'efficienza del setto sommerso realizzato in "geotubo".

I rilievi topografici della spiaggia emersa saranno finalizzati al monitoraggio morfologico delle dune.

Durante il primo anno dopo l'esecuzione dei lavori, si ritiene opportuno prevedere almeno due rilievi da eseguire indicativamente nei mesi di marzo e settembre.

Ulteriori rilievi potranno essere di tipo "speditivo" e riguardare la sola linea di riva ed il setto sommerso immediatamente dopo il verificarsi di mareggiate intense.

Le risultanze del primo anno di monitoraggio potranno già fornire dati significativi sull'efficienza delle nuove tecniche di difesa costiera e dunale, consentendo di formulare una scelta definitiva in merito all'estensione della loro applicazione.

A partire dal secondo anno il numero dei rilievi potrà essere ridotto ad uno da realizzare alla fine della stagione invernale. Dopo tre anni dalla realizzazione degli interventi si conclude la fase di monitoraggio in senso stretto. In relazione alle relative risultanze, potrà essere valutata la necessità di un'eventuale estensione delle indagini.

*Analisi dei parametri sedimentologici*

Per la campagna di prelievo a scala locale sarà necessario effettuare almeno nove punti di prelievo lungo transetti posti ad interasse di circa 100 m ed in corrispondenza delle nuove opere.

Sarà buona norma eseguire i prelievi di sedimenti in concomitanza dei rilievi batimetrici ed in corrispondenza delle sezioni trasversali di monitoraggio.

Particolare attenzione andrà posta ai campionamenti eseguiti in corrispondenza delle opere (pennelli, scogliere foranee ecc), che influenzano in modo significativo la dinamica dei sedimenti, per apprezzare eventuali fenomeni di migrazione e fuga della matrice detritica.