



# APAT

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente  
e per i servizi Tecnici

# **A**tlante delle opere di sistemazione costiera

MANUALI E LINEE GUIDA

44/2007



**APAT**

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente  
e per i servizi Tecnici

# **A**tlante delle opere di sistemazione costiera

**Manuali e linee guida**

**Dipartimento difesa del suolo**

**Dipartimento tutela delle acque interne e marine**

**Informazioni legali**

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

**APAT** - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici

Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma

[www.apat.it](http://www.apat.it)

**Dipartimento difesa del suolo**

**Dipartimento tutela delle acque interne e marine**

APAT, Manuali e Linee guida 44/2007 ISBN 88-448-0237-6

Riproduzione autorizzata citando la fonte

**Elaborazione Grafica**

APAT

Grafica Copertina: Franco Iozzoli, Paolo Orlandi

**Coordinamento tipografico**

APAT

**Coordinamento:** Domenico Ligato

**Autori:** Mauro Lucarini, Marilina Del Gizzo

Carla Iadanza, Claudio Cerri, Domenico Berti, Domenico Ligato, Elisa Brustia,  
Eutizio Vittori, Francesco Pasanisi, Gaetano Ferruzza, Matteo Conti,  
Sergio Cappucci, Stefano Corsini

Valeria Sassanelli e Eliana Saracino per i disegni tecnici

Si ringrazia il Prof. Giuseppe Mandaglio per la completa revisione del volume e per i  
significativi commenti per la redazione dello stesso.

Si ringrazia, inoltre, l'ICRAM che ha partecipato con un apprezzato contributo  
nell'ambito del tema delle opere di ricostruzione delle spiagge.

**Supervisione:** Eutizio Vittori, Stefano Corsini



---

# Presentazione

Con questo *Atlante delle opere di sistemazione costiera* l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici arricchisce la trattazione dei temi attinenti alla difesa del suolo, nella collana dedicata ai manuali e alle linee-guida.

Il nuovo Atlante si colloca infatti nella linea editoriale iniziata con *l'Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*, pubblicato nel 2001, e proseguita con *l'Atlante delle opere di sistemazione fluviale*, edito nel 2003, due pubblicazioni che hanno riscosso un notevole interesse, essendo state diffuse complessivamente in circa 8500 copie

Si tratta di documenti pensati per fornire un supporto all'amministratore pubblico, ma anche per offrire un riferimento al singolo professionista, che, grazie anche all'ampio utilizzo di disegni e di immagini che caratterizza queste pubblicazioni, può disporre di un'immediata presentazione della gamma delle opere con le quali è possibile intervenire per la sistemazione del territorio, tenendo conto delle funzioni cui tali opere sono preposte e del loro impatto paesaggistico e, più in generale, ambientale.

La nuova APAT, frutto della riorganizzazione decisa dal Governo con il decreto-legge 3 ottobre 2006, n. 262, e confermata dal Parlamento con la legge di conversione del 24 novembre 2006 n. 286, darà ulteriore impulso a questo tipo di pubblicazioni, che rientrano nella logica della diffusione dell'informazione in campo ambientale, una delle funzioni fondanti del suo mandato.

Voglio infine sottolineare che anche questa pubblicazione è il risultato della sinergia sviluppata tra le professionalità che, per il settore di competenza specifico, erano già presenti nei Servizi Tecnici Nazionali e nell'ANPA, le due componenti che, con la loro fusione, hanno dato vita alla nostra Agenzia.

**Giancarlo Viglione**  
Commissario straordinario

---

---

# Premessa

Nell'ultimo secolo l'interesse economico nei confronti dei litorali ha comportato un aumento delle costruzioni, delle infrastrutture e della popolazione nelle aree costiere. L'uomo ha da sempre realizzato opere per proteggere i tratti di costa soggetti all'azione degli elementi meteo-marini.

La realizzazione di varie tipologie di opere strutturali a basso impatto ambientale e la buona applicazione di normative *ad hoc* sulla gestione integrata delle coste si auspica possano consentire uno sviluppo ambientalmente compatibile di tali aree.

L'Atlante delle opere di sistemazione costiera intende fornire, quindi, una casistica ragionata delle opere realizzate sul territorio seguendo l'impostazione che ha decretato il successo delle precedenti pubblicazioni sulle opere di difesa dei versanti e delle aste fluviali: anche questa volta ci si rivolge ad un ampio spettro di lettori senza sposare decisamente né il taglio tecnico-scientifico né quello divulgativo.

L'atlante si presenta con una prima parte introduttiva, che consente anche ai meno esperti di accostarsi alle nozioni di base delle problematiche in aree costiere quali la dinamica dei litorali. E' importante comprendere quale sia la complessità di una unità fisiografica e dei fenomeni che vi si svolgono in modo da evidenziare l'interdipendenza dei processi naturali e, di conseguenza, la necessità di operare con una visione unitaria delle aree costiere. Questo tipo di approccio si riflette nella pur ancora scarsa normativa vigente sulla gestione integrata delle coste e a questo principio si faranno alcuni richiami per completare il panorama delle problematiche delle sistemazioni costiere.

La seconda parte è costituita dal catalogo delle opere nel quale sono descritte le singole tipologie di intervento con le loro caratteristiche e funzionalità, utilizzando principalmente schemi e fotografie. Il catalogo si snoda attraverso i vari tipi di opere seguendo una classificazione di carattere funzionale. Sono state incluse anche quelle relative ai porti e quelle per la sistemazione delle aree costiere umide.

In appendice sono riportate le "Istruzioni tecniche per la progettazione e la esecuzione di opere di protezione delle coste" redatte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel 1991. Da tale data ad oggi il contesto tecnico, scientifico e normativo si è ampiamente sviluppato dando luogo ad ulteriori esperienze. Tale documento è stato comunque inserito perché ha accompagnato i processi di realizzazione delle opere in qualità di unico riferimento in materia prodotto dagli organi tecnici dello Stato e perché contiene, pur se espressi nel linguaggio del tempo e sulla scorta delle conoscenze allora disponibili, molti dei principi e concetti di validità generale alla base della difesa costiera.

**Leonello Serva**  
*Capo Dipartimento difesa del suolo*

**Giancarlo Boeri**  
*Capo Dipartimento tutela delle acque interne e marine*

---

# Indice

---

## Presentazione Premessa

---

Cap. 1	<b>1.0 LA GESTIONE DELLE COSTE IN ITALIA</b>	<b>1</b>
	1.1 Misure legali	3
	1.2 Attività di recupero e ripristino	6
Cap. 2	<b>2.0 DINAMICA COSTIERA</b>	<b>8</b>
	2.1 Morfologia costiera	10
	2.2 Fattori meteo - marini <i>Venti; Moto ondoso; Correnti litoranee; Maree.</i>	18
	2.3 Bilancio dei sedimenti	25
Cap. 3	<b>3.0 PROGETTAZIONE DELLE OPERE COSTIERE</b>	<b>26</b>
	3.1 Studi propedeutici	27
	3.2 Indagini propedeutiche	28
	3.3 Modellazione	30
	3.4 Tipologie di intervento	34
	3.5 Stima dei costi di realizzazione	42
Cap. 4	<b>4.0 OPERE PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE MARINA</b>	<b>43</b>
	4.1 Opere distaccate parallele <i>Barriere emergenti; Barriere Sommerse; Scogliere artificiali.</i>	48
	4.2 Opere trasversali <i>Pennelli: permeabili; impermeabili; sommersi; di transizione; compositi. Headlands.</i>	65
	4.3 Opere aderenti <i>Rivestimenti; Scogliere radenti; Muri; Paratie.</i>	77
	4.4 Opere di ricostituzione delle spiagge <i>Ripascimento non protetto; Ripascimento protetto con opere rigide.</i>	97
	<b>5.0 OPERE DI SISTEMAZIONE IN AREE COSTIERE UMIDE</b>	<b>110</b>
Cap. 5	5.1 Opere di sistemazione idraulica e geomorfologica	113
	5.2 Opere per il controllo dell'erosione	114
	5.3 Opere stabilizzanti	117
	5.4 Opere combinate di consolidamento	123
Cap. 6	<b>6.0 OPERE PER IL CONTROLLO DELLE MAREE</b>	<b>127</b>
	<i>Argini; Sistemi meccanici di paratoie mobili.</i>	
Cap. 7	<b>7.0 OPERE PORTUALI</b>	<b>129</b>
	7.1 Opere di difesa dei porti	137
	<b>Bibliografia</b>	<b>141</b>
	<b>Appendice</b>	<b>147</b>

---

## Generalità

**U**na gestione sostenibile dell'ambiente costiero deve impedirne il degrado e anzi rafforzare le difese dai pericoli che lo minacciano.

Nasce quindi la necessità di attuare una gestione integrata delle coste su ampia scala, sostenibile a livello ambientale ed economico, ma responsabile a livello sociale e culturale, tenendo conto che negli ultimi anni si è verificato un forte incremento della popolazione costiera, con uno sviluppo troppo spesso caotico delle infrastrutture sulle coste fino al litorale.

L'agenzia europea dell'ambiente indica (Eurosion Project, Final Report, June 2004) che le condizioni delle zone costiere subiscono un degrado costante, aggravato dai cambiamenti climatici, che provocano l'innalzamento del livello del mare, variazioni di forza e frequenza delle tempeste e un aumento dell'erosione costiera e delle inondazioni. Inoltre, l'incremento demografico e lo sviluppo delle attività economiche stanno minacciando l'equilibrio ambientale e sociale delle coste.

Naturalmente, l'Italia è colpita da vicino da questi problemi, ai quali si aggiunge, in numerose regioni, la riduzione dell'attività di pesca e dell'occupazione ad essa collegata.

La gestione integrata della zona costiera (ICZM) è definita dall'Unione Europea come un processo dinamico, multidisciplinare ed iterativo, progettato per promuovere la gestione sostenibile delle aree costiere.

Centro del processo sono cicli di raccolta di informazioni, interpretazione, trasformazione, divulgazione, revisione e valutazione delle risposte ai diversi fabbisogni dei soggetti finali a livello Europeo, nazionale, regionale e locale.

**Figura 1.0.1:** Costa Ligure: Opere di difesa presso Arenzano.



---

I parametri che di volta in volta concorrono a definire gli indicatori del processo di gestione integrata, descrivono analiticamente ogni aspetto della fascia costiera. Si riportano alcuni tra i più importanti termini di valutazione relativi ai seguenti aspetti:

#### **Amministrativo, socio-economico**

- Ruolo e coordinamento tra gli Enti Locali per la gestione e pianificazione delle coste:
  - Gestione integrata della zona costiera per la tutela del mare e delle sue risorse;
  - Qualità delle acque costiere a supporto dell'uso della costa;
  - Portualità sostenibile ed integrazione nel territorio;
  - Pesca costiera, potenzialità, esigenze e conflittualità;
  - Turismo costiero, sviluppo e sostenibilità.
- Rispetto delle norme ambientali vigenti ed in particolare nei seguenti ambiti:
  - Tutela urbanistica delle coste;
  - Tutela del paesaggio, difesa del suolo, vincoli idrogeologici;
  - Tutela aree naturali protette in ambito costiero.

#### **Morfologico, idrodinamico e oceanografico**

- Monitoraggio e studio dell'evoluzione costiera;
- Apporto storico-geografico alla ricostruzione dei trend evolutivi;
- Acquisizione, lettura e monitoraggio dei dati morfo-sedimentologici della costa;
- Rilievo topografico e satellitare in ambito costiero;
- Cartografia informatizzata e sistemi GIS;
- Fattori meteo-marini (vento, pressione atmosferica, moto ondoso, correnti, maree...)
- Elementi per la stabilità delle opere.

#### **Ecologico**

- Valutazione dei casi di inquinamento dell'ambiente marino ed in particolare:
  - Inquinamento da idrocarburi;
  - Inquinamento da prodotti chimici persistenti.
- Tutela degli Habitat costieri:
  - Ruolo del particellato nei flussi costieri;
  - Struttura ed organizzazione delle comunità e processi eco-sistemici;
  - Smaltimento del carico organico;
  - Scale di variabilità dei sistemi costieri;
  - Metodi di analisi.

### Generalità

**I**n Italia le competenze inerenti alla gestione integrata delle coste sono state affidate alle Regioni con la L. 59/97 e il D. Lgs. 112/98, che disciplinano le funzioni e i compiti amministrativi dello Stato, delle regioni e degli enti locali (D. Lgs. 112/98 art. 89 lett. H "sono trasferite alle regioni e agli enti locali tutte le funzioni relative alla programmazione, pianificazione e gestione integrata degli interventi di difesa delle coste e degli abitati costieri").

All'Amministrazione centrale rimangono, secondo quanto previsto dallo stesso D. Lgs. 112/98, i compiti relativi agli indirizzi generali ed ai criteri per la difesa delle coste. Tali compiti vengono esercitati dal ministero direttamente o attraverso gli organismi tecnici ad esso facenti capo, tra cui l'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), l'ICRAM e l'ENEA.

Alcune regioni a loro volta hanno promulgato leggi regionali e elaborato piani e programmi di gestione integrata delle coste, in attuazione alla raccomandazione del parlamento europeo del 30/05/02.

Di seguito sono indicate le misure legali e/o amministrative ai vari livelli, europeo, nazionale e regionale, adottate in Italia per promuovere l'amministrazione integrata delle zone litoranee.

### Misure legali a livello europeo

#### A livello europeo

La strategia europea sulla gestione integrata della zona litoranea (ICZM) e la raccomandazione del Parlamento e del Consiglio Europeo riguardo all'attuazione per la ICZM in Europa ha identificato il ruolo dell'UE come uno dei fornitori di indicazioni e linee guida per sostenere la gestione integrata delle coste da parte degli stati membri, ai livelli locali, regionali e nazionali.

- EU COM 2000/547 Integrated Coastal Zone Management, a strategy for Europe.
- EU Racc. 2002/413 Recommendation of the European Parliament and of the Council, concerning the implementation of Integrated Coastal Zone Management in Europe.

### Misure legali a livello nazionale

#### A livello nazionale

La legislazione nazionale in materia indica che la pianificazione dell'uso del territorio è demandata alle autorità locali e regionali. La gestione della fascia costiera e il controllo dell'erosione promossi dai governi regionali sono finanziati dall'amministrazione centrale. Le strategie dell'ICZM sono perseguite tramite programmi regionali, pertanto non è stata emessa nessuna regolamentazione a livello nazionale riguardo all'amministrazione integrata delle zone litoranee.

- D.P.R. 17 giugno 2003, n. 261 Regolamento di organizzazione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.
- L. 31 luglio 2002, n. 179 Disposizioni in materia ambientale (art. 21 Autorizzazione per gli interventi di tutela della fascia costiera).
- D. Lgs. 31 marzo 1998, n. 112 Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della L. 15 marzo 1997, n. 59 (art. 70 comma 1 lett. a: protezione ed osservazione delle zone costiere; art. 89: programmazione, pianificazione, gestione integrata degli interventi di difesa delle coste e degli abitati costieri).
- D.P.R. 14 aprile 1994 Atto di indirizzo e coordinamento in ordine alle procedure e ai criteri per la determinazione dei bacini idrografici di rilievo nazionale ed interregionale. Il litorale prospiciente i corsi d'acqua rientra nella delimitazione di bacino idrografico.
- L. 31 dicembre 1982, n. 979 Disposizioni per la difesa del mare; promuove il Piano Tecnico delle coste.



## **A livello regionale**

Le misure legali e/o amministrative adottate dai vari governi regionali per la gestione integrata della fascia costiera sono varie e in molti casi incomplete.

Alcune Regioni hanno disciplinato la materia mediante leggi, norme tecniche e piani territoriali, altre hanno affrontato la tematica nell'ambito dei P.O.R. (Piano operativo regionale), alcune infine sono ancora in fase di organizzazione.

### **Liguria**

- L.R. 13/1999 Disciplina le competenze di settore e le attività inerenti gli interventi di ripascimento degli arenili.
- Norme tecniche conseguenti alla L.R. 38/98 art. 16 con riferimento alle opere di difesa della costa.
- Piano territoriale di coordinamento della costa (approvato il 19 dicembre 2000).

### **Toscana**

- L.R. 88/98 e L.R. 91/98 Trasferimento a province e comuni delle funzioni di progettazione e realizzazione delle opere di difesa delle coste e degli abitati costieri.
- Piano regionale di gestione integrata della costa. Approvazione del 5/11/2001 G.R. n. 1214.
- Delib. C.R. 30 gennaio 1990, n. 47 Direttiva per la fascia costiera.

### **Lazio**

- Delib. C.R. 31 luglio 2003, n. 143 Varie citazioni Legge regionale 5 gennaio 2001, n.1, articolo 7. programma integrato di interventi per lo sviluppo del litorale del Lazio.
- L.R. 5 gennaio 2001 n.1. Legge correlata al programma di interventi per lo sviluppo del litorale del Lazio.
- Norme per la valorizzazione e lo sviluppo del litorale del Lazio.

### **Campania**

- Delib. G.R. 30 settembre 2002, n. 4459 - parte B. Linee guida per la Pianificazione territoriale regionale (P.T.R.) Approvazione.
- Delib. G.R. n. 67/2004 procedure tecnico amministrative per il rilascio delle autorizzazioni di competenza regionale in materia di tutela della fascia costiera, in attuazione dell'art. 21 della legge 31 luglio 2002 n. 179.

### **Basilicata**

- P.O.R. 2000-2006 - Asse I, misure 1.3 e 1.5 Risorse Naturali.
- L.R. 34/96 Variante al Piano Territoriale Paesistico di Area Vasta.
- L.R. 3/90 Piano Territoriale Paesistico di Area Vasta

### **Calabria**

- Delib. G.R. 4 novembre 2002, n. 1000. Linea di indirizzo 3. Approvazione linee di indirizzo Progetto Integrato Strategico Rete ecologica regionale P.O.R. 2000-2006. Misura 1.10.
- Delib. G.R. 27 giugno 2001, n. 587. Prog. Oper. Reg. parte III P.O.R. 2000 2006. Misura 1.10 punto 3.2.2.
- Delib. G.R. 26 ottobre 1999, n. 3431, capitolo 2 Programma operativo regionale (P.O.R.) e relativo documento di valutazione ex ante. Presa d'atto
- L.R. 9/89. Misure di protezione delle coste in attesa dell'applicazione del piano urbanistico regionale.
- Proroga della legge regionale n. 14/1973 e successive modificazioni ed integrazioni.

### **Puglia**

- Delib. G.R. 26 settembre 2003, n. 1440, punto 3. L.R. n. 17/2000, art. 4 programma regionale per la tutela dell'ambiente.

### **Abruzzo**

- L.R. 16 settembre 1998, n. 81, art. 3. Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo.
- L.R. 12 agosto 1998, n. 72, art. 8. Organizzazione dell'esercizio delle funzioni amministrative a livello locale.
- Progetto R.I.C.A.M.A. rationale for Integrated Coastal area management, che si è sviluppato nell'ambito del programma Life (1997- 1999) e progetto S.I.CO.R.A. promosso con L.R. 108/97.

---

## Marche

- Delib. G.R. 8 ottobre 2002 n. 1778, MA/DP2. Definizione delle strutture organizzative in cui si articolano i dipartimenti regionali (artt. 9 e 10 L.R. n. 20/2001).
- Delib. G.R. 2 agosto 2002, n. 1461. Allegato Indirizzi regionali per il rilascio di concessioni demaniali marittime nel settore pesca, maricoltura e ricerca scientifica correlata. Ex D.Lgs. 112/98.
- P.A.I. (Piano Assetto Idrogeologico) del settembre 2002 in applicazione alla L.183/89.
- L.R. 365/2000. Gestione integrata della costa e degli abitati costieri.
- L.R. 13/99, in applicazione alla L. 183/89.
- L.R. 267/98. Gestione integrata della costa e degli abitati costieri.

## Emilia Romagna

- Delib. G.R. 9 dicembre 2003, n. 2510. Direttive per l'esercizio delle funzioni amministrative in materia di demanio marittimo e di zone del mare territoriale ai sensi dell'art. 3 comma 1 della L.R. 31 maggio 2002, n.9. Ex D.Lgs. 112/98.
- L.R. 31 maggio 2002, n. 9. Disciplina dell'esercizio delle funzioni amministrative in materia di demanio marittimo e di zone di mare territoriale. Ex D.Lgs. 112/98.
- L.R. 20/2000. Legge generale sulla tutela e disciplina del territorio.
- Piano regionale della costa Approvato nel 1983.

## Veneto

- L.R. n. 117/2001. Conferimento di funzioni e compiti amministrativi alle AA.LL. ex D.Lgs. 112/98.

## Friuli Venezia Giulia

- Delib. G.R. 12 febbraio 2004, n. 534. Seconda parte Programma operativo della regione autonoma FriuliVenezia Giulia triennio 2004 2006.

## Sicilia

- L.R. 23 dicembre 2000, n. 32 art. 142. Disposizioni per l'attuazione del P.O.R. 2000 2006 e di riordino dei regimi di aiuto alle imprese.
- L.R. 11 aprile 1981, n. 65 art. 13. redazione del Piano Difesa delle Coste.

## Sardegna

- P.O.R. 2000 2006. Asse I misura 1.3. Difesa del suolo.
- L.R. 45/89 art. 13. Norme di salvaguardia e tutela delle fasce costiere.

### Generalità

**N**egli ultimi anni le amministrazioni regionali e locali italiane hanno eseguito numerosi interventi di protezione dei litorali dall'erosione, attuando:

- Provvedimenti programmati e finalizzati al recupero di spiagge e degli habitat costieri
- Interventi di emergenza, per difendere strade, ferrovie e abitazioni prossime al mare
- Misure di difesa sperimentali.

### Recupero spiagge e habitat costieri

Progetti di recupero delle spiagge e di ripristino degli habitat mediante interventi di ripascimento. Sono stati, tra gli altri, attuati in Sardegna (spiaggia del Poetto, Cala Gonone), nell'Adriatico (spiagge di Cavallino e Pellestrina, Venezia, litorale Emiliano Romagnolo), sul Tirreno (Ostia, Fiumicino) e in Sicilia (Giardini Naxos).

**Poetto (Sardegna):** la spiaggia del Poetto (Cagliari) è stata oggetto di un ripascimento morbido, con sabbie prelevate a mare (370 mila metri cubi di sabbie da una cava di prestito sottomarina ubicata al centro del Golfo degli Angeli). L'intervento ha ricostituito una larghezza di spiaggia sufficiente a garantirne la stabilità a medio termine, infatti l'originario cordone sabbioso era stato significativamente eroso sia a causa delle forti mareggiate, sia per lo smantellamento della duna costiera dovuto alla costruzione della strada litoranea e, non ultimo, per l'estrazione di sabbie utilizzate per l'edilizia.

**Cala Gonone (Dorgali Nuoro):** sulla spiaggia di Cala Gonone è stato effettuato un versamento di ghiaia prodotta mediante frantumazione di rocce coerenti (calcarei e graniti alterati), protetto da barriere semiaffioranti.

**Cavallino-Pellestrina (Veneto):** le spiagge di Cavallino e Pellestrina, nel nord dell'Adriatico lungo i litorali veneti, sono sottoposte a partire dal 1990 ad interventi di ripascimento artificiale, con l'obiettivo di proteggere i litorali dall'ingressione marina, causata dal moto ondoso e dal sopralzo di tempesta, e di limitare i danni causati ai murazzi, alle opere di difesa e ai centri abitati.

**Litorale romagnolo (Emilia Romagna):** la Regione Emilia Romagna ha attuato numerosi interventi di ripascimento, utilizzando materiali provenienti dal dragaggio dei porti e dagli accumuli sottomarini al largo della propria costa. Un intervento significativo è quello di Goro sul delta del Po, realizzato per contenere il fenomeno delle inondazioni; oltre al ripascimento è stato ricostruito l'antico sistema dunale. Alcuni interventi hanno non solo permesso il mantenimento dell'equilibrio delle spiagge libere da opere di difesa, ma anche il parziale recupero dei 40 km di litorale difesi con scogliere parallele emerse.

**Litorale laziale:** la Regione Lazio ha eseguito negli ultimi anni diversi interventi a difesa del litorale, con l'obiettivo di arginare il preoccupante fenomeno di erosione di varie spiagge. Interventi di ripascimento sono stati effettuati nelle zone di Ostia (Roma), Fiumicino, Anzio e Latina; interventi misti pennelli/ripascimento nelle zone di Terracina, Ostia, Tarquinia. Interventi con sole opere di protezione rigide, prevalentemente scogliere, sono stati realizzati a ridosso di manufatti da difendere.

**Giardini Naxos (Sicilia):** per recuperare il litorale eroso e danneggiato è stato eseguito un intervento misto di strutture rigide e ripascimento con sabbia prelevata nella baia antistante la spiaggia.

### *Interventi di emergenza*

Negli ultimi anni sono state realizzate numerose opere di protezione rigide in condizioni di emergenza, per difendere strade, ferrovie e abitazioni prossime al mare e minacciate da fenomeni di arretramento della spiaggia e/o da eventi di mareggiata.

In particolare sono state realizzate opere di difesa aderenti, scogliere, pennelli e interventi con strutture miste lungo le coste della Calabria tirrenica (Paola Cosenza), della Liguria (Marina di Sarzana), della Toscana (Marina di Massa, Marina di Pisa), dell'Emilia Romagna (Marina di Ravenna), essenzialmente a protezione delle infrastrutture lineari di trasporto dei centri abitati. In molti casi per ridurre l'impatto ambientale gli interventi sono stati combinati con ripascimenti artificiali.

Secondo i principi della sostenibilità ambientale sono stati attuati anche interventi innovativi.

### *Interventi sperimentali*

Nelle Marche (Portonovo, Numana e Porto Recanati) sono state realizzate barriere di difesa con finalità ecologiche e di protezione della fauna, costituite da blocchi in calcestruzzo forniti di alveoli e cavità, che costituiscono un rifugio per i pesci ed un supporto per i molluschi.

Nel Lazio è stata avviata la sperimentazione di tre impianti pilota da installare sul litorale di Ostia (Roma) basati sul sistema di drenaggio B.M.S. (Beach Management System). Il principio di funzionamento è basato su un sistema di drenaggio artificiale lungo la battigia: una condotta drenante sepolta determina un abbassamento del livello freatico e la creazione di una zona non satura al di sotto della superficie sabbiosa.

Altro progetto sperimentale è quello di Civitavecchia dove, sia pure per motivi di compensazione ambientale, è in fase di progettazione avanzata un intervento di recupero e reinserimento di praterie di *Posidonia oceanica* (fanerogama marina che vive sui fondali fino a una profondità dell'ordine dei 20 metri) il cui fogliame avrebbe la capacità di frenare l'impatto del moto ondoso e di trattenere i sedimenti.

**Figura 1.2.1:** Costa Ligure: Opere di difesa presso Cogoleto.





## Generalità

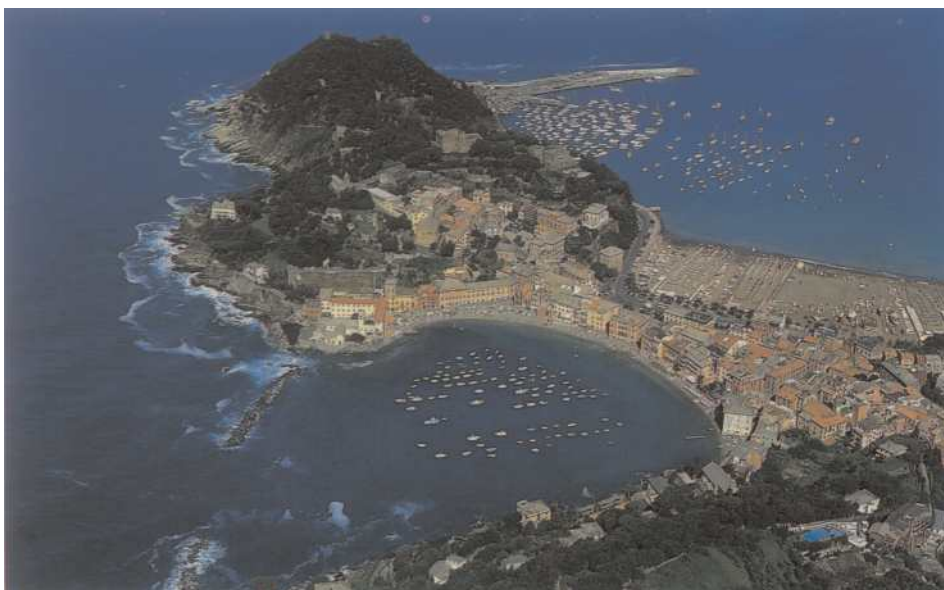
**L'**ambiente costiero rappresenta la fascia di transizione tra le terre emerse ed il mare. Si tratta di una risorsa naturale ed economica di straordinario valore, sottoposta ad una continua ed incessante trasformazione sotto l'azione di fattori climatici e della dinamica interna del nostro pianeta.

Con il termine "dinamica costiera" si indica il complesso dei fenomeni che governano l'evoluzione della fascia costiera nel tempo.

Sebbene i processi naturali abbiano un ruolo di gran lunga predominante, soprattutto nel lungo periodo, tale dinamica può essere localmente influenzata anche fortemente dagli interventi antropici, sia direttamente lungo la costa, che nei bacini idrografici a monte. In particolare, la conformazione del litorale è il risultato di una complessa interazione tra numerosi fattori sia marini che continentali, alcuni dei quali fortemente influenzati da eventi meteorologici estremi:

- apporti fluviali;
- moto ondoso e correnti;
- trasporto eolico;
- fenomeni tettonici di sollevamento/abbassamento del settore costiero;
- variazioni eustatiche del livello marino;
- interventi antropici sui corsi d'acqua o sul litorale;
- subsidenza naturale e indotta.

**Figura 2.0.1:** Sestri Levante (GE). Ambiente costiero come risorsa economica:



**Figura 2.0.2:** Porto di Giulianova (TE): Interferenza dell'opera marittima con il regime di trasporto dei sedimenti. Qualunque opera marittima introduce una modifica della naturale dinamica litoranea e interferisce con il regime di trasporto dei sedimenti. Un'opera di protezione limitata ad un breve tratto di costa in erosione può innescare nuovi fenomeni erosivi nel tratto di costa non protetto a valle della direzione prevalente del trasporto solido litoraneo. Una conoscenza non adeguata dei fenomeni di dinamica costiera può dar luogo a interventi che si rivelano successivamente più dannosi che efficaci.



La descrizione dell'evoluzione della linea di costa richiede l'analisi delle dinamiche sia fluviali che marine, in un'ottica di unitarietà del bacino idrografico e degli ambiti costieri sottesi. Dalle terre emerse le coste ricevono, infatti, attraverso i fiumi, gran parte dei sedimenti che alimentano le spiagge. Il mare, mediante l'azione delle onde e delle correnti, contribuisce in modo determinante a modellare la conformazione della costa, svolgendo una triplice azione di erosione, trasporto e accumulo dei sedimenti costieri. Tale opera modellatrice del mare può portare o all'arretramento della linea di costa, quando prevalgono i suoi effetti erosivi, o ad un avanzamento, nel caso siano preponderanti i processi di accumulo, spesso con entrambi i fenomeni all'opera contemporaneamente in contigui settori costieri.

L'interpretazione dei fenomeni connessi alla dinamica costiera necessita dell'approfondimento dei seguenti temi fondamentali:

- **Morfologia costiera**
- **Fattori meteo marini**
- **Bilancio dei sedimenti**



**Figura 2.0.3:** Arretramento del settore meridionale della spiaggia di Is Arutas (Oristano).  
Da G. De Falco & G. Piergallini



**Figura 2.0.4:** Chia Domusdemaria (CA). Alternanza di costa alta e rocciosa e bassa e sabbiosa.



**Figura 2.0.5:** San Vito Lo Capo (TP): Esposizione del paraggio al moto ondoso.



**Figura 2.0.6:** Rimini. Apporto solido dal fiume Marecchia.



### Generalità

In Italia si alternano due principali tipi morfologici costieri naturali:

coste alte e rocciose, per circa il 34% del totale;  
coste basse e sabbiose, per circa il 58%;  
il restante 8% è costituito da foci e coste banchinate.

Per costa alta si intende un tipo di costa morfologicamente accidentata e articolata, con pareti molto ripide, spesso subverticali, parallele alla linea di riva (valloni, rias, falesie).

Per costa bassa si intende una spiaggia più o meno ampia, molto spesso arcuata (falcata) a debolissima pendenza (lido), con eventuale presenza di sistemi dunali e/o accumuli sabbiosi che possono subire modifiche ad opera del moto ondoso e dei venti. Le coste basse, aree di accumulo di sedimenti per lo più trasportati dai fiumi e ridistribuiti dal mare, sono, dal punto di vista geologico, di età molto recente.

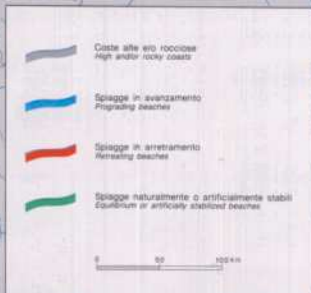
**Figura 2.1.1:** Ventotene (LT): Cala Parata Grande. Il mare aggredisce ed erode le coste rocciose tramite l'abrasione e la corrosione. L'azione di scalzamento al piede della parete rocciosa ne determina il crollo e quindi l'arretramento, contemporaneamente contribuendo alla formazione della piattaforma litoranea.



**Figura 2.1.2:** L'azione del mare rimodella continuamente le coste basse, con velocità di trasformazione di gran lunga superiori a quelle con cui modifica le coste alte.



## EVOLUTIVE TREND OF THE BEACHES IN ITALY



CNR MURST "Atlante delle spiagge italiane".

Alla fine degli anni settanta è stata proposta la seguente classificazione delle coste italiane in sei tipologie (Anselmi et alii, 1978), sulla base dei dati desumibili dalle carte geologiche 1:100.000 e topografiche 1:25.000:

**Rilievi montuosi.** Rilievi collinari o montuosi che raggiungono direttamente il mare. Possono essere presenti falesie o piccolissime spiagge con sedimenti grossolani. Il profilo sommerso riproduce quasi fedelmente quello sovrastante.

**Terrazzi.** Generalmente di costa alta. La parte emersa presenta una superficie tabulare, risultante dall'abrasione marina di un substrato roccioso o dalla deposizione su questo di sedimenti gradati in senso orizzontale o verticale. Il profilo della parte sommersa riproduce quello della parte emersa.

**Pianure litoranee strette.** Pianure elevate sul livello del mare non più di pochi metri, non più larghe di qualche centinaio di metri e delimitate verso l'interno da paleofalesie o scarpate di rilievi collinari, montuosi o di terrazzi.

**Pianure di fiumara.** Valli ampie e profonde in zona di costa alta.

**Pianure alluvionali.** Apparati deltizi, lagune o paludi costiere. Il profilo sottomarino è molto appiattito e corrisponde abbastanza bene a quello della pianura emersa.

**Pianure di dune.** Zone basse nelle quali l'abbondanza di sedimenti medio-fini ha permesso la costruzione di forme dunali, per ampiezze da alcune centinaia di metri a qualche chilometro.

**Figura 2.1.4:** Profilo trasversale di una spiaggia (da G.B. Castiglioni, 1995)

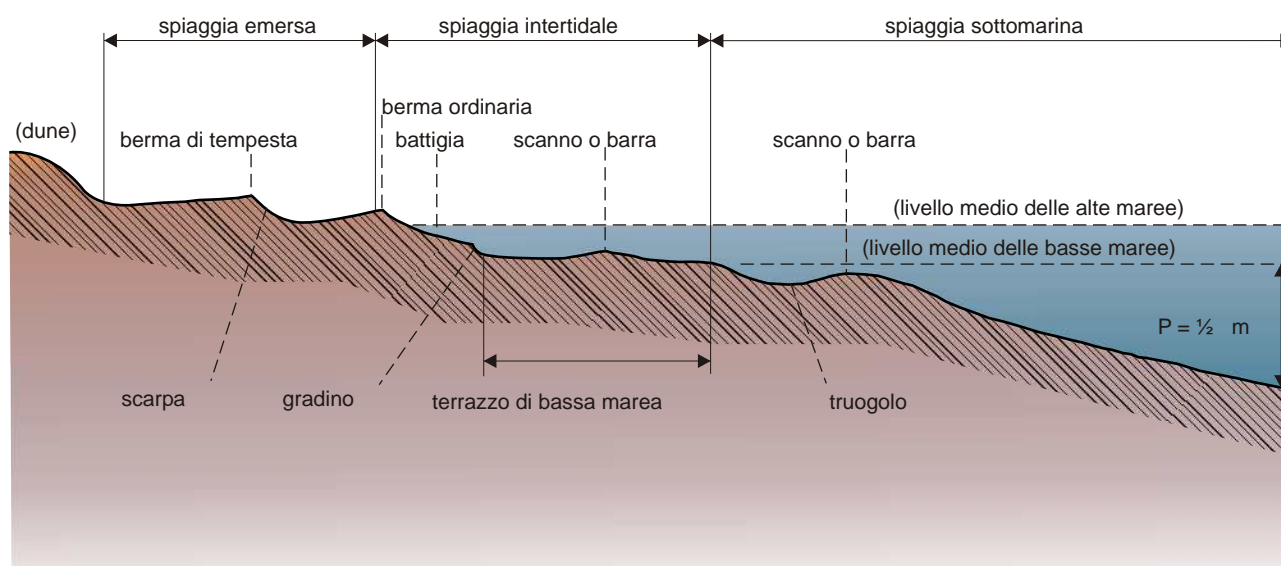
Nella figura il limite superiore della spiaggia emersa è posto al piede della prima duna costiera, dove si esauriscono gli effetti delle onde; il limite inferiore corrisponde al livello medio di alta marea ed è marcato da una cresta a sezione rettangolare, detta berma ordinaria. La berma di tempesta si sviluppa sulla spiaggia emersa ed è un accumulo irregolare di sedimenti dovuto a mareggiate di forte intensità. Si indica come spiaggia intertidale la parte compresa tra il livello medio delle alte maree ed il livello medio delle basse maree. Essa inizia con un pendio liscio, più inclinato della parte inferiore, detta battigia. La spiaggia sottomarina si estende tra il limite inferiore della zona intertidale e la profondità di chiusura. Il profilo è regolare o ondulato da una o più barre o scanni, separati da solchi o truogoli allungati, all'incirca paralleli alla riva, che si formano per effetto di correnti locali generate dal moto ondoso.

Con il termine spiaggia si indica un deposito costiero litorale costituito da sedimenti marini incoerenti (sabbie e/o ciottoli), attuali o recenti, esteso verso terra fino al limite raggiunto dalle onde di tempesta (dune costiere o primi affioramenti rocciosi) e verso mare fino alla profondità di chiusura, oltre la quale il movimento dei depositi sabbiosi a causa del moto ondoso può considerarsi nullo.

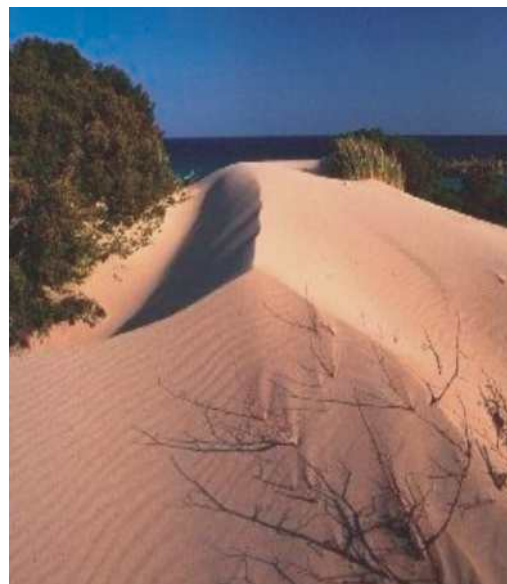
La spiaggia può suddividersi in emersa, intertidale e sottomarina.

Le dune costiere, che costituiscono un serbatoio di sabbia in grado di rifornire le spiagge nelle fasi di massima azione del moto ondoso, rappresentano il limite superiore della spiaggia emersa e sono il risultato di lenti processi di accumulo ad opera del vento.

La formazione delle dune è subordinata alla disponibilità di sabbie in quantità sufficiente e di barriere naturali o artificiali che ne consentano l'intrappolamento.







**Figura 2.1.5:** Le dune si consolidano e si accrescono grazie alla presenza di arbusti e di graminacee, capaci di trattenere la sabbia che il vento trasporta dalle spiagge verso l'entroterra.



**Figura 2.1.6:** Pianure alluvionali (aree colorate in azzurro) e tratti di costa interessati dal fenomeno della subsidenza (in rosso). Enea S. Teresa e Università di Parma, Elementi di gestione costiera, parte II: "Erosione Costiera Lo stato dei litorali italiani"

L'ampiezza della fascia costiera può essere condizionata, talvolta in modo significativo, dai fenomeni di subsidenza ed eustatismo.

La subsidenza è un processo a lungo termine di lento abbassamento del terreno, legato alla naturale costipazione dei sedimenti fini nelle pianure alluvionali, spesso acuito dall'estrazione di acqua e idrocarburi dal sottosuolo.

Con il termine "eustatismo" si indicano invece le modificazioni a lungo termine, sia positive che negative, del livello del mare, legate a cause climatiche. Inoltre, variazioni anche repentine della linea di costa possono essere indotte da movimenti tettonici, per lo più associati a terremoti di forte magnitudo (ad esempio, Cile 1960, Algeria 2004, ecc.).

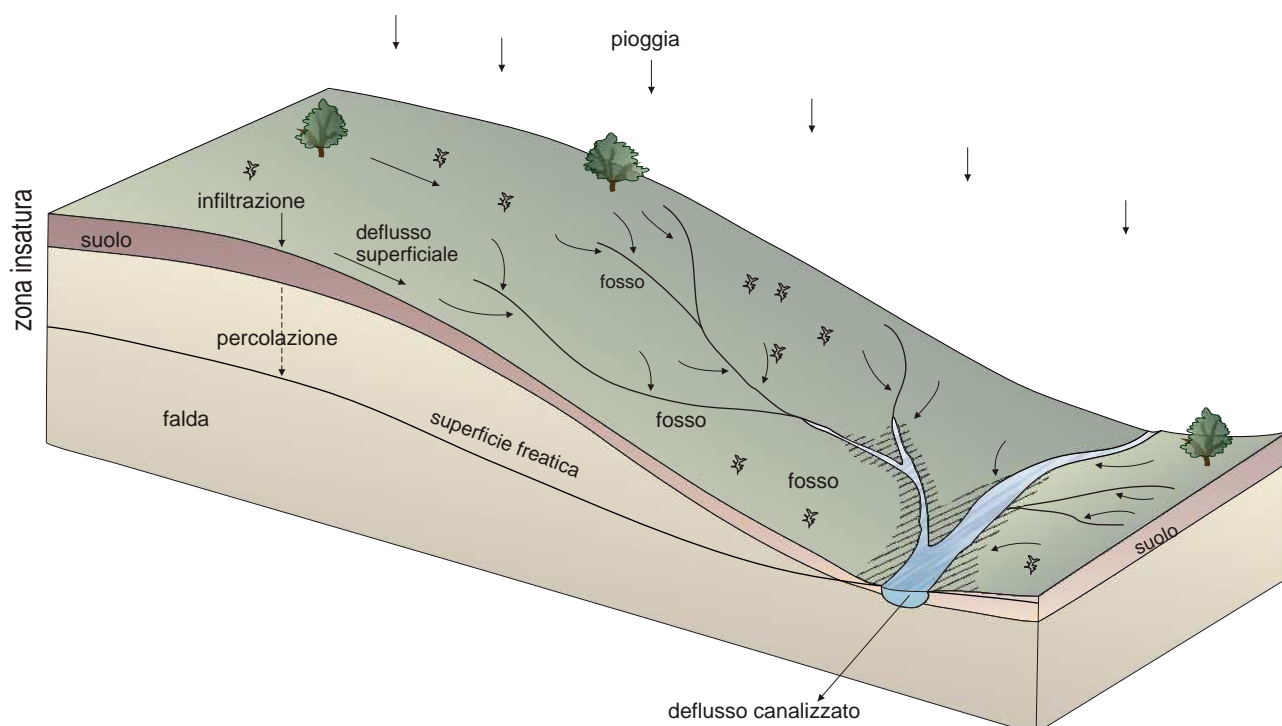
## Il rifornimento di nuovi sedimenti

L'apporto di sedimenti alla foce dei corsi d'acqua costituisce la principale fonte di alimentazione della fascia litoranea. Il volume di sedimenti che raggiungono la foce dipende dall'intensità dell'erosione superficiale nel bacino imbrifero e dai processi di trasporto solido lungo la rete idrografica.

Le modificazioni che interessano il bacino imbrifero, dovute a cause naturali o antropiche, possono determinare una riduzione o, talora, un aumento, della quantità di materiale apportato alla fascia costiera. Una scarsa piovosità nei bacini ha come risultato una minore portata idrica e una minore quantità di materiale eroso sui versanti e convogliato alla foce del corso d'acqua. Allo stesso modo, le sistemazioni idraulico-forestali dei bacini montani, la regimazione dei corsi d'acqua, la costruzione di invasi artificiali e di casse di espansione, il massiccio prelievo di inerti in alveo, riducono in maniera determinante l'apporto di materiale alla fascia litorale. Al contrario disboscamenti, incendi e frane possono aumentarlo.

In conclusione, i sedimenti che costituiscono le spiagge provengono quindi essenzialmente dalla movimentazione dei sedimenti costieri, dall'abrasione delle rocce costiere e dall'apporto solido dei corsi d'acqua. Essi sono costituiti da materiale sciolto che viene suddiviso a seconda della dimensione degli elementi costituenti in ciottoli, ghiaie, sabbie, limi e argille (Scale di Udden-Wentworth e Krumbein).

**Figura 2.1.7:** L'erosione idraulica superficiale è un processo estremamente complesso, influenzato da molteplici fattori: il regime climatico, la capacità erosiva delle precipitazioni, la morfologia del bacino, la litologia dei terreni affioranti, la granulometria dei sedimenti, la copertura vegetale, l'uso del suolo, la lunghezza e densità della rete idrografica. Nella figura sono schematizzati i processi di erosione superficiale a scala di bacino.



Secondo una classica schematizzazione il trasporto dei sedimenti più significativi per la formazione delle spiagge da parte della corrente fluviale può avvenire secondo diverse modalità:

- trasporto di fondo (trascinamento, rotolamento, saltazione) per il materiale più grossolano (circa il 5-10% del trasporto solido totale);
- trasporto in sospensione per la frazione più fina (circa il 90% del trasporto solido totale).
- trasporto in soluzione, in percentuali variabili, secondo la litologia e il clima.

I sedimenti che raggiungono la zona costiera sono costituiti da frammenti di roccia e minerali. La loro composizione mineralogica è funzione della composizione delle rocce madri nei bacini di alimentazione e della distanza percorsa. Il quarzo diviene così spesso il componente predominante, perché più resistente alla degradazione fisica e chimica, quanto più ci si allontana dalla zona di origine del sedimento.

Allo sbocco in mare di un corso d'acqua la velocità della corrente fluviale si attenua fino ad annullarsi a breve distanza dalla foce. La frazione più grossolana di sedimenti fluviali (sabbie e ciottoli) si deposita nell'area di foce e alimenta il trasporto litoraneo; la frazione fina resta, invece, in sospensione e si espande in mare come un pennacchio torbido. Il materiale portato in soluzione in massima parte si sedimenta per precipitazione chimica.

Il profilo trasversale della spiaggia presenta normalmente una selezione granulometrica con sedimenti grossolani verso riva e sedimenti più fini al largo. La pendenza del fronte della spiaggia è correlata alle dimensioni dei sedimenti che la costituiscono e all'energia con cui le onde frangono a riva. A sedimenti più grossolani corrisponde un profilo della spiaggia più ripido; viceversa a granuli più fini corrisponde un profilo meno acclive.

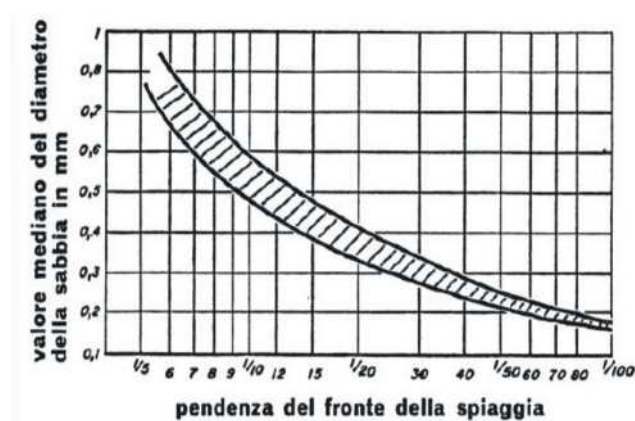
**Figura 2.1.8:** In prossimità della foce l'andamento della costa è caratterizzato da un protendimento, formato dall'accumulo del materiale detritico trasportato dal corso d'acqua.



**Figura 2.1.9:** Valori tipici di pendenze del fronte della spiaggia sono:

- 1:30 per sabbia fina,
- 1:10 sabbia grossolana,
- 1:4 ghiaia.

La linea superiore della fascia tratteggiata si riferisce a spiagge molto esposte al moto ondoso, la linea inferiore a spiagge più riparate.





## Il trasporto solido costiero

Il trasporto solido costiero può essere scomposto in due componenti di moto:

**trasporto solido trasversale,**

in direzione perpendicolare alla linea di battigia (cross-shore), dovuto principalmente alle correnti di ritorno e alle asimmetrie del campo di moto ondoso;

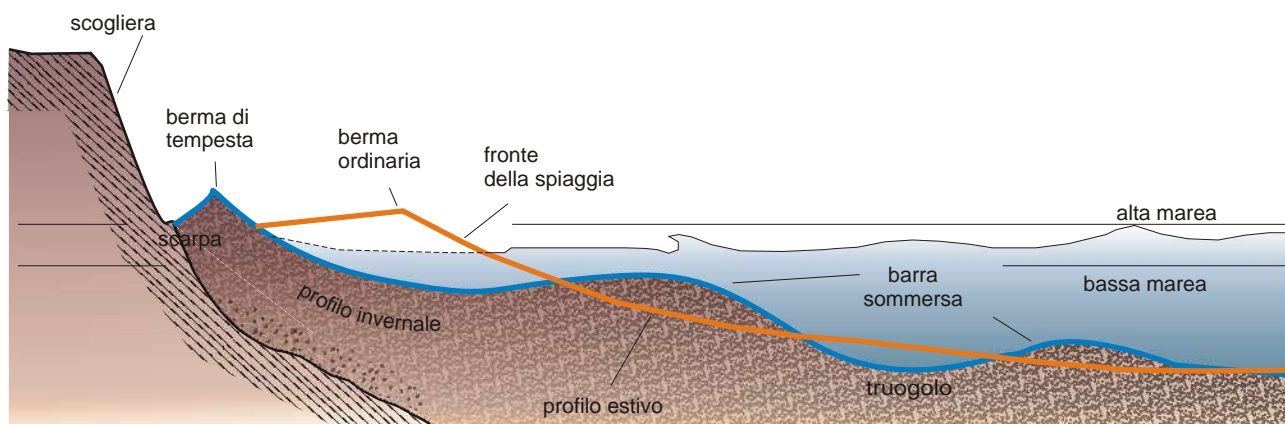
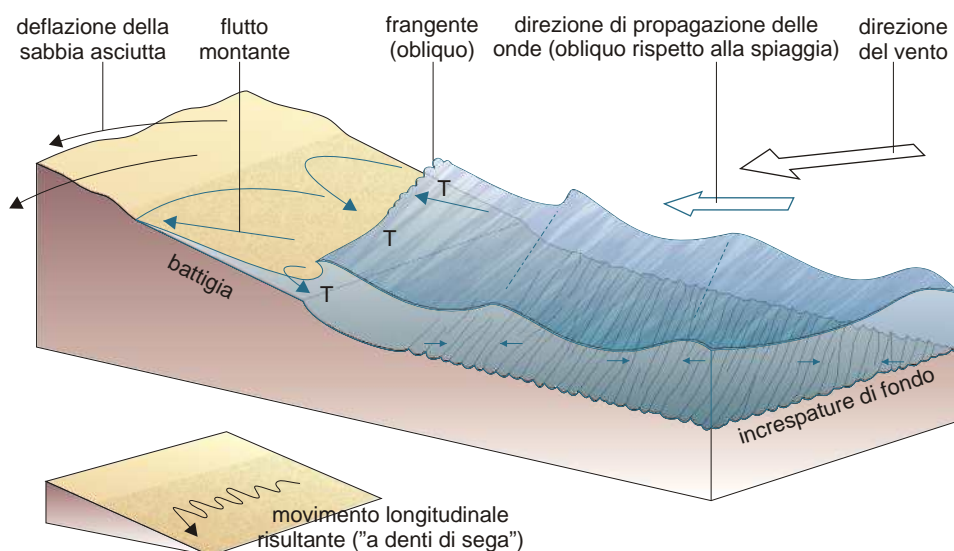
**trasporto solido longitudinale,**

in direzione parallela alla linea di battigia (long-shore), prodotto dalla corrente litoranea generata dal frangimento delle onde.

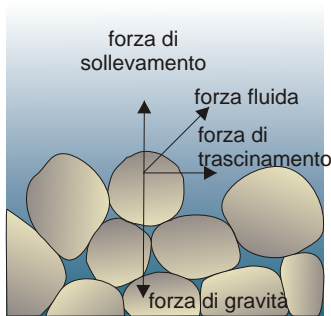
Il trasporto solido longitudinale influisce sull'evoluzione a lungo termine della morfologia costiera, mentre il trasporto solido trasversale è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine (dovuti a condizioni di mareggiata). L'arretramento del profilo della spiaggia, legato alle onde di burrasca, è piuttosto rapido e discontinuo; i processi di ricostruzione del profilo di spiaggia, indotti dall'azione continua del moto ondoso, sono invece lenti e continui.

La conformazione del profilo trasversale di una spiaggia, dipendendo dalle caratteristiche del moto ondoso, ha una variabilità stagionale. D'inverno, quando le onde sono alte e giungono a riva molto ravvicinate, la spiaggia è più stretta e ripida. D'estate, quando il moto ondoso è di minore intensità, la spiaggia è più ampia e presenta un profilo più dolce.

**Figura 2.1.10:** Le onde incidenti e il flusso di ritorno determinano una caratteristica traiettoria dei sedimenti a dente di sega lungo la battigia.



**Figura 2.1.11:** Durante le mareggiate invernali, le particelle più fini vengono asportate dalla spiaggia e trasportate al largo, dove avviene la formazione di una o più barre sommerse. Molti metri di spiaggia possono sparire a poche ore dall'inizio di una mareggiata e sono necessarie settimane o mesi per restituire alla spiaggia il materiale sottratto. D'estate la barra di fondo viene gradualmente spianata, i detriti che la compongono vengono trasportati dalle onde e depositi sulla battigia.



**Figura 2.1.12:** La forza esercitata dal fluido sulla matrice detritica di fondo è costituita da una componente che tende a sollevare il granulo e da un'altra che tende a trascinarlo. Le forze che si oppongono alla messa in movimento sono la forza di gravità e l'attrito tra i grani.

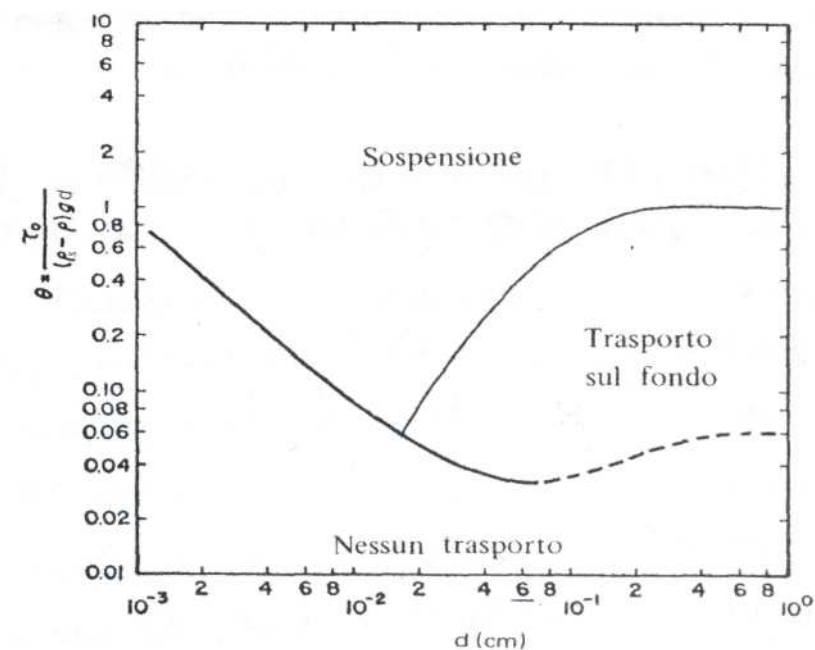
In acque basse il moto ondoso interagisce con le particelle depositate sul fondo; l'intensità del processo è funzione dell'altezza d'onda.

Il diagramma seguente (Shields & Bagnold, 1970) illustra le condizioni di movimento incipiente dei sedimenti in presenza di una corrente marina. In particolare, esso illustra la relazione tra il diametro del granulo ed il valore critico della tensione tangenziale al fondo,  $\tau_{0c}$  al di sopra del quale lo sforzo esercitato dalla corrente è in grado di mobilitare il sedimento. Tale valore è illustrato nel grafico dal parametro adimensionale:

$$\theta = \frac{\tau_{0c}}{(\rho_s - \rho) g d}$$

L'espressione adimensionale teorica della tensione tangenziale critica, in cui la tensione critica è direttamente proporzionale al diametro del granulo, è rispettata per  $d \geq 0.06$  cm (linea tratteggiata). Per dimensioni inferiori la tensione tangenziale critica che mobilita il sedimento è maggiore di quella teorica; ciò è dovuto alle forze di coesione che legano le particelle tanto maggiormente quanto minori sono le dimensioni dei granuli (limi, argille).

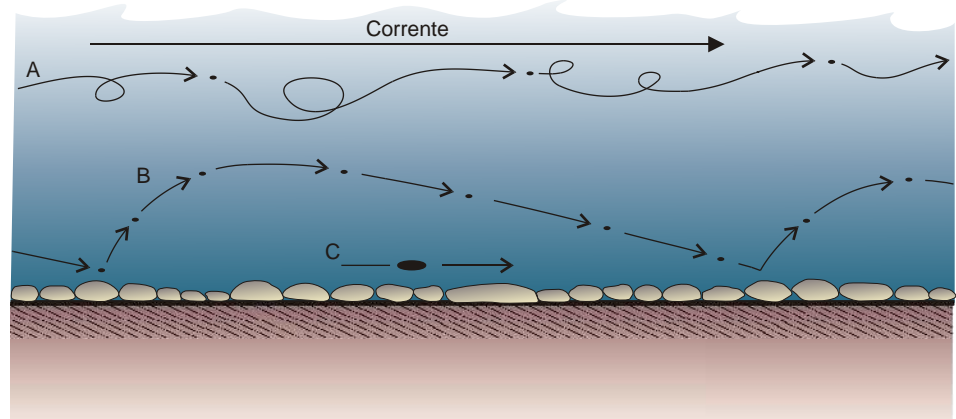
Il diagramma mostra un altro fatto importante: i granuli più piccoli ( $d \leq 0.015$  cm) una volta rimossi sono messi in sospensione e si distribuiscono su tutta la colonna d'acqua, mentre quelli più grossolani sono trasportati sul fondo e solo per tensioni tangenziali elevate possono essere portati in sospensione. Esistono quindi due gruppi di particelle in movimento: il carico sospeso e il carico di fondo.



**Figura 2.1.13:** Diagramma di A. Shields e R.A. Bagnold. F. Ricci Lucchi, Sedimentologia parte 2

**Figura 2.1.14:** Le correnti capaci di trascinare granuli sul fondo sono dette trattive. I granuli del fondo, sollevati dai moti turbolenti del fluido, possono essere trasportati secondo tre modalità: sospensione, saltellamento e rotolamento.

- Sospensione (A)
- Saltellamento (B)
- Rotolamento (C)



## Generalità

**T**ra i fattori che condizionano l'evoluzione dei litorali, quelli meteo-marini hanno senz'altro il peso maggiore, regolando la capacità erosiva del mare e il relativo trasporto dei sedimenti.

I fattori principali sono:

- **Venti**
- **Moto ondoso**
- **Correnti litoranee**
- **Maree ed variazioni del livello marino**

## Generalità

## Venti

I venti influenzano l'evoluzione del litorale sia in maniera diretta che indiretta. Essi hanno, infatti, azione diretta, erodendo le parti emerse, sollevando, trasportando ed accumulando selettivamente sedimenti leggeri a formare le dune costiere, ed azione indiretta sull'acqua del mare agendo essenzialmente come "motore" delle onde e di alcuni tipi di correnti marine.

Si definisce vento "regnante" il vento più frequente in una data località, mentre si indica con il termine di vento "dominante" quello che investe il litorale con maggior forza.

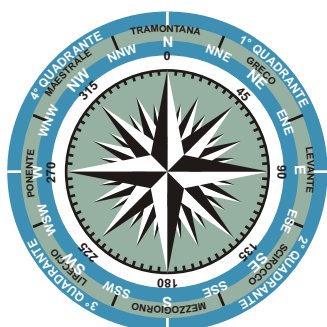
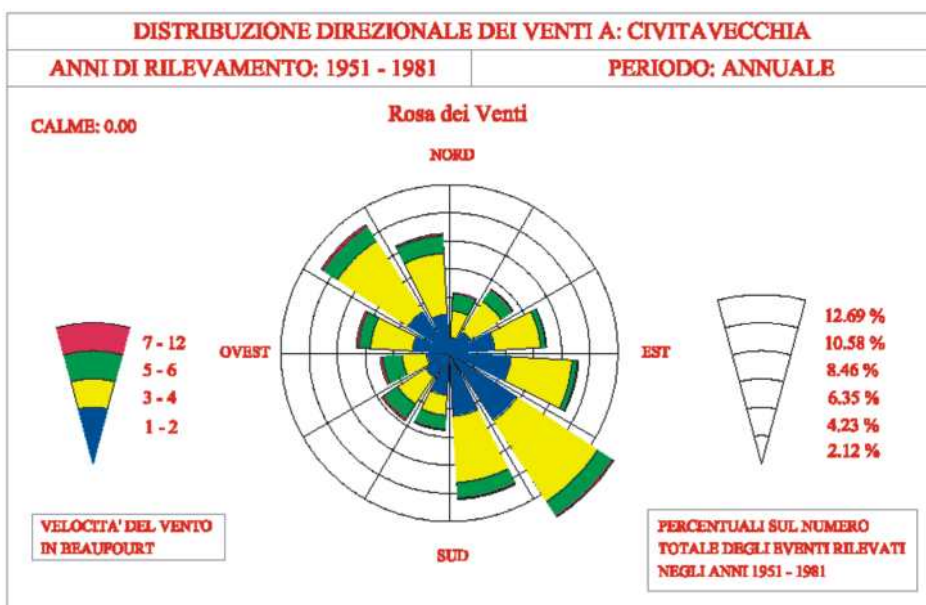


Figura 2.2.1: Rosa dei venti



**Figura 2.2.2:** Il regime dei venti in una data località costiera può essere definito mediante distribuzioni di frequenza per settori direzionali e campi di velocità, con riferimento a periodi di osservazione possibilmente pluriennali. Come dati di base per la definizione del regime del vento vanno assunti quelli forniti da stazioni anemometriche presenti nella zona in esame.

## Moto ondoso

Si definisce moto ondoso l'insieme di ondulazioni originate dal vento, che si propagano sulla superficie del mare.

I principali parametri utilizzati per la caratterizzazione delle singole onde, sono:

cresta	punto più alto del profilo dell'onda,
cavo	punto più basso del profilo dell'onda,
altezza	distanza verticale dal cavo alla cresta,
ampiezza	metà dell'altezza dell'onda,
lunghezza d'onda	distanza orizzontale tra due creste o due cavi consecutivi,
ripidità	rapporto tra altezza e lunghezza d'onda,
periodo	tempo che intercorre fra il passaggio di due creste successive per un punto fisso,
celerità di fase	rapporto tra lunghezza e periodo d'onda.

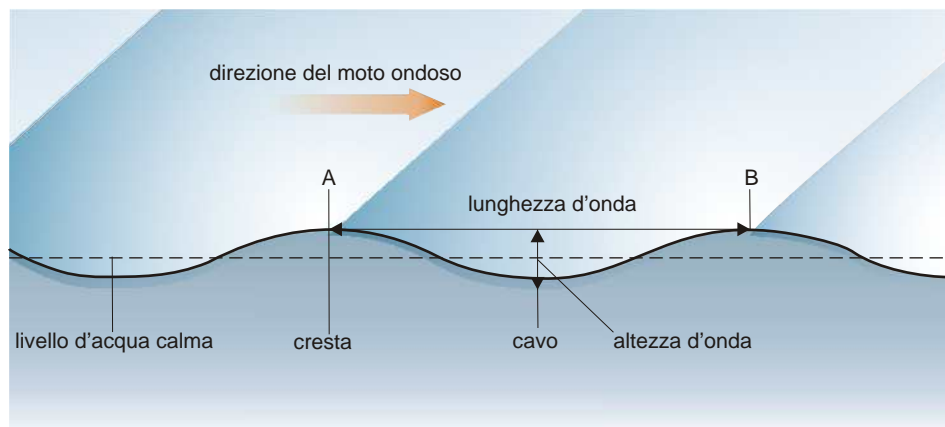
Il moto ondoso in natura, si presenta come una successione di onde le cui caratteristiche sono rappresentabili attraverso grandezze parametriche, quali:

$H_s$	Altezza d'onda significativa (media di 1/3 delle onde più alte),
$H_{mo}$	Altezza d'onda significativa spettrale,
$T_s$	Periodo significativo (media del periodo di 1/3 delle onde più alte),
$T_p$	Periodo di picco,
$T_m$	Periodo medio,
$D_m$	Direzione media di provenienza.

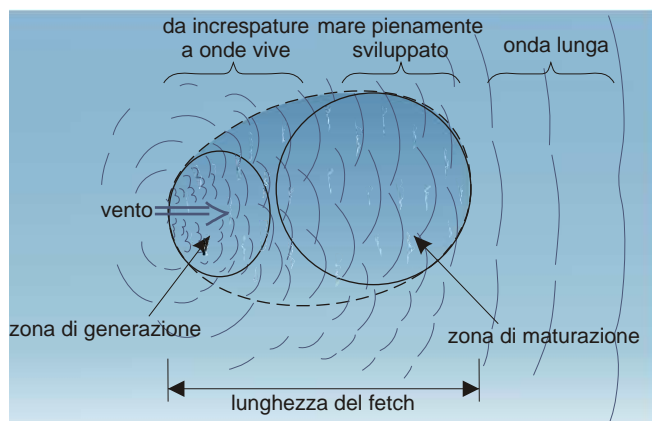
Le dimensioni delle onde generate dal vento dipendono principalmente dai seguenti fattori: velocità del vento; durata del vento e lunghezza del fetch.

Si dà il nome di fetch all'estensione longitudinale del tratto di mare su cui il vento, spirando per una certa durata in direzione costante, genera il moto ondoso. Quando non subiscono più l'azione dei venti che le hanno generate, le onde si propagano verso la costa sotto forma di treni d'onde lunghe (onde di mare "morto")

**Figura 2.2.3:** Principali parametri del moto ondoso.



**Figura 2.2.4:** Nella zona di generazione le onde si mantengono di modeste dimensioni. Nella zona di maturazione le onde sono completamente sviluppate e possono raggiungere le massime dimensioni compatibili con il vento che le ha sollevate in termini di velocità e durata.



**Figura 2.2.5:** I treni d'onde lunghe sono caratterizzati, in generale da una ridotta altezza rispetto alla lunghezza d'onda.



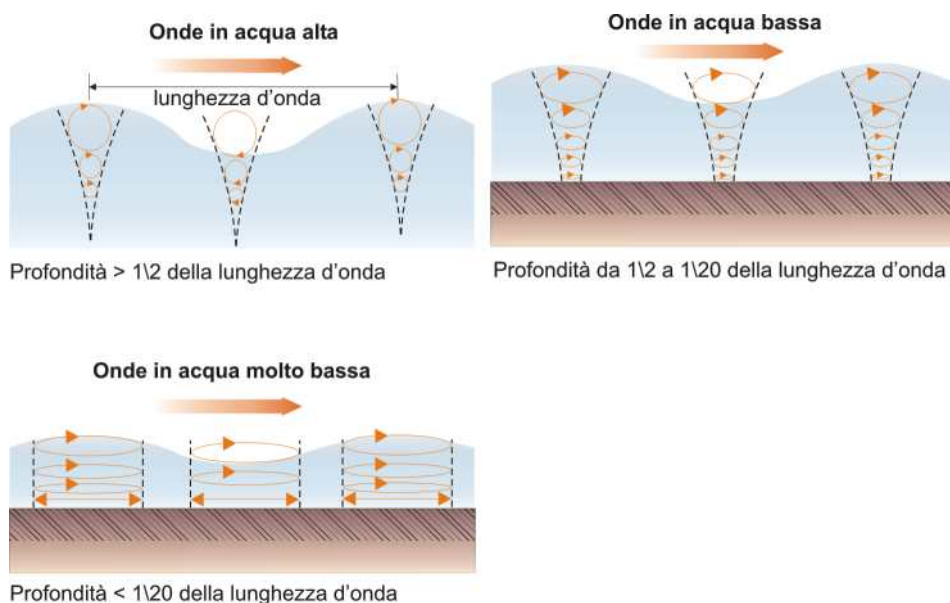
Per quanto riguarda i parametri più caratteristici di un'onda, nel Mediterraneo i valori usuali sono compresi entro i seguenti intervalli: lunghezza massima tra qualche decina e 100-200 m; altezza massima di qualche metro, quasi mai superiore a 20 m; periodo tra 3 e 30 secondi a seconda delle condizioni del mare.

Il comportamento dell'onda dipende dalla relazione tra le dimensioni lineari dell'onda e la profondità dell'acqua in cui si muove.

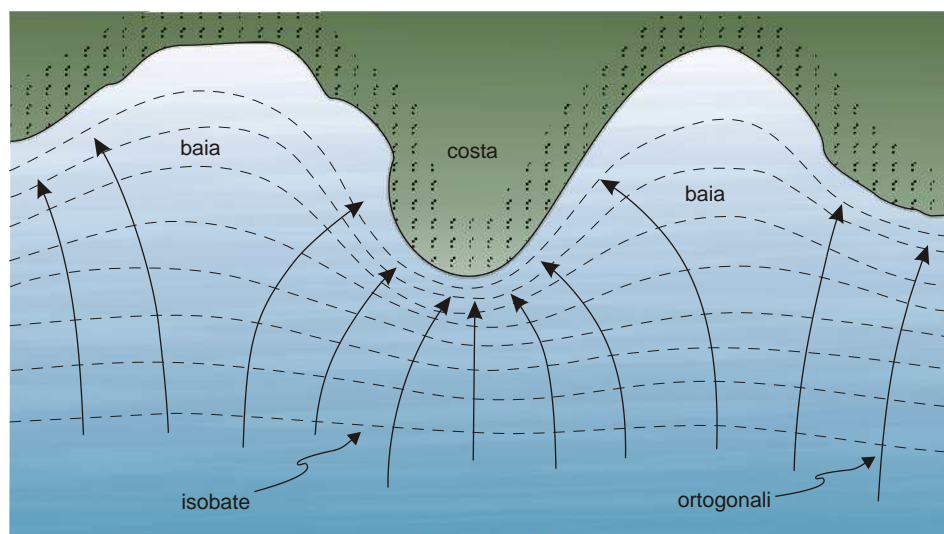
Si parla di “onde di acqua alta” quando il rapporto tra la profondità e la lunghezza d'onda è maggiore di  $1/2$ , di “onde di profondità intermedia” quando tale rapporto è compreso tra  $1/2$  e  $1/20$  e, infine, di “onde di acqua bassa” quando esso è inferiore a  $1/20$ .

Quando un'onda si propaga da largo verso riva su fondali acclivi, le sue caratteristiche si modificano per effetto del fenomeno della rifrazione. La rifrazione è dovuta al fatto che la celerità di propagazione si riduce al diminuire della profondità. Pertanto, un fronte d'onda può avere, nello stesso istante, tratti che procedono a velocità diverse; la parte che si trova su fondali meno profondi viene rallentata, mentre quella su acque più profonde conserva la celerità originaria. Per questo motivo, il fronte d'onda tende a ruotare ed a disporsi parallelamente alle isobate. A tale fenomeno si accompagnano modificazioni dell'altezza d'onda per effetto del principio di conservazione del flusso di energia.

**Figura 2.2.6:** In acqua alta le particelle di fluido si muovono con orbite approssimativamente circolari, di dimensioni decrescenti con la profondità. Avvicinandosi alla costa le orbite descritte dalle particelle d'acqua assumono forma ellittica. In acque basse le ellissi tendono a schiacciarsi sempre di più e il moto delle particelle d'acqua diventa traslatorio.



**Figura 2.2.7:** La spaziatura delle ortogonali d'onda (normali alle linee di cresta) è indicativa della distribuzione dell'energia del moto ondoso in prossimità della costa. Le ortogonali d'onda verso un promontorio si avvicinano tra loro, indicando una concentrazione di energia sulla costa. Verso la baia si allontanano e l'impatto delle onde risulta attenuato. Il risultato di questa distribuzione di energia è la tendenza del moto ondoso a regolarizzare le coste smantellando i promontori e colmando le insenature.

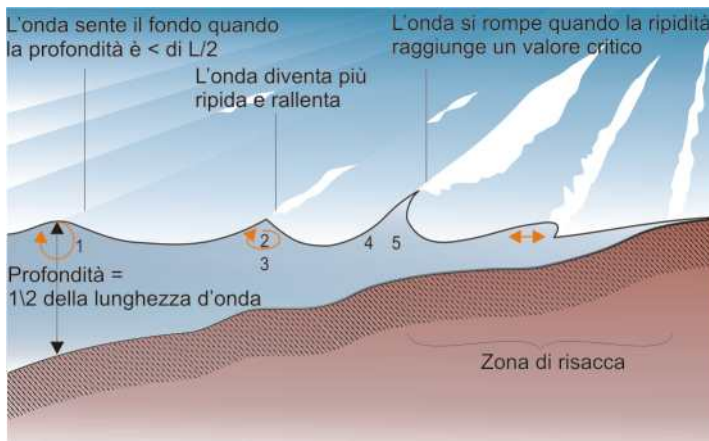


Nonostante il fenomeno della rifrazione, l'angolo di incidenza della cresta delle onde rispetto alla linea di battigia generalmente non è nullo e dà origine a una componente longitudinale della corrente.

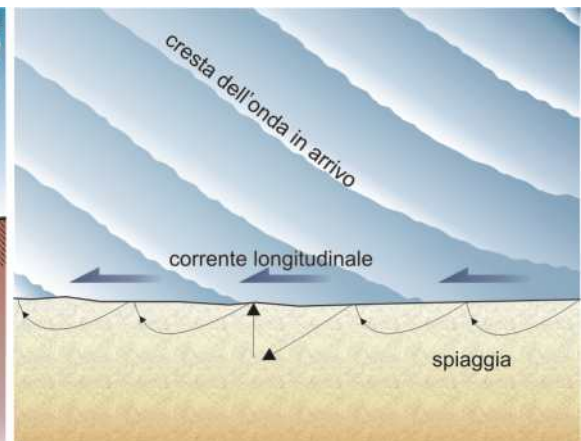
Il moto ondoso, propagandosi su fondali di profondità decrescente, subisce una sostanziale trasformazione. Quando la ripidità dell'onda (rapporto fra l'altezza e la lunghezza) raggiunge un valore critico, l'onda diventa instabile e ha luogo il frangimento.

Le tre forme fondamentali che possono assumere le onde frangenti sono:

- frangente tipo spilling;
- frangente tipo plunging;
- frangente tipo surging.



**Figura 2.2.8:** In prossimità della battigia l'altezza dell'onda aumenta e le creste diventano più ravvicinate.



**Figura 2.2.9:** Corrente lungoriva

**Figura 2.2.10:** Tre tipologie di frangente (da Dean & Dalrymple). Nel frangente tipo spilling la rottura dell'onda avviene gradualmente: la cresta si rovescia in avanti formando una massa d'acqua bianca e spumeggiante. Si manifesta in corrispondenza di deboli pendenze del fondo, con zona di frangimento estesa a diverse lunghezze d'onda. Nel frangente tipo plunging la rottura è brusca e si manifesta con distacco della cresta; la liberazione dell'energia dell'onda è violenta. Si verifica per pendenza del fondo più elevata. La zona di frangimento è ridotta. Su spiagge con pendenza molto elevata il tipo prevalente è il surging, con zona di frangimento stretta o quasi inesistente.

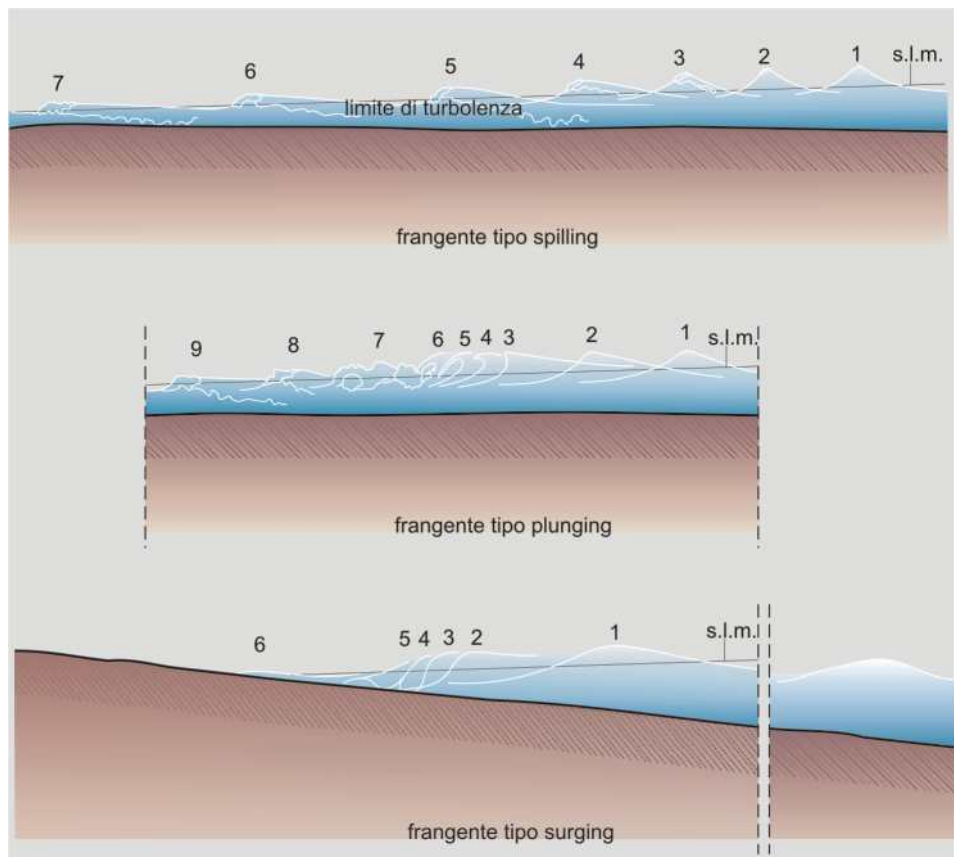






Figura 2.2.11: Frangente tipo plunging.



Figura 2.2.12: Flusso montante e flusso di ritorno verso il largo.

Nel momento in cui i frangenti si riversano sulla spiaggia risalgono la battigia con una sottile lama d'acqua. Appena l'energia si esaurisce, l'acqua in parte si infiltra tra i granuli e rifluisce verso mare, in parte scivola indietro per gravità lungo il pendio sotto forma di risacca.

L'esposizione del litorale al moto ondoso assume un ruolo primario nella dinamica dei sedimenti costieri. Il moto ondoso, forzante principale che modella le linee di costa, è oggetto di studi di dettaglio. Ciò può essere fatto attraverso la messa in opera di appositi strumenti di misura:

Figura 2.2.13: Boa ondametrica.



**boe ondametriche direzionali  
sensori di pressione accoppiati a correntometri direzionali  
strumenti radar, ecc.**

In Italia l'APAT gestisce la "rete ondametrica nazionale" (RON) costituita da 14 ondametri direzionali localizzati al largo delle coste italiane, che coprono più di 17 anni di osservazione continua, con ricadute di enorme importanza sulla gestione delle coste e sulla progettazione delle opere marittime. Inoltre dal 1998 è stata ristrutturata e potenziata la "Rete Mareografica Nazionale", costituita da 26 stazioni, ciascuna corredata da una centralina che rileva la velocità del vento, la temperatura dell'aria e del mare, la pressione atmosferica a livello del mare. Numerose sono ormai anche le esperienze regionali, come ad esempio in Calabria, Abruzzo e Toscana.

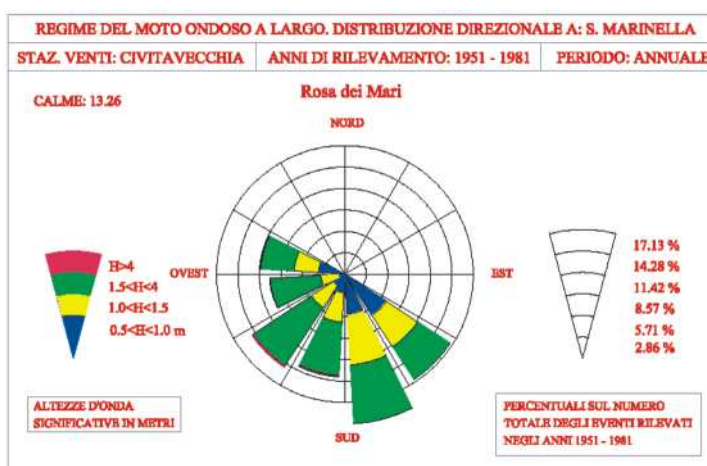


Figura 2.2.14: Il regime del moto ondoso può essere definito mediante la distribuzione di frequenza per settori direzionali e campi di altezza e periodo d'onda.

Figura 2.2.15: Posizione degli ondametri APAT nei mari italiani.

## Correnti marine

Le correnti marine sono flussi d'acqua, animati da un moto pressoché continuo secondo una direzione prevalente. Possono essere schematicamente suddivise nelle seguenti tipologie:

*Correnti indotte dal moto ondoso:* interessano sia la zona dei frangenti sia la fascia esterna, rivestendo una grande importanza per la dinamica della spiaggia ed il trasporto dei sedimenti;

*Correnti di marea:* hanno importanza nei paraggi interessati da forti escursioni di marea, in particolare quando l'effetto dell'oscillazione di lungo periodo è accentuato da particolari condizioni geometriche dei fondali e delle coste;

*Correnti generate dal vento:* sono l'effetto delle tensioni tangenziali esercitate dal vento sugli strati superficiali del mare;

*Correnti di densità:* sono generate dalla differenza di temperatura e salinità delle masse di acqua.

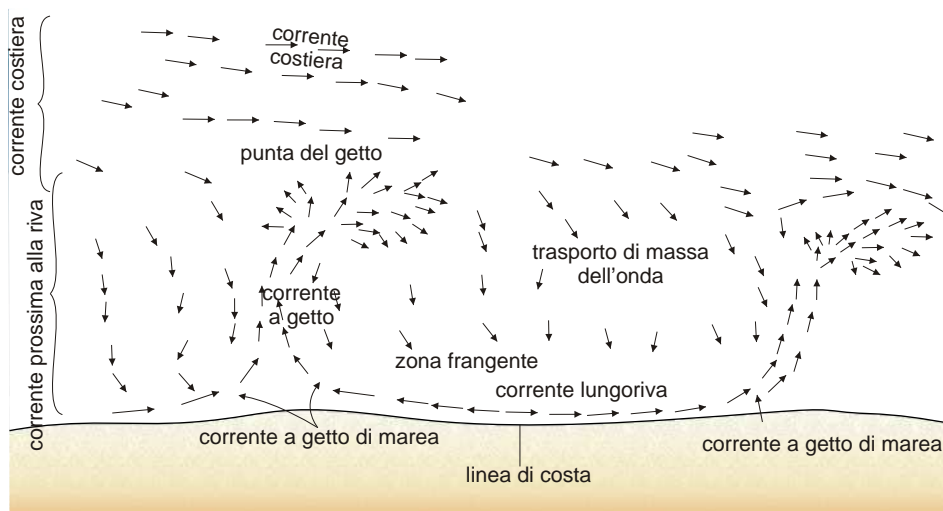
**Figura 2.2.16:** Circolazione delle correnti nel Mediterraneo.



Dal punto di vista qualitativo, il generale sistema direzionale delle correnti può essere messo in evidenza dalla torbidità, da oggetti galleggianti appositamente lanciati, dalla configurazione delle linee di frangimento e dalle caratteristiche morfologiche della fascia costiera. Per una valutazione quantitativa si procede a misure correntometriche nella zona esterna alla fascia dei frangenti e al lancio di galleggianti o traccianti nella zona interna.

**Figura 2.2.17:** Modello di circolazione nella zona vicina alla spiaggia (celle di circolazione litorale):

- le correnti costiere fluiscono approssimativamente in direzione parallela alla spiaggia nella zona al largo dei frangenti;
- in prossimità della riva si sovrappongono il movimento delle onde incidenti verso la spiaggia, la corrente lungoriva, il flusso di ritorno verso il largo (correnti a getto o rip currents), il movimento di espansione lungoriva della testa della corrente a getto.



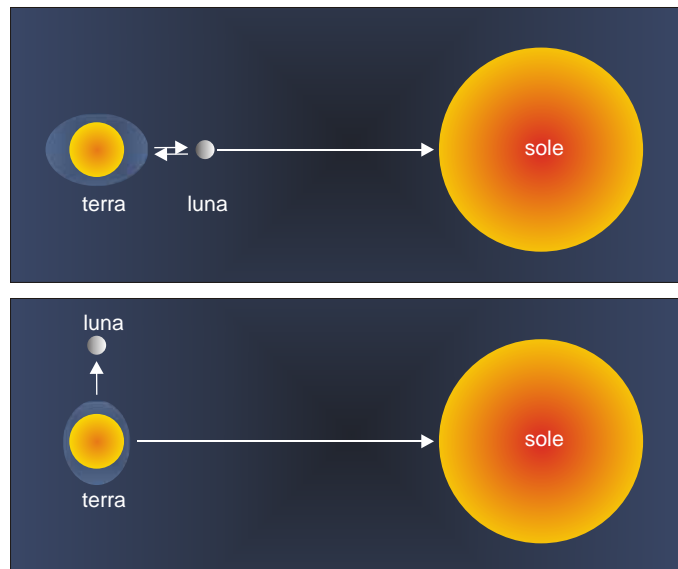
## Maree e variazioni del livello marino

Le maree sono oscillazioni del livello marino, legate a cause astronomiche o meteorologiche. Le maree astronomiche sono dovute all'attrazione gravitazionale degli astri (Sole e Luna) sulla superficie marina, mentre le maree meteorologiche sono dovute a distribuzioni non uniformi della pressione atmosferica sulla superficie marina e all'azione del vento. Il livello marino si innalza durante il periodo di flusso (marea montante) e si abbassa durante il riflusso (marea discendente). Per quanto riguarda le maree astronomiche, durante la giornata si susseguono uno o due periodi di elevamento delle acque, detti di alta marea, e uno o due di abbassamento, detti di bassa marea.

Il dislivello tra un'alta e una bassa marea consecutive è l'escursione della marea. Dal punto di vista fenomenologico, l'escursione di marea astronomica risulta notevolmente più alta di quella dovuta a fenomeni atmosferici. Quando l'escursione di marea è sensibile, la variazione del livello marino determina lo spostamento periodico della zona dei frangenti e quindi della fascia costiera su cui si risentono gli effetti del moto ondoso. L'escursione di marea è influenzata dalla geometria della costa; in particolare all'interno di baie, estuari e lagune il fenomeno viene esaltato (es. Adriatico settentrionale). Ulteriori fenomeni che contribuiscono alle variazioni del livello del mare sono l'azione della pressione atmosferica, del vento (wind setup) e del moto ondoso sotto costa (wave setup).

Si definisce livello medio del mare di un luogo, la media dei livelli marini nel periodo di misura riferita a un piano convenzionale. Oltre che dai fattori idrodinamici, il livello del mare è influenzato da due principali elementi a lungo termine: il clima (radiazione solare e temperatura atmosferica) e la geodinamica (cambiamenti del campo magnetico, moti convettivi nell'interno terrestre, movimenti tettonici). La scala temporale dei cambiamenti climatici, in grado di influenzare il livello del mare in modo significativo, è dell'ordine delle migliaia e decine di migliaia di anni, quella degli eventi geodinamici varia dalle migliaia ai milioni di anni.

**Figura 2.2.18:** Le maree legate all'azione del sole amplificano o smorzano l'effetto delle maree lunari. Quando si ha luna nuova o luna piena (sole e luna allineati o in congiunzione) l'influenza dei due astri si somma: si hanno così le maggiori escursioni di marea (maree sizigiali). Quando la luna è nel primo e nell'ultimo quarto (sole e luna in opposizione ovvero disposti ad angolo retto) l'influenza dei due astri si contrasta: si hanno le minori escursioni di marea (Maree in quadratura).



**Figura 2.2.19:** Mt. St. Michel (Francia).



## Generalità

**L**o studio della tendenza evolutiva di un litorale viene svolto considerando, per ogni unità fisiografica individuata, il bilancio costiero, riferito ad un periodo di tempo sufficientemente lungo.

Si definisce unità fisiografica un tratto di costa lungo il quale i sedimenti vengono trasportati rimanendo confinati all'interno dei limiti estremi dell'unità; lungo tali limiti, quindi, gli scambi tra unità fisiografiche adiacenti sono da considerarsi nulli. Il bilancio dei sedimenti può essere applicato anche ad aree di controllo facenti parte di una unità fisiografica e fornisce utili indicazioni sullo stato e sul prevedibile futuro del litorale stesso, ponendo soprattutto in evidenza l'importanza relativa delle voci di bilancio attive e passive.

## Apporti di sedimenti

Gli *apporti da terra* sono forniti dai corsi d'acqua e/o trasportati dal vento che manifesta la sua azione erosiva su promontori, falesie e dune di retrospiaggia.

Gli *apporti da mare* sono convogliati verso riva dalle correnti trasversali e dagli apporti bioclastici.

## Asporti di sedimenti

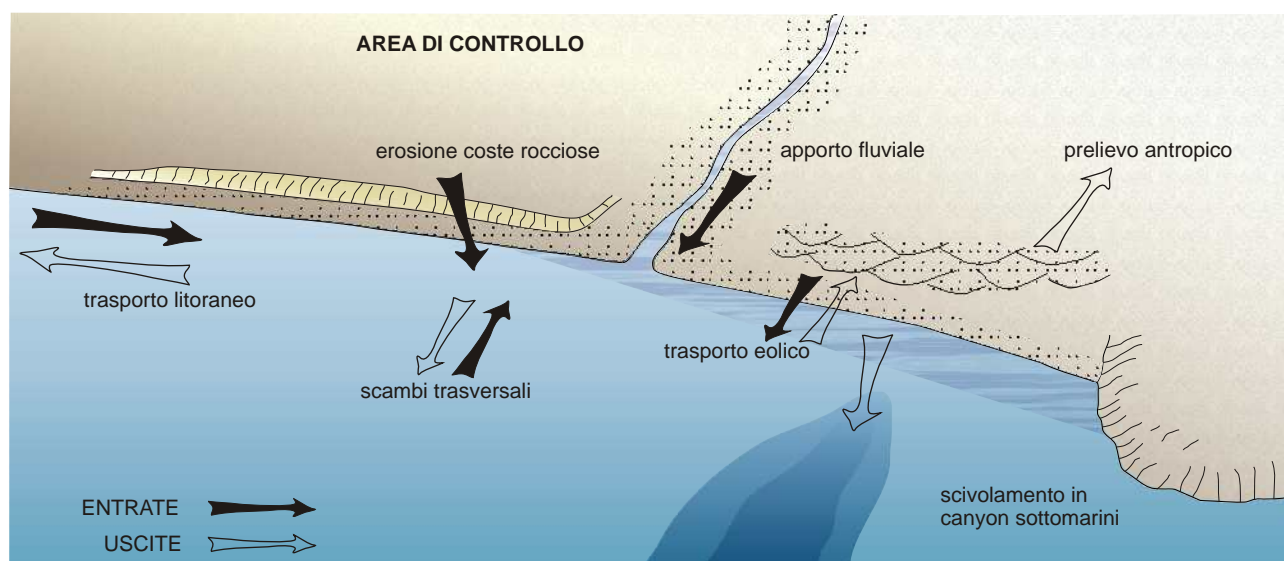
Gli *asporti verso terra* sono dovuti all'azione erosiva dei venti e delle onde oltre le linee di possibile ritorno o in specchi acquei interni.

Gli *asporti verso mare* sono generati dal trasporto dei sedimenti più fini che si disperdono al largo in correnti di ritorno o in solcature sottomarine (canyons).

Gli *asporti verso bacini interni* sono dovuti al trasporto di materiale verso le bocche portuali e lagunari.

**Figura 2.3.1:** Schema degli apporti e asporti dei sedimenti per una determinata area costiera di controllo.

Si dice che una spiaggia è in equilibrio se la posizione della battigia si mantiene costante nel tempo, sia pure attraverso le oscillazioni stagionali; il bilancio è in pareggio se gli allontanamenti di materiale equivalgono agli apporti. La spiaggia è instabile se predomina la tendenza erosiva o di accrescimento.





## Cap. 3.0 LA PROGETTAZIONE DELLE OPERE COSTIERE

### Generalità

**S**i è più volte evidenziato che fenomeni erosivi a lungo termine ( $>$  di 25 m negli ultimi 50 anni) interessano circa il 24% delle coste basse italiane (ca. 1200 km su un totale di 4800 km). Il fenomeno dell'arretramento delle coste basse è una realtà che riguarda non solo l'Italia, ma gran parte dei paesi industrializzati ed inizia a rappresentare un problema anche in quelli in via di sviluppo. Nell'area mediterranea questo problema ha un significato particolare, dato l'elevato pregio ambientale delle spiagge. Ciò le rende importanti anche da un punto di vista economico, costituendo una delle principali fonti di attrazione per il turismo. In tale contesto, è importante effettuare una corretta progettazione di opere di difesa costiera, nonché valutare gli effetti prodotti dalla realizzazione di nuove strutture sul litorale e sul paesaggio.

Un progetto valido, dopo aver definito l'unità fisiografica d'intervento, dovrebbe dichiarare esplicitamente l'obiettivo che vuole raggiungere e la filosofia adottata per perseguirlo; dovrebbe inoltre contenere la definizione esatta e completa delle opere da eseguire, dei materiali da adoperare, le modalità costruttive e le tolleranze ammissibili, lo studio di più varianti esaminate e confrontate sia dal punto di vista tecnico che economico. Esso necessiterebbe inoltre di un'analisi approfondita delle condizioni naturali ed ambientali nelle quali il lavoro dovrà svolgersi, del risultato di indagini geologiche e geotecniche, al fine di limitare le incertezze al momento dell'ideazione dell'intervento, di un programma temporale dei lavori dal quale emergano i punti critici, ai quali bisogna prestare la maggiore attenzione per evitare inutili ritardi al completamento dell'intervento.

Le progettazioni marittime necessitano di approfondimenti molto spinti, in quanto intervengono su di un ambiente ad equilibrio fortemente dinamico, dove le conseguenze possono ripercuotersi in una zona sensibilmente più estesa di quella direttamente interessata dall'opera ipotizzata.

Negli ultimi anni, sulla base di esperienze non tutte positive, è maturata una nuova maniera di affrontare i problemi relativi alla progettazione di un intervento di ingegneria costiera, con la necessità inderogabile di provvedere in via preventiva a corredare gli studi con prove su modelli, sia fisici che matematici, che hanno raggiunto ormai un elevato livello di attendibilità.

La progettazione e la costruzione di opere costiere devono comprendere un'adeguata valutazione del moto ondoso e dei processi idrodinamici nella fascia litoranea, degli aspetti geotecnici, della definizione degli aspetti geoidrologici (natura, giacitura e resistenza dei corpi geolitologici, presenza e caratteristiche delle falde acquifere) e delle procedure di costruzione.

E' necessario tener presente che l'esecuzione di studi preliminari adeguati, nonostante gli oneri, consente una riduzione complessiva dei costi. Il primo passo dell'iter progettuale è l'individuazione delle necessità del progetto, che scaturisce dai risultati dei relativi studi socio-economici, da un'analisi costi-benefici ottenibili dalla realizzazione del progetto e dall'applicazione delle metodologie dell'ingegneria finanziaria.

L'acquisizione dei dati di base avviene nei quattro settori principali: morfologico, meteomarinario, territoriale ed ambientale.

La progettazione delle opere si articola, in sequenza, sui seguenti temi fondamentali:

- Studi propedeutici
- Indagini propedeutiche
- Modellazione
- Scelta delle tipologie di intervento
- Stima dei costi di realizzazione comprensivi della gestione in relazione al piano di monitoraggio e manutenzione



### Generalità

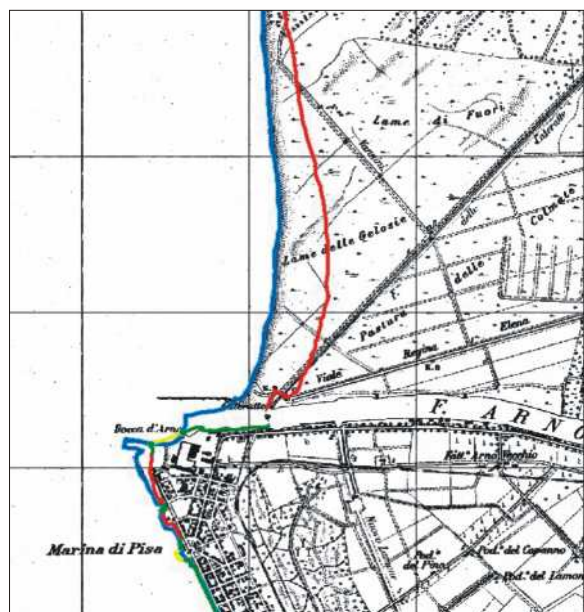
**G**li studi dovranno coinvolgere necessariamente l'intera unità fisiografica nella quale ricade il tratto oggetto degli interventi di difesa mirando a stabilire le linee essenziali di tendenza evolutiva. Sulla base dell'evoluzione del litorale, dedotta a partire da una indagine storica dei processi naturali e degli effetti provocati da interventi operati sul litorale stesso, dovrà formularsi una previsione sull'evoluzione futura della spiaggia. A tal fine andranno svolte specifiche indagini sulla linea di riva, sulla topografia della spiaggia emersa e sommersa, nonché sui sedimenti di cui è costituita. L'andamento della linea di riva dovrà essere confermato e sostenuto dai risultati di opportuni modelli matematici.

L'inquadramento del paraggio e del settore di traversia rappresentano il primo passo dell'indagine volta ad individuare la presenza di tendenze evolutive di un tratto di litorale e a raccogliere le informazioni di base necessarie all'analisi.

A tale scopo, sembra indispensabile la raccolta di dati, estesa ad un numero di anni sufficientemente lungo, riguardanti i parametri ambientali e fisici (regime dei venti, regime del moto ondoso, livelli marini, apporti solidi fluviali, evoluzione storica della linea di costa), e le eventuali interferenze con il trasporto solido litoraneo di opere fluviali, opere di difesa costiera, porti.

Per individuare il clima ondoso del paraggio è necessaria, preliminarmente, la determinazione del "settore di traversia" e delle "aree di formazione delle onde" (fetches) ricadenti nel suddetto settore.

Un parametro morfologico importante è costituito dalle variazioni storiche subite dalla linea di riva, che consentono di effettuare numerose analisi mirate a definire le naturali tendenze evolutive di un litorale; è possibile in tal modo individuare le zone soggette a fenomeni erosivi o accrescitivi locali dovuti alla realizzazione di opere litoranee, calibrare modelli numerici di evoluzione della linea di riva, stimare il bilancio solido della fascia costiera, ecc. Queste variazioni possono essere dedotte da un esame comparativo dei rilievi cartografici e/o delle fotografie aeree eseguite in tempi successivi. Ovviamente in questa fase vanno eseguite le ipotesi sulle cause che hanno determinato l'evoluzione del litorale all'interno dell'unità fisiografica considerata.



**Figura 3.1.1:** La sovrapposizione dei profili del litorale toscano in prossimità della foce del Fiume Arno rilevati negli anni '50 (carta IGM, scala 1:25.000, anno 1950) e nel 1998 (ortofoto VOLOIT2000) mostra la tendenza all'arretramento della linea di riva.

## Generalità

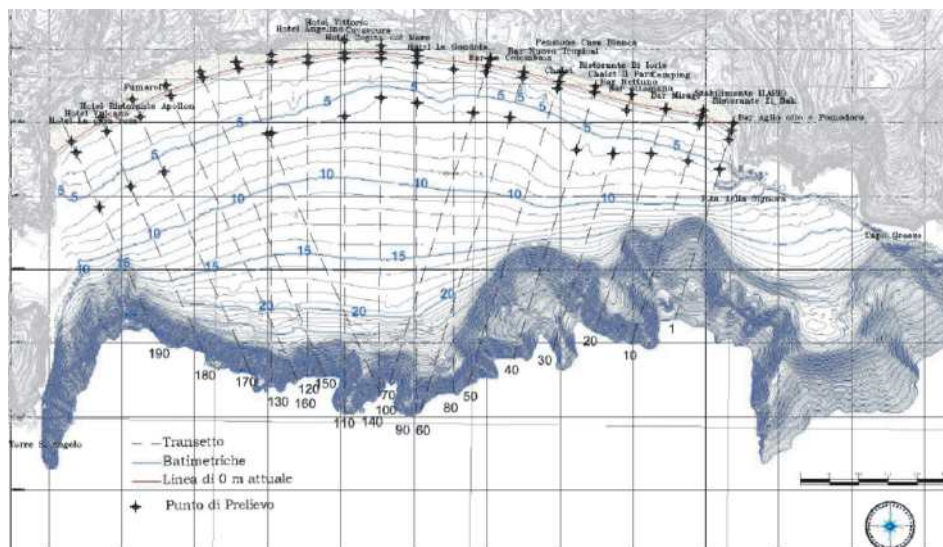
## Rilievi topografici e batimetrici

**L**o studio della morfologia delle spiagge è importante per la conoscenza dei fenomeni connessi alla dinamica dei sedimenti lungo costa, per la valutazione delle eventuali modificazioni indotte dalle opere, sia nello spazio che nel tempo, per fornire dati necessari all'impiego dei modelli fisici e matematici.

I rilievi topografici e batimetrici sono eseguiti di norma secondo direttrici trasversali e parallele alla linea di riva e devono riguardare sia la spiaggia sommersa che la spiaggia emersa (spiaggia attiva). I limiti del rilievo sono rappresentati normalmente dalla duna o dalla prima struttura rigida per la spiaggia emersa e la profondità di chiusura del trasporto solido (generalmente compresa tra 6,0 e 10,0) per quella sommersa. L'interasse tra le direttrici di rilievo deve essere infittito nelle zone di maggiore interesse (es. aree sede degli interventi di difesa o di opere preesistenti), su fondali più bassi e dove sono presenti particolari situazioni evolutive.

Va ricordato che il periodo dell'anno in cui si effettuano le rilevazioni topo-batimetriche riveste una particolare importanza ai fini dell'individuazione del profilo trasversale della spiaggia; infatti, nella stagione invernale il fondale della spiaggia sommersa avrà una pendenza maggiore per poi addolcirsi nella stagione estiva.

**Figura 3.2.1:** Spiaggia dei Maronti (Isola di Ischia), da Modimar-s.r.l., Roma. Nella figura sono riportati i rilievi topografici della linea di riva (linea rossa), i rilievi batimetrici con le tracce delle rotte eseguite dal natante (linee tratteggiate) e l'ubicazione dei punti di prelievo dei campioni.



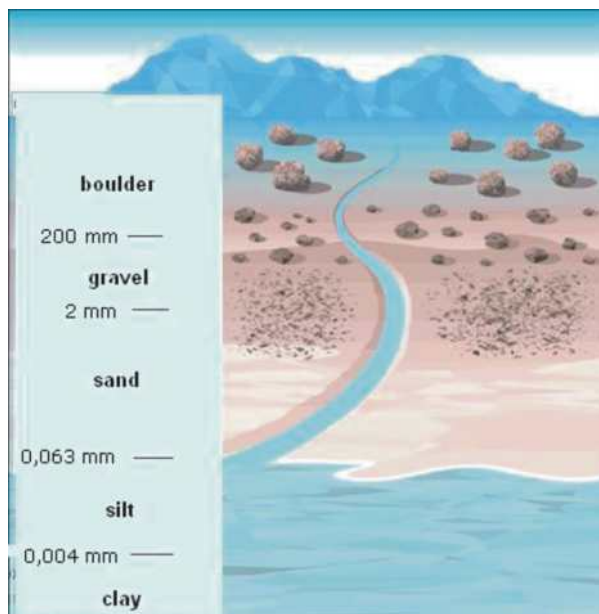
Il moto ondoso e le variazioni del livello medio mare costituiscono le principali forzanti idrodinamiche che controllano il movimento dei sedimenti lungo le coste. Le variazioni stagionali del clima ondoso causano variazioni cicliche della posizione della linea di riva. Tali spostamenti annuali non sono eccessivamente pericolosi ai fini dell'erosione del litorale, poiché i sedimenti che vengono asportati dal moto ondoso incidente durante le mareggiate in tempi brevi, sono generalmente ridistribuiti in tempi più lunghi, in condizioni di moto ordinario. Le correnti longitudinali generate dal moto ondoso frangente possono invece causare il movimento di ingenti quantità di sedimenti lungo le coste, e rappresentare un fattore decisivo nella dinamica del litorale.

Le caratteristiche del moto ondoso devono essere rilevate utilizzando strumenti direzionali in grado di misurare la direzione di propagazione delle onde: le misure devono essere eseguite al largo, su fondali con profondità superiori almeno ai 40-50 m ove possibile, e devono essere acquisite con continuità. Anche le misure mareografiche vanno eseguite con continuità, preferibilmente all'interno dei porti o in zone naturalmente riparate dal moto ondoso incidente. In ultimo, devono essere determinate accuratamente le condizioni al contorno (es. variazione negli anni dello zero di riferimento, problematiche di risonanza portuale all'interno degli specchi d'acqua, etc.) dei siti dove sono collocati gli strumenti di misura.

## Prelievo di campioni

Durante l'esecuzione dei rilievi topografici e batimetrici si preleva dalla spiaggia attiva una serie di campioni superficiali di fondo e di battigia, allo scopo di determinare, attraverso l'analisi granulometrica, la distribuzione dei sedimenti e i principali parametri ed indici sedimentologici. I campioni sono prelevati lungo direttrici perpendicolari alla linea di riva, preferibilmente in corrispondenza di variazioni morfologiche o tessiturali, così da risultare rappresentativi della zona campionata: in generale, in corrispondenza della duna costiera (+ 1,0 m.l.m.), sulla battigia (0,0 m.l.m.) ed alle profondità di 3,0, 5,0 e 10,0 m.l.m.. In funzione della granulometria, i sedimenti vengono classificati secondo la scala Udden-Wentworth o Krumbein.

**Figura 3.2.2:** Scala di Wentworth (1922).



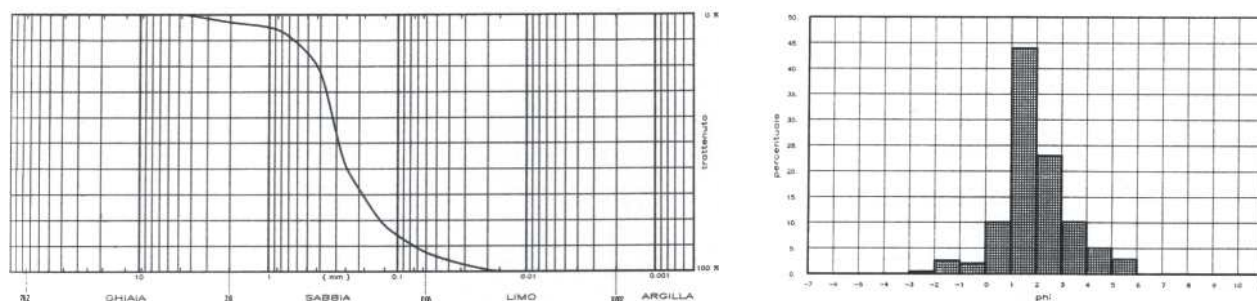
Di seguito sono descritti i parametri caratteristici ed i relativi significati sedimentologici:

La media, espressa in unità  $-\log_2 d$  (dove  $d$  = diametro espresso in mm), rappresenta un valore di tendenza centrale, "il centro di gravità" della distribuzione e pertanto risulta influenzato dal peso dei granuli più grandi;

La deviazione standard o "*sorting*" è una misura del grado di classazione. Un valore di sorting molto basso è indicativo di un sedimento estremamente classato, mentre valori elevati sono relativi a distribuzioni granulometriche molto assortite.

Lo "*skewness*" o asimmetria è un parametro indipendente dal classamento ed è significativo del livello di energia dell'ambiente. Il suo campo di variazione è tra +1 e -1. Valori di  $Sk=0$  sono relativi a curve perfettamente simmetriche. Valori negativi di  $Sk$  sono caratteristici di zone aventi un elevato contenuto energetico (zone in erosione), mentre nelle zone deposizionali si evidenzieranno valori di  $Sk$  positivi.

Il "*kurtosis*" o appuntimento misura la regolarità della distribuzione e deriva dal confronto del classamento della parte centrale con quello delle parti estreme. Perciò curve di distribuzione normale presentano  $Kg=1$ , mentre a valori di  $Kg$  maggiori corrispondono curve aventi un picco centrale accentuato. Le curve aventi invece più classata la zona centrale che quelle estreme presentano un  $Kg<1$ .



G %	S %	L %	A %	D <sub>50</sub>	Mz	O	Sk	kg
3	89.5	7.5	0	.2852	2.01	1.21	.24	1.47

**Figura 3.2.3:** Curva cumulativa e istogramma di frequenza granulometrica utilizzati per graficare e determinare a partire dai percentili i parametri statistici sedimentologici (Mz, o, sk, kg, ecc....) (Del Gizzo M., 1992).

### Generalità

**P**er lo studio dei processi idrodinamici e della dinamica dei sedimenti vengono utilizzati:

- Modelli matematici
- Modelli fisici

I modelli matematici descrivono i fenomeni attraverso equazioni che vengono formulate in base ad opportune ipotesi risolte mediante l'uso di calcolatori. In tali modelli la morfologia dell'area e le condizioni al contorno sono descritte mediante adeguate schematizzazioni numeriche.

I modelli fisici si basano sulla riproduzione dei processi in laboratorio, normalmente in scala ridotta, adottando opportuni criteri di similitudine. La scala del modello condiziona l'accuratezza dei risultati.

### Modelli matematici

I modelli matematici comunemente impiegati in campo idraulico-marittimo si possono suddividere, a grandi linee, in modelli idrodinamici e modelli morfologici

I modelli idrodinamici ipotizzano che il fondale sia rigido, e si adottano allo scopo di valutare le modificazioni del moto ondoso nella propagazione dal largo fino in prossimità di un'opera costiera o della costa, da impiegare per la valutazione del comportamento di opere di stabilizzazione o di ricostruzione di spiagge, o in presenza di opere di protezione. Questi modelli sono in grado di tenere conto di tutti i più importanti fenomeni quali rifrazione, diffrazione, riflessione e dissipazioni per frangimento.

Sono inoltre disponibili modelli idrodinamici in grado di descrivere i campi di velocità di masse idriche in movimento sotto l'azione del vento, della marea e delle differenze di densità e temperatura. Tali modelli permettono inoltre di simulare le caratteristiche di processi di dispersione all'interno di tali masse di elementi solidi o fluidi presenti o rilasciati da effluenti nel corpo idrico.

Una immediata estensione dei modelli matematici idrodinamici sono i modelli morfologici che, sulla base dei risultati dell'applicazione dei primi in termini di azioni idrodinamiche sui sedimenti di fondo e delle caratteristiche fisiche di questi ultimi, sono in grado di prevedere eventuali fenomeni di erosione dei fondali e del litorale e quantificare il trasporto solido litoraneo.

### Modelli fisici

L'analisi di fenomeni idrodinamici complessi che interessano piccole aree e sono legati a caratteristiche morfologiche locali, può richiedere l'uso del modello fisico in scala ridotta, che consente non solo di verificare l'attendibilità delle ipotesi di calcolo e di introdurre modifiche migliorative, ma anche di evidenziare ed osservare fenomeni che difficilmente si prestano alla schematizzazione matematica.

La tipologia dei modelli fisici che vengono applicati varia a seconda del settore di applicazione, sia esso relativo alle opere portuali o alle opere di protezione delle coste e dei fondali.

Lo studio del comportamento delle strutture costituenti le opere portuali richiede l'esecuzione di misure volte ad accertare la capacità delle opere stesse di esercitare la loro funzione protettiva senza subire danneggiamenti provocati dall'azione del mare. Per tali studi il fondale viene fissato rigidamente e la batimetria costruita con calcestruzzo liscio (modelli fisici a fondo fisso), al fine di riprodurre correttamente i fenomeni di propagazione del moto ondoso incidente, su modello bidimensionale o tridimensionale.



### *Modelli fisici bidimensionali*

I modelli bidimensionali vengono realizzati in bacini, detti canalette, in cui la lunghezza è molto maggiore della larghezza. Ciò consente di ottenere onde con caratteristiche quasi perfettamente bidimensionali con fronte rettilineo ortogonale alle pareti del canale. In questo modo è possibile non tenere conto degli scambi di energia laterali propri del campo tridimensionale, riproducendo le condizioni teoriche impiegate comunemente nel dimensionamento strutturale delle opere costiere. Sui modelli di questo tipo vengono studiati la tracimazione delle onde sui moli, la stabilità delle opere a gettata e l'azione delle forze idrodinamiche su opere di tipo particolare quali cassoni forati, elementi galleggianti e opere a parete verticale.



**Figura 3.3.1:** Modello fisico bidimensionale in canale, dal Laboratorio di Ingegneria Ambientale e Marittima dell'Università de L'Aquila.

### *Modelli fisici tridimensionali*

I modelli tridimensionali vengono utilizzati per la descrizione di processi in cui l'ipotesi di simmetria non è applicabile, come ad esempio la rifrazione su batimetrie complesse, l'evoluzione planimetrica della linea di costa, l'agitazione in bacini portuali, il regime idrodinamico in presenza di testate o varchi di barriere emergenti o sommerse. Essi vengono realizzati in vasche di opportune dimensioni orizzontali e profondità.

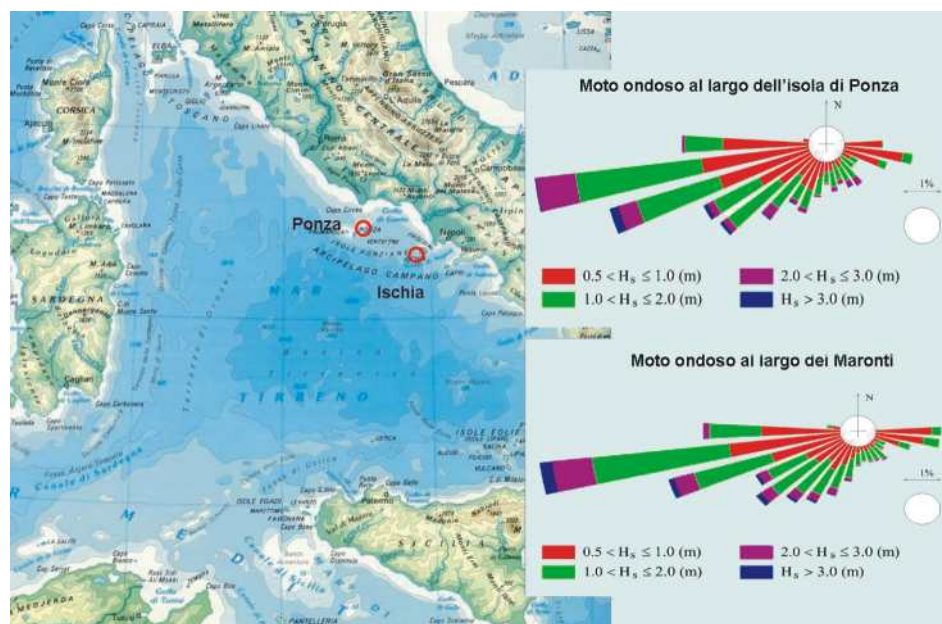


**Figura 3.3.2:** Modello fisico tridimensionale a fondo fisso, da ESTRAMED s.p.a., 1990.

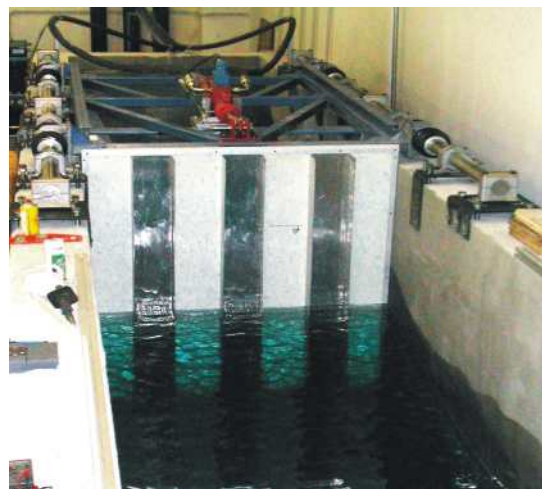
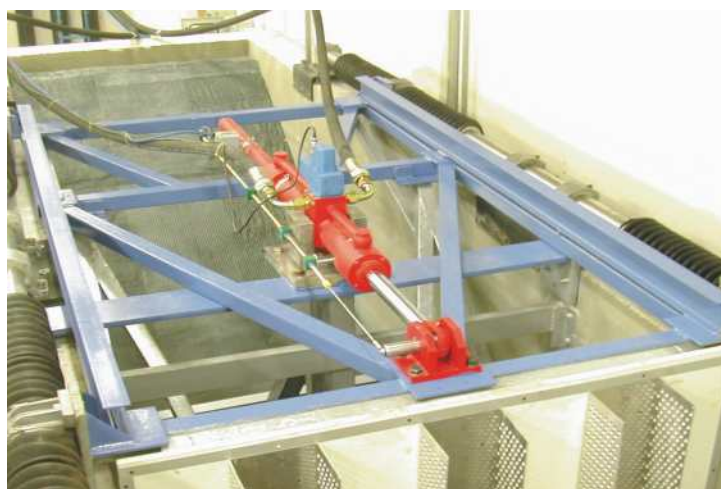
I risultati dell'applicazione dei modelli fisici marittimi dipendono sensibilmente dalle condizioni di input e cioè dalle caratteristiche dei moti ondosi impiegati durante le esperienze.

Per ridurre i tempi e gli oneri economici degli studi, spesso è necessario restringere il campo delle condizioni di prova, svolgendo, in fase propedeutica alla realizzazione di un modello, un'accurata analisi delle condizioni ondose prevedibili nel paraggio in esame. Attraverso l'impiego di modelli matematici, si tiene anche conto della meteorologia dell'area e della morfologia del fondale, che influisce sulla propagazione del moto ondoso da largo verso riva. In questa fase risulta di grande utilità conoscere le caratteristiche spettrali (distribuzione in frequenza dell'energia associata all'onda) del moto ondoso nell'area di studio, che devono essere attentamente riprodotte e schematizzate nel modello.

**Figura 3.3.3:** Distribuzione direzionale dell'energia associata alle altezze d'onda. Dall'analisi climatica e statistica dei dati provenienti dall'ondametro di Ponza si ricava la rosa della distribuzione direzionale annuale degli eventi di moto ondoso, quindi, mediante trasposizione con opportuni modelli matematici, l'esposizione meteomarina a largo della Baia dei Maronti (isola di Ischia).



Una volta individuati i parametri ondosi, occorre riprodurre il moto ondoso in laboratorio; la generazione richiede strumenti concettualmente semplici, ma di assoluta precisione ed affidabilità. Gli ondogeni attuali sono generalmente composti da pale rigide vincolate e mosse da attuatori idraulici servo-controllati e comandati da calcolatori. Ad esse è imposta una legge del moto precalcolata dipendente dalle caratteristiche ondose da riprodurre e dalla funzione di trasferimento di energia tra il generatore e l'acqua messa in movimento dal battitore.



**Figura 3.3.4:** Pistone e pala del generatore d'onda, dal Laboratorio di Ingegneria Ambientale e Marittima dell'Università de L'Aquila.



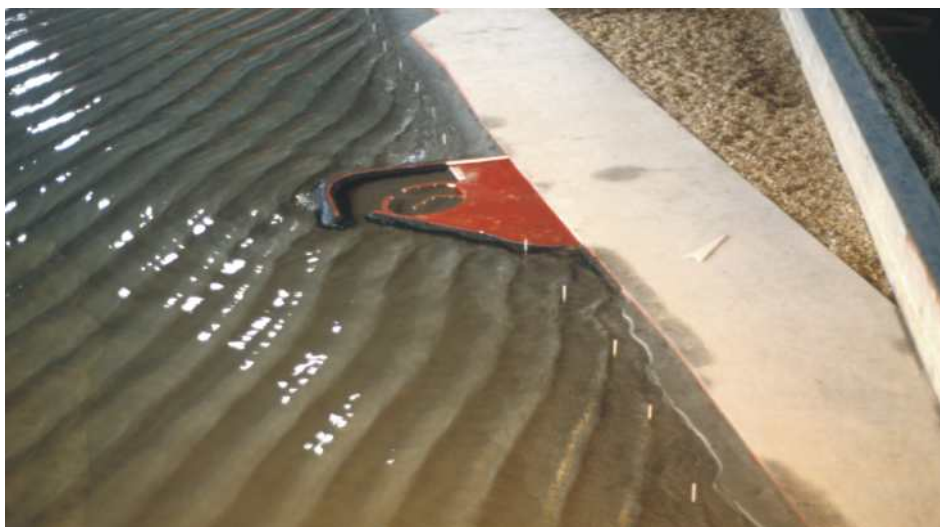
Ogni modifica di opere portuali esistenti, nonché la realizzazione di nuove, richiede una verifica delle ripercussioni indotte sui litorali adiacenti. Analogamente la scelta della tipologia ed estensione di eventuali opere di protezione del litorale scaturisce dallo studio delle caratteristiche idrodinamiche, climatiche e morfologiche locali.

Il modello a fondo mobile costituisce un elemento di grande aiuto al progettista nell'analisi dei problemi suddetti.

La tecnica prevede la riproduzione in scala del fondale con materiale granulare di caratteristiche definite attraverso leggi teoriche o empiriche, in base alle caratteristiche del materiale presente in sito. Sono generalmente impiegati materiali più leggeri dei sedimenti in sito (bakelite, materie plastiche e organiche) con granulometria superiore a quella reale e distorsioni di scala elevate, o sabbia con granulometria inferiore a quella in sito e distorsioni di scala più contenute.

L'adozione di scale distorte consente, in generale, una buona riproduzione dei fenomeni di rifrazione del moto ondoso, ma una più carente riproduzione dei fenomeni di riflessione e diffrazione. Tuttavia, tale limitazione non riveste importanza determinante ai fini dello studio del movimento del materiale di fondo.

**Figura 3.3.5:** Modello fisico a fondo mobile. La prima immagine evidenzia i fenomeni di rifrazione (il fronte dell'onda tende a ruotare e a disporsi parallelamente alle isobate, avvicinandosi alla battigia) e di diffrazione (diffusione dell'energia dell'onda che si verifica quando la propagazione di un treno d'onda viene interrotta dalla presenza di ostacoli, nel caso in figura la diga di sopraflutto del porto) dell'onda incidente; la seconda mostra la movimentazione del sedimento superficiale di fondo (ESTRAMED s.p.a., 1990).



**Figura 3.3.6:** L'adozione di scale distorte consente, in generale, una buona riproduzione dei fenomeni di rifrazione del moto ondoso, risultando, invece, più carente per riflessione e diffrazione, tuttavia tale limitazione non riveste normalmente importanza determinante ai fini dello studio del movimento del materiale di fondo. (ESTRAMED s.p.a., 1990).



Sui modelli tridimensionali vengono studiate l'evoluzione o la stabilità di ridotte estensioni di litorali (pochi chilometri), gli effetti indotti da strutture portuali o da opere di protezione sull'equilibrio della costa adiacente, la stabilità di interventi di ripascimento e dei canali di ingresso ai porti. Sui modelli bidimensionali si studia la stabilità trasversale dei profili di spiaggia sotto l'azione del moto ondoso, e quindi l'efficienza di eventuali interventi di ripascimento, stabilizzazione o protezione. Questi sono quasi sempre accoppiati al modello tridimensionale, di cui costituiscono il naturale presupposto.

## Generalità

**A** grandi linee è possibile distinguere le strutture di difesa di una costa in naturali e artificiali. Fra le prime vanno ricordate le spiagge e le dune. Le seconde sono a loro volta classificabili in: opere la cui principale funzione è quella di impedire l'azione erosiva del moto ondoso mediante il rivestimento, e il sostegno del terreno a tergo (difese aderenti, come paratie a mare, muri di sponda, rivestimenti); opere di rifornimento artificiale di sabbia alla spiaggia, per controbilanciare le perdite causate dai processi naturali o da interventi dell'uomo; opere trasversali (pennelli) e, infine, opere parallele distaccate (scogliere, barriere frangiflutti, ecc).



**Figura 3.4.1:** Foto a) Foce dell'Albegna (Regione Toscana).

Foto b) Litorale spagnolo

Le immagini illustrano le principali funzioni esercitate dalle barriere radenti: a) limitare l'erosione delle spiagge causata dall'azione del moto ondoso frangente; si può osservare un "rudimentale versamento" di massi naturali lungo la riva a protezione della spiaggia); b) sostenere il terreno a tergo della barriera - barriera posta a protezione della rete viaria in zona industrializzata.



**Figura 3.4.2:** Foto a) Litorale calabro tirrenico (ESTRAMED s.p.a.).

Foto b) Litorale di Fano (Regione Marche)

Esempi di cattiva progettazione di barriere di protezione radenti. L'azione del moto ondoso frangente ha dato origine ad un approfondimento locale dei fondali, causando lo scalzamento al piede ed il successivo crollo dell'infrastruttura.



---

## Le difese aderenti: funzioni, limiti e indicazioni per il progetto

### Paratia

Comunemente, si chiama paratia una parete verticale di tipo leggero (quali le palancole in calcestruzzo, ferro, legno), che costituisce una soluzione di breve durata. E' infatti da notare che una tale opera non può considerarsi una protezione della spiaggia antistante, il cui processo erosivo, se esistente, continuerà e, anzi, potrà essere incrementato dalla maggior agitazione prodotta dall'onda riflessa.

La paratia non ha in genere la capacità strutturale di resistere all'azione diretta delle onde, a meno che la sua struttura non venga rinforzata e trasformata in un muro di sponda di dimensioni adeguate.

### Muro di sponda

I muri di sponda presentano una parete a mare verticale, curva o a gradoni e possono essere armati con mantellate di scogli naturali o massi artificiali ad alta scabrezza per ridurre la risalita dell'onda.

I muri di sponda, che proteggono e sostengono il terreno retrostante, possono provocare, come le paratie, l'approfondimento locale dei fondali. Infatti, l'azione delle onde, che frangono e si riflettono sulla parete, tende a rimuovere la sabbia o altro materiale erodibile al piede della parete, modificando la situazione statica del muro, che può diventare instabile. In questi casi, sarà necessario prevedere un'adeguata protezione al piede. Un rimedio può essere quello di realizzare un taglione o disporre, a protezione del fondo, del pietrame o un materasso contenente pietrame o altra simile protezione. Il pietrame dovrà avere dimensione tale da non essere reso instabile dal moto ondoso, e una distribuzione granulometrica tale da funzionare da filtro per prevenire l'asportazione del materiale di fondazione ed il conseguente cedimento, per assestamento, della struttura.

L'azione di approfondimento dei fondali al piede della struttura è minore se la parete è a scarpata invece che verticale.

**Figura 3.4.3:** Opere di rivestimento di scarpate costituite da massi naturali ed artificiali (accropodi) all'interno della Laguna di Venezia (Corsini S.).



I rivestimenti sono difese aderenti aventi la funzione di semplice protezione superficiale del profilo di riva, senza una precisa funzione statica di sostegno del terreno a tergo. Le difese realizzate in massi danno in genere luogo ad un approfondimento dei fondali al piede più limitato rispetto ai rivestimenti impermeabili, in quanto, essendo permeabili, permettono alla massa d'acqua frangente di penetrare al loro interno, dissipando una rilevante aliquota dell'energia incidente.

Queste opere possono essere considerate di tipo flessibile o elastico, nel senso che sono possibili anche sensibili spostamenti relativi dei massi che le compongono, senza che venga compromessa la loro stabilità, al contrario dei muri di sponda, rivestimenti, paratie ecc, che si comportano in maniera sostanzialmente rigida. L'affossamento creato dall'onda al piede dell'opera può essere compensato sovradimensionando la sezione trasversale o ponendo pietrame in eccesso, che possa andare a colmare la fossa. A titolo orientativo, converrà ricordare che la prevedibile profondità della fossa, sotto il fondo naturale, può raggiungere anche l'ordine dell'altezza della massima onda compatibile con il fondale originario.

Se una simile struttura è realizzata a gradoni, potrà ottenersi un facile accesso alla spiaggia.

**Figura 3.4.4:** Carrara. Esempio di rivestimento flessibile a massi lapidei sciolti. Questa struttura permette alla massa d'acqua frangente di dissipare parte dell'energia.



## Pennelli: funzioni, limiti e indicazioni per il progetto

I pennelli sono strutture trasversali che in generale si estendono dal retrospiaggia (a partire da un punto sufficientemente radicato a terra, perché il pennello non venga aggirato dal getto di risalita) alla prima linea dei frangenti di normale mareggiata, oltre la quale il trasporto litoraneo può essere ritenuto poco significativo. Tali strutture possono essere realizzate in varie forme e materiali, adottando massi naturali o artificiali, calcestruzzo, ferro o legno, e possono, inoltre, essere rigidi o deformabili.

**Figura 3.4.5:** Casalbordino, Vasto (Di Risio M., Laboratorio di Ingegneria Ambientale e Marittima dell'Università de L'Aquila, Dicembre 2002): i pennelli causano un'alterazione del naturale bilancio di sedimenti trasportati lungo costa ad opera delle correnti litoranee. Dalle foto emerge chiaramente come la presenza di un pennello posizionato trasversalmente alla linea di riva ne alteri il suo andamento originario, provocando una deposizione di sedimenti sopraflutto (a destra della struttura nella foto) ed un'erosione sottoflutto (a sinistra della struttura).



**Figura 3.4.6:** La prima "foto obliqua" illustra un esempio di protezione del litorale con "opere di difesa miste", costituite da barriere e pennelli disposti in varie direzioni rispetto all'andamento della linea di riva. La seconda foto (Prato Ranieri, Toscana) mostra più in dettaglio delle opere di difesa di tipo misto costituite da una barriera emersa ed un pennello, disposti obliquamente rispetto alla linea di riva secondo la direzione di propagazione del moto ondoso prevalente (Regione Toscana).

Quando vengono costruiti dei pennelli è praticamente inevitabile, salvo interventi particolari, che la spiaggia sottoflutto venga danneggiata dalla riduzione del trasporto solido che la alimentava. L'erosione di tale spiaggia, se questa ha importanza turistica o come elemento di protezione del litorale, può essere evitata, prevedendo un intervento di ripascimento artificiale, opere di by-pass dei sedimenti o progettando l'opera in modo tale che la sua disposizione planimetrica permetta un apporto sufficiente di sedimenti alla spiaggia sottoflutto.



---

## Barriere distaccate: funzioni, limiti e indicazioni per il progetto

Una barriera frangiflutti distaccata è una struttura costruita ad una certa distanza dalla battigia per proteggere un'area costiera dall'azione diretta delle onde. Può servire come struttura di difesa di una spiaggia e come trappola per il trasporto litoraneo. Generalmente, tale struttura è realizzata in scogliera di pietrame.

Quando vengono impiegate per proteggere la costa, queste opere sono generalmente realizzate in gruppi di elementi di lunghezza modesta, separati da varchi aventi lo scopo di consentire lo scambio di acque, l'ingresso dei sedimenti o il transito di piccoli natanti.

A seconda della quota a cui è posta la sommità dei frangiflutti, essi potranno dirsi emergenti o sommersi, anche se frangiflutti abitualmente emergenti, in condizioni di alta marea possono funzionare con forte tracimazione e, saltuariamente, anche come sommersi in bassa marea.

In relazione agli scopi sopra accennati, i varchi costituiscono una necessità per un sistema di barriere emergenti, mentre al crescere della tracimazione-sommergenza essi perdono la loro funzione e possono divenire dannosi per le violente correnti dirette verso il largo che li attraversano.

I frangiflutti dissipano l'energia dell'onda frangente creando sul lato terra una zona di bassa agitazione o di "ombra", dove tende a depositarsi il materiale trasportato lungo riva dall'azione combinata dell'onda e delle correnti. La formazione di questo accumulo (che in alcuni casi può diventare un vero e proprio tombolo realizzando la connessione tra la spiaggia e la barriera) ha l'effetto di impedire il transito lungo riva delle correnti litoranee e rende la barriera funzionalmente simile ad un pennello.

In presenza di una forte deriva litoranea, il deposito a tergo della barriera induce un avanzamento della riva protetta, a cui fa riscontro un'erosione comparabile sulle spiagge adiacenti.

I principali parametri progettuali per tali opere sono la quota del coronamento, la morfologia del fondale e la profondità (o, analogamente, la distanza dalla riva). Tali parametri influenzano l'attenuazione dell'onda, la tracimazione, la frazione del trasporto totale litoraneo che può essere trattenuto, la sezione e quindi il costo dell'opera. In sede di progettazione, si potranno prevedere degli assestamenti futuri e realizzare la struttura più alta, o con sezione maggiorata. In sede di esecuzione, si potrà esporre il nucleo, sovradimensionato, ad alcune mareggiate che ne causino l'assestamento, e solo in un secondo tempo realizzare la mantellata.

Con un mare dominante fortemente obliquo, converrà disporre le barriere allineate e orientate come i fronti d'onda del mare dominante.

**Figura 3.4.7:** Skagen, Danimarca (Di Risio M., Laboratorio di Ingegneria Ambientale e Marittima dell'Università de L'Aquila, 2002): Serie di barriere distaccate emerse che hanno portato alla formazione di tomboli e cuspidi. Si noti come le onde frangono a distanze maggiori dalla riva in prossimità dei frangiflutti creando una zona di "ombra" lato terra, con conseguente accumulo del materiale trasportato lungo riva dall'azione combinata di onde e correnti. Funzionano egregiamente quando la costa sommersa è poco acclive.





## Ripascimenti: funzioni, limiti e indicazioni per il progetto

Le spiagge possono dissipare efficacemente l'energia ondosa e pertanto sono classificate fra le strutture di difesa della costa.

Il ripascimento artificiale di una spiaggia consiste nell'alimentazione della stessa mediante versamento di idoneo materiale di riporto, estratto da cave di prestito a terra o in mare.

Scopo dell'intervento, oltre quello di stabilizzare una spiaggia in erosione, può essere anche quello di ampliarla, oppure di realizzare una nuova spiaggia.

Il ripascimento può essere effettuato in un'unica soluzione e/o mediante alimentazione periodica, con quantità da stabilirsi in base al deficit dei sedimenti lungo il tratto costiero in esame ed alle caratteristiche sia dei sedimenti originari che di quelli di prestito.

I provvedimenti di ripascimento artificiale, quando possono essere applicati, costituiscono il miglior sistema per ovviare ai problemi di erosione dei litorali, presentando il notevole vantaggio di non provocare, a differenza degli altri tipi di difesa, sfavorevoli ripercussioni sul regime dei litorali adiacenti.

I limiti di tale tipologia di intervento sono rappresentati, essenzialmente, dalla disponibilità, a costi economici, di materiali adatti al ripascimento.



**Figura 3.4.8:** Attività di ripascimento della spiaggia dei Maronti (Isola di Ischia). Le foto illustrano l'installazione della condotta di refluento, costituita da tubazioni di acciaio per il tratto a terra e da tubazioni flessibili galleggianti per il tratto a mare. Al largo (su fondale di 10 m) la tubazione termina su un pontoncino di riferimento e con l'elemento di aggancio rapido alla draga (MODIMAR-s.r.l.).



**Figura 3.4.9:** Attività di ripascimento della spiaggia dei Maronti (Isola di Ischia): operazioni di dragaggio e refluento (MODIMAR-s.r.l.).

Opere ausiliarie di contenimento possono essere incluse in un progetto di difesa di una spiaggia mediante ripascimento per ridurre la quantità della perdita e quindi la necessità di più frequenti ricarichi. Tuttavia, se una spiaggia è soggetta al naturale apporto di sedimenti, deve prevedersi, in conseguenza della costruzione delle opere di contenimento (pennelli e/o barriere distaccate), una corrispondente diminuzione di rifornimento naturale alla zona sottoflutto con la risultante esportazione del problema.

Gli effetti negativi delle opere accessorie di contenimento possono ridursi, disponendo accumuli di sedimenti di ripascimento in adatte quantità coerentemente con la costruzione dei pennelli, per permettere il bypass verso valle del materiale naturale.

Durante l'esecuzione è da prevedersi qualche inconveniente di carattere ambientale per l'aumento temporaneo della torbidità delle acque costiere, almeno in una fase iniziale, specie quando sia rilevante la percentuale di sedimenti fini nel materiale di riporto.

Un progetto di ripascimento artificiale, sia che si tratti della realizzazione di una nuova spiaggia che del mantenimento o ampliamento di una spiaggia esistente, richiede sempre una precisa conoscenza della dinamica del litorale su cui si interviene, specie per quanto riguarda la direzione del trasporto litoraneo ed il bilancio sedimentario e il rilevamento della morfologia del fondale. La scelta del materiale di riporto dovrà essere effettuata tenendo conto delle caratteristiche granulometriche e tessiture originali della fascia costiera, da ottenersi in base ai risultati delle analisi di un sufficiente numero di campioni prelevati dalla spiaggia emersa e dalla spiaggia sommersa. Anche i quantitativi di progetto dei materiali di ripascimento dovranno essere stabiliti in base alle caratteristiche granulometriche del materiale di riporto rispetto al materiale originario. In particolare, per spiagge relativamente stabili o in leggero arretramento, sarà opportuno che il materiale di riporto abbia almeno la stessa granulometria del materiale originario o, meglio, che sia leggermente più grossolano.

Un programma di ripascimento artificiale richiede la preventiva definizione delle caratteristiche geometriche di progetto, in particolare: quota, larghezza della berma e profilo del versamento, tenendo conto della forma che prevedibilmente assumerà la spiaggia sotto l'azione del moto ondoso. La quota della berma potrà essere fissata tenendo conto delle prevedibili altezze di risalita del moto ondoso e dell'altezza di berma della spiaggia originaria, nonché di quella di spiagge in condizioni di esposizione simili. La larghezza della berma andrà definita a seconda della finalità della spiaggia (spiaggia protettiva, spiaggia per usi ricreativi).

Nel caso di una spiaggia facente parte di un'unica unità fisiografica, il ripascimento potrà anche ottenersi mediante la realizzazione di un deposito di alimentazione all'estremità sopraflutto, in modo che l'alimentazione della spiaggia sottoflutto possa avvenire ad opera del trasporto litoraneo. La previsione di più punti di alimentazione è consigliabile quando sia richiesto un ripascimento rapido ed uniforme su tutta la spiaggia. È da tener presente che un deposito di alimentazione non dovrà mai essere spinto a profondità eccessive, cioè tali da impedire un efficace movimento da parte del trasporto litoraneo.

**Figura 3.4.10:** Ripascimento protetto a Tarquinia, Aprile 2004 ed Agosto 2004. Sono stati utilizzati una serie di pennelli trasversali per ridurre la perdita e quindi la frequenza dei ricarichi di sabbia mediante ripascimento (Osservatorio Regionale dei Litorali, Regione Lazio, 2004).



## Indicazioni per la scelta del tipo di opera

I fattori determinanti la scelta del tipo di opera possono essere:

- L'urgenza
- Il tipo di regime del trasporto longitudinale/trasversale
- L'importanza della marea
- La stabilità morfologica del paraggio
- La finalità dell'intervento.

In particolare possono darsi le indicazioni seguenti:

I pennelli sono consigliabili dove la deriva litoranea è ben definita, allo scopo di ridistribuire lungo il litorale gli apporti sedimentari in ragione del regime ondoso e della configurazione del litorale; ad es. per la stabilizzazione di apparati di foce andati in erosione per il ridursi, degli apporti solidi sabbiosi. Essi risultano abbastanza insensibili alla marea, ma debbono essere ben radicati a terra ed impiegati con prudenza in litorali labili sotto l'aspetto geomorfologico o soggetti a subsidenza.

I frangiflutti foranei sono da consigliare dove l'escursione di marea ed il trasporto litoraneo sono modesti.

I rivestimenti e soprattutto i muri di sponda sono in genere da sconsigliare per la stabilità della spiaggia, ad eccezione di opere di modesto rilievo, che vengono interessate dall'onda solo in condizione di sovrizzo eccezionale.

Le difese parallele, frangiflutti foranei e difese radenti, non sembrano consigliabili dove la conformazione della costa è rapidamente variabile.

I ripascimenti artificiali sono da consigliare su piccola scala dove il trasporto è modesto; si prestano ottimamente sia dove l'escursione di marea è forte sia dove la morfologia è labile. Dove il trasporto litoraneo è consistente, i ripascimenti devono essere abbinati ad opere di cattura e trattenimento, al fine di ridurre gli oneri di manutenzione.

**Figura 3.4.11:** Analisi dell'efficacia delle opere di difesa costiera in base alla relazione tra gli elementi caratteristici di ogni tipologia di opera con gli effetti che queste inducono sull'ambiente in termini di alterazione della naturale biodiversità (modifica dello sviluppo di flora e fauna, ecc...) di qualità delle acque (effetti sul ricambio idrico) e di fruibilità della risorsa (spazio per attività turistiche, effetti sul paesaggio, controllo degli eventi disastrosi, ecc...).

ELEMENTI CARATTERISTICI DELLE OPERE DI DIFESA		VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA						
		Preservazione ambiente naturale	Spazio per lo sviluppo della fauna marina	Spazio per attività turistiche	Difesa della costa	Effetti sul ricambio idrico	Effetti sul paesaggio	Controllo eventi disastrosi
ELEMENTI DELLA SEZIONE TRASVERSALE DELL'OPERA	Profilo naturale della spiaggia sommersa							
	Opera sommersa e staccata dalla riva							
	Opera sommersa e radicata alla riva							
	Opera emergente e staccata dalla riva							
ELEMENTI PLANIMETRICI DEL SISTEMA DI PROTEZIONE	Opere che si protendono dalla riva verso il mare							
	Opere parallele alla linea di riva							
	Opere parallele alla riva e ad esse collegate							

efficace e fattibile

moderatamente efficace ma fattibile

poco efficace e non fattibile

### Generalità

**L**e stime dei costi di realizzazione, comprensivi della gestione, e del piano di monitoraggio e manutenzione cambiano enormemente a seconda della tipologia di opera di difesa costiera e delle condizioni fisiche, geologiche, geografiche e geomorfologiche del sito su cui si interviene.

Opere di breve durata quali le paratie, la cui costruzione è generalmente provvisoria e provvisoria, si presentano spesso come opere economiche e veloci.

Quando vi sono le condizioni per un ripascimento artificiale, lunghi tratti di spiaggia possono essere protetti a costi relativamente bassi rispetto a quelli di strutture di difesa alternativa. Il ripascimento è veramente efficace quando viene protetto con opere complementari quali barriere o pennelli. Il costo di tali strutture secondarie è assai rilevante nella spesa finale del progetto di ripascimento.

Spesso il costo di progetti che riguardano aree poco estese è abbastanza alto, a causa dell'alta spesa richiesta per mobilitare l'attrezzatura necessaria, mentre, per grandi progetti la stessa spesa costituisce una parte minore dell'impegno economico di progetto.

Nel quadro economico pertinente ogni singola opera vanno definite le aliquote parziali dei seguenti costi:

- Costi delle analisi preliminari (fisiche, geologiche, geognostiche, batimetriche, ecc...) da eseguire nel sito in questione.
- Costi della raccolta e analisi dei dati di moto ondoso caratterizzanti il clima meteomarinario della zona e dei dati geomorfologici.
- Costi degli studi su modelli matematici e fisici, finalizzati alla descrizione dell'idraulica marittima e del regime sedimentario del litorale.
- Costi di progettazione (preliminare, definitiva, esecutiva).
- Costo unitario del materiale, con stima delle quantità da utilizzare.
- Costi di costruzione.
- Costi di gestione dell'opera.
- Costi di monitoraggio dell'opera in fase di costruzione.
- Costi dovuti all'overfilling (stima della perdita a breve termine di materiale fino dovuta alle onde e al normale assestamento dell'opera sul terreno).
- Costi di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Infine, converrà ricordare che, nel valutare il costo totale dell'opera, non potrà trascurarsi la stima del prevedibile danno alle rive adiacenti alla loro conservazione e eventuale ripristino.



## Cap. 4.0 *OPERE PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE MARINA*

### *Generalità*

**D**a diversi decenni una discreta parte delle coste sabbiose italiane è interessata da fenomeni erosivi. L'arretramento della linea di riva ha messo in crisi la sicurezza di numerose arterie stradali e ferroviarie e ha seriamente pregiudicato l'attività turistica balneare, che nella nostra nazione costituisce un cespite non indifferente per l'intera comunità. Ciò ha incentivato lo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate per la progettazione e l'esecuzione di opere di protezione dei litorali, che non sempre hanno, però, portato alla risoluzione del problema, soprattutto nel medio-lungo termine.

Si possono distinguere due tipi principali di fenomeni erosivi: l'erosione "a breve termine", di tipo reversibile, prodotta generalmente dal trasporto di sedimenti verso il largo, associata alle mareggiate (con periodicità stagionale), e l'erosione "a lungo termine", dovuta normalmente a squilibri nel bilancio sedimentario originati dal trasporto solido litoraneo.

La necessità di definire i limiti all'interno dei quali sviluppare gli studi sugli effetti evolutivi della dinamica costiera ha portato all'individuazione dell'unità fisiografica, quale unità territoriale di riferimento.

Come già evidenziato l'equilibrio dinamico che si instaura all'interno dell'unità fisiografica è regolato da una complessa sovrapposizione di fattori sia di origine naturale (correnti litoranee, moto ondoso, apporti sedimentari, etc.) che antropica (attività estrattive, costruzione di porti o difese costiere, etc.).



**Figura 4.0.1:** Comune di Capo d'Orlando (ME). Effetti dell'azione erosiva del mare sul litorale sabbioso antropizzato. La dinamica naturale, modificata dall'uomo mediante una non appropriata gestione delle coste ed un abusivismo incontrollato, comporta conseguenze negative sui litorali, con ingenti danni economici alle strutture. Per mitigare gli effetti dell'arretramento della linea di riva, si interviene con opere di protezione, che devono essere progettate tenendo conto dei fattori meteomarinari locali, della batimetria, della morfologia costiera e del contesto geoambientale.

---

Già in epoca storica l'uomo è intervenuto lungo le coste con opere di difesa strutturale, tipicamente costituite da porti e bonifiche di varia tipologia, talvolta di dimensioni imponenti come quelle realizzate dai Romani in epoca imperiale. Si è trattato, comunque, per lo più di interventi isolati, con un notevole impatto sull'ambiente, sia a scala locale (breve termine) sia a scala regionale (medio-lungo termine).

**Figura 4.0.2:** Costa in erosione del litorale laziale. Tra le cause principali di arretramento della linea di riva si annovera la diminuzione degli apporti solidi da parte dei fiumi, conseguenza del trattenimento a monte di sedimenti da parte di briglie e invasi artificiali, di prelievi incontrollati di materiali e di cementificazioni delle sponde.



**Figura 4.0.3:** Conseguenze dell'attacco ondoso su una strada litoranea. L'azione erosiva delle onde incidenti si esplica mediante violenti impatti che possono anche demolire la struttura. Nella maggior parte dei casi si deve prevedere un adeguamento o una protezione al piede dell'intervento.



---

Ad aumentare le necessità di interventi di protezione sono intervenuti, nei primi decenni del secolo XX, alcuni fattori che hanno contribuito al processo di artificializzazione e degrado dei vari ambienti costieri, quali:

- La riduzione degli apporti detritici fluviali (che alimentano i litorali), dovuta alla costruzione di dighe lungo i fiumi, ai prelievi di materiale dagli alvei ed alle sistemazioni idraulico-forestali nei bacini montani.
- L'estrazione di idrocarburi, di gas naturale e di acqua in zone vicine al mare, che può originare fenomeni di subsidenza.
- L'eccessivo utilizzo delle fasce costiere per insediamenti e attività economiche, che ha portato all'estensione dei fronti edificati, spingendoli sempre più verso la battigia, ed allo smantellamento delle dune costiere (naturali serbatoi di sabbia) per far posto a centri abitati, villaggi e porti turistici.
- La modifica o l'interruzione del trasporto solido litoraneo, per la costruzione di porti o delle stesse opere di difesa costiera.

Il bisogno di comprendere le cause dei cambiamenti nelle aree costiere ha dato il via ad un approfondimento degli studi sulla dinamica costiera con l'inizio del '900. Successivamente, con il progredire delle conoscenze, negli anni '70 si è visto che molti interventi di protezione, come le strutture artificiali, oltre a presentare costi rilevanti e limitata durata nel tempo, non fornivano in molti casi i risultati attesi. In questo modo si è fatta strada l'esigenza di progettare e programmare nuove tipologie di interventi, come ad esempio i ripascimenti artificiali, la cui efficacia è stata definita e successivamente validata attraverso dati di monitoraggio.

**Figura 4.0.4:** Effetto del moto ondoso su barriere emergenti nella costa laziale. L'azione erosiva delle onde viene fortemente ridimensionata a tergo delle zone protette.





---

La difesa di un tratto di costa esposto all'azione erosiva del moto ondoso può essere efficacemente attuata attraverso:

- il frangimento o la riflessione delle onde incidenti (dighe o moli);
- la dissipazione dell'energia del moto ondoso;
- la protezione dall'azione meccanica ed erosiva dell'onda;
- la riduzione dei fenomeni di risalita e di tracimazione dell'onda (difese aderenti);
- l'intercettazione o il rallentamento del trasporto solido litoraneo (pennelli);
- il rifornimento artificiale di sabbia per bilanciare le perdite di sedimenti (ripascimenti).

Molte tipologie d'opera realizzate lungo la costa costituiscono un ostacolo al libero propagarsi del moto ondoso ed al trasporto di sedimenti, e pertanto possono dar luogo ad alterazioni degli equilibri in zone limitrofe a quella di intervento. La conseguenza è che ogni singolo intervento non deve essere considerato in un contesto isolato, ma va inserito all'interno dell'intera unità fisiografica.

Per poter definire specificamente il tipo di interventi da eseguire su un litorale è necessario identificare la tipologia ed entità dei fenomeni evolutivi, le condizioni meteomarine locali, le caratteristiche del trasporto solido litoraneo, il grado e tipo di antropizzazione dell'area. Le opere di protezione dal moto ondoso provocano, in ogni caso, una modificazione del profilo costiero.

Come già detto nel capitolo precedente gli interventi più comuni comprendono le seguenti tipologie:

- **Opere distaccate parallele (Barriere)**
- **Opere aderenti parallele (Rivestimenti, Muri, Argini)**
- **Opere trasversali (Pennelli, Headlands)**
- **Opere di stabilizzazione delle spiagge (con ghiaie)**
- **Opere di ricostituzione delle spiagge (Ripascimenti di sabbia)**

La gran parte di esse, fatte le dovute modifiche e proporzioni, può essere applicata anche per la protezione dalle inondazioni o per la difesa dall'erosione delle coste lacustri.

**Figura 4.0.5:** Le opere parallele e distaccate sono manufatti di tipo attivo-rigido, posizionati in mare, preferibilmente paralleli alla costa, che hanno lo scopo di provocare una dissipazione dell'energia del moto ondoso a distanza dalla riva (attenuandone il potere erosivo sui bassi fondali). (Salerno)





**Figura 4.0.6:** Le opere radenti o aderenti sono manufatti di tipo passivo-rigido, ubicati a terra, che hanno lo scopo di proteggere le infrastrutture presenti in prossimità della linea di riva o di difendere l'entroterra da inondazioni marine conseguenti a mareggiate.



**Figura 4.0.7:** Le opere trasversali sono manufatti di tipo attivo-rigido, posizionati trasversalmente alla linea di costa, con la funzione primaria di modificare totalmente o parzialmente il trasporto longitudinale. In genere si estendono dalla spiaggia emersa alla linea dei frangenti e provocano un accumulo di sedimenti sopraflutto a scapito dei settori sottoflutto.



**Figura 4.0.8:** Il ripascimento consiste nella ricostituzione di una spiaggia in arretramento mediante materiale idoneo proveniente da fondali marini o cave nell'entroterra. Un ripascimento può essere morbido, ovvero con versamento diretto di materiali sabbiosi sul litorale, oppure protetto, cioè con versamento difeso mediante la costruzione di opere marittime. Una difesa morbida può avere lo scopo sia di stabilizzare, sia di ricostruire una spiaggia, ma essa, normalmente, non può essere considerata un intervento definitivo, sia che venga realizzata in un'unica soluzione, sia mediante alimentazione periodica.



### Generalità

**L**e barriere sono tra le più comuni opere realizzate per la protezione dei litorali interessati da fenomeni erosivi di varia tipologia ed entità, e sono normalmente realizzabili in tempi relativamente brevi ed a costi accessibili.

Un sistema di barriere con varchi protegge la costa dall'azione erosiva del moto ondoso e lascia passare le onde diffratte, consentendo la deposizione di sedimenti a tergo, senza però garantire sempre un efficace ricambio delle acque ai due lati delle strutture. Poiché la costruzione viene solitamente effettuata ad una certa distanza dalla linea di costa, la principale funzione di protezione si esplica nei confronti delle onde più alte, che sono quelle con maggiore capacità erosiva, determinandone una notevole perdita di energia.

Un sistema di barriere può catturare anche materiali che, muovendosi trasversalmente alla riva, passano attraverso i varchi o scavalcano la barriera; essa, inoltre può risultare efficace anche in condizioni di modesto trasporto litoraneo. Quando la barriera frangiflutti è sommersa, l'attenuazione dell'onda è solo parziale.

Le barriere distaccate possono indurre, nel tempo, significative variazioni della linea di riva e necessitano quindi di una meditata progettazione. Inoltre possono risultare sgradevoli esteticamente e disagiati per i bagnanti, specialmente se emergenti e realizzate con grossi massi di calcestruzzo.

La distanza dalla linea di riva e la tipologia prescelta sono funzione delle condizioni al contorno del sito interessato (destinazione d'uso, ecologia, ecc.), della morfologia e della dinamica locale di vento e moto ondoso.

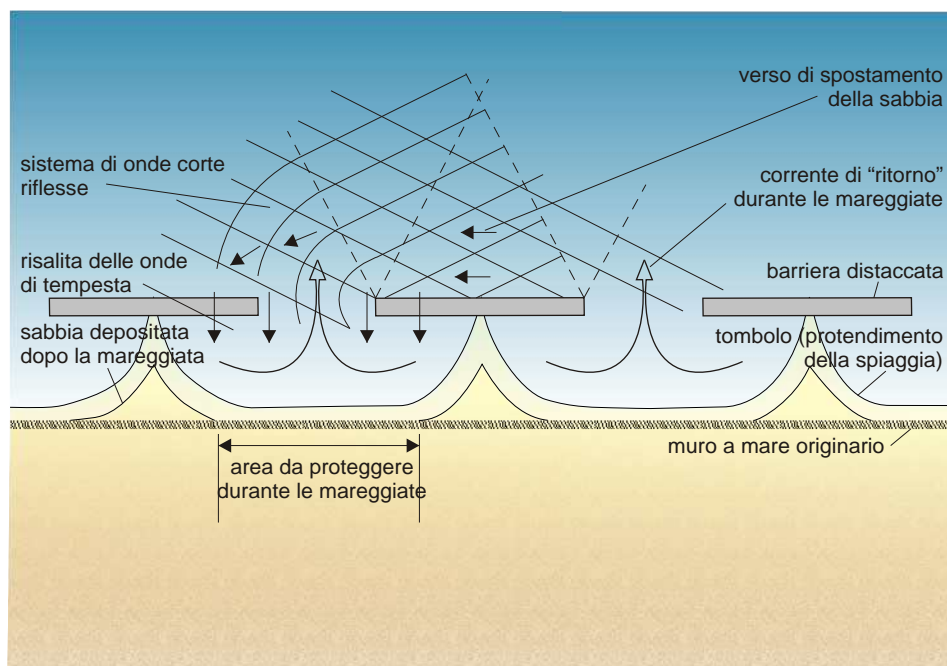
Le strutture possono essere allineate o sfalsate, e disposte parallelamente o con un certo angolo rispetto alla linea di costa, in funzione della direzione delle onde incidenti e delle correnti costiere.

**Figura 4.1.1:** Marina di Palma (AG) Le barriere frangiflutti, costruite ad una certa distanza dalla costa, costituiscono uno dei manufatti di difesa costiera più diffusi in Italia. Esse riducono i processi erosivi favorendo la deposizione di sabbia a tergo dell'opera, dando luogo alla formazione di un saliente o di un tombolo e provocando un minor ricambio delle acque, che può portare a fenomeni di eutrofizzazione (proliferazione di flora algale).

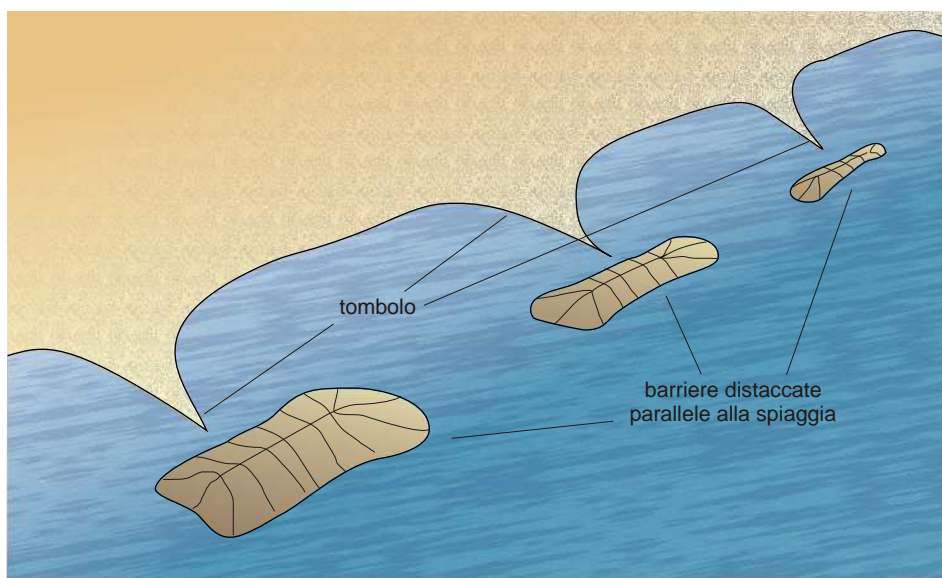




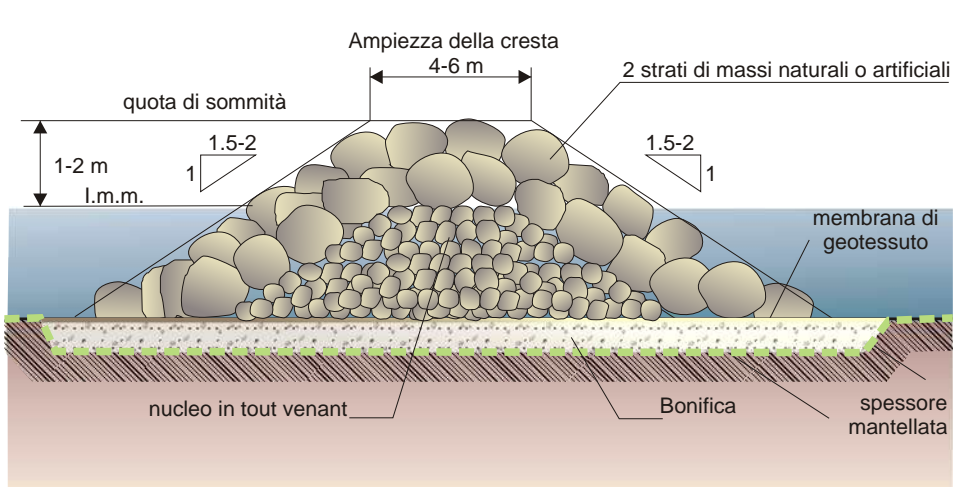
**Figura 4.1.2:** Azione delle barriere distaccate con formazione di tomboli a tergo. La capacità erosiva delle onde muove il materiale lungo i varchi, e successivamente ne favorisce la deposizione nella zona d'ombra, contribuendo alla formazione del tombolo. E' da notare che se i varchi sono troppo larghi i tomboli si formano con difficoltà, mentre se sono troppo stretti possono aversi problemi di ricambio delle acque e ritardi nella formazione dei tomboli.



**Figura 4.1.3:** Schema degli effetti derivanti dalla costruzione di barriere. La configurazione, la spaziatura regolare e la distanza dalla costa consentono a queste opere di controllare l'erosione mediante la creazione di zone concave nei tratti di costa tra un frangiflutti e l'altro, e la formazione di cuspidi (tomboli), nei settori a tergo delle strutture, originando un profilo della linea di riva meno naturale ma più stabile nei confronti del moto ondoso.



**Figura 4.1.4:** Una barriera frangiflutti distaccata dalla spiaggia è una struttura fissa, costituita da una fondazione stabile (imbasamento), da un nucleo in tout-venant e da uno strato esterno protettivo caratterizzato da massi naturali o unità in calcestruzzo.



L'efficacia locale di questa tipologia di interventi è in genere assicurata nel medio-breve periodo, ma presenta alcuni inconvenienti, quali:

- un significativo impatto ambientale e paesaggistico;
- la perdita di naturalità del litorale;
- la formazione di specchi acquei con scarso ricambio;
- l'accentuazione dell'erosione verso i litorali sottoflutto rispetto al settore principale;
- la necessità di manutenzione periodica, soprattutto alle testate, che possono essere danneggiate da fenomeni di escavazione al piede, e dalla concentrazione delle azioni ondose;
- l'approfondimento dei fondali lato mare, per effetto della riflessione delle onde.

Le barriere possono essere distinte secondo due principali tipologie:

- **Barriere emergenti**
- **Barriere sommerse**

**Figura 4.1.5:** Sistema di barriere soffolte (in secondo piano) ed emergenti. Le barriere soffolte possono anche emergere durante le fasi della bassa marea. Le differenze sostanziali tra le barriere emergenti e quelle sommerse consistono nel fatto che le prime impediscono all'onda di propagarsi, e necessitano di varchi, mentre le seconde smorzano l'onda ma la lasciano passare, e non necessitano in genere di varchi.

In relazione alla quota di coronamento rispetto al livello medio del mare, le barriere si definiscono emergenti (quota al di sopra del livello medio), o soffolte (quota emergente in condizioni di bassa marea).

Le barriere sommerse differiscono dalle emergenti sia per la minore capacità di dissipazione energetica sulle onde che per la minore capacità di trattenere i sedimenti e quindi di formare accumuli sabbiosi; esse consentono al tempo stesso un miglior ricambio delle acque e sono meno impattanti dal punto di vista paesaggistico. Per questi motivi sono da preferire alle barriere emergenti, laddove la loro più ridotta capacità antierosiva risulta sufficiente a proteggere la costa. Esse devono essere dotate di dispositivi di segnalazione per i natanti.





**Figura 4.1.6:** La barriera emergente è una tipologia di opera efficace ai fini della protezione della costa, ma può creare problemi di intorbidimento e di inquinamento dell'acqua nella zona compresa tra struttura e riva: la ridotta azione del moto ondoso dietro le barriere non consente la dispersione del materiale limoso e argilloso e soprattutto delle sostanze chimiche ed organiche inquinanti. A breve termine, nella zona di bagnasciuga può proliferare la flora algale, indice dei processi di eutrofizzazione dovuti ad un insufficiente ricambio delle acque, con conseguente inutilizzo dal punto di vista balneare.



**Figura 4.1.7:** Tratto di costa ai piedi del Monte Conero (Marche). La scogliera presente alla base del versante, prospiciente la spiaggia, smorza l'effetto delle onde incidenti sulla falesia. Il fenomeno erosivo viene rallentato, permettendo anche una migliore fruizione turistico-ricreativa dell'area.



**Figura 4.1.8:** Spiaggia di Porto S. Giorgio (AP). Barriere frangiflutti emergenti, in massi naturali, disposte in modo lievemente obliquo rispetto alla linea di riva e perpendicolari alla direzione principale del fronte d'onda incidente. Si nota, fra le scogliere e la costa, la presenza di un tombolo in formazione, ancora sommerso.

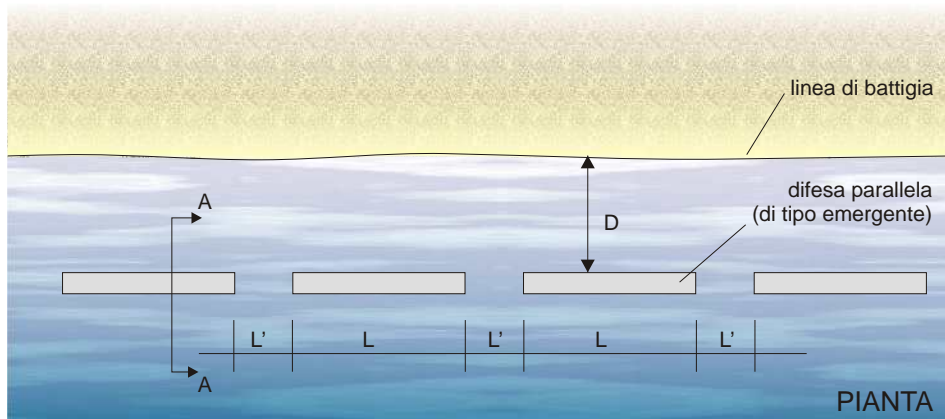


## Barriere emergenti

Una barriera emergente è costituita da massi naturali o artificiali, gettati in cumulo su fondali mediamente bassi, allungata sub-parallelamente alla battigia e posizionata ad una certa distanza da essa e comunque in maniera tale da intercettare il trasporto solido della corrente litoranea prevalente.

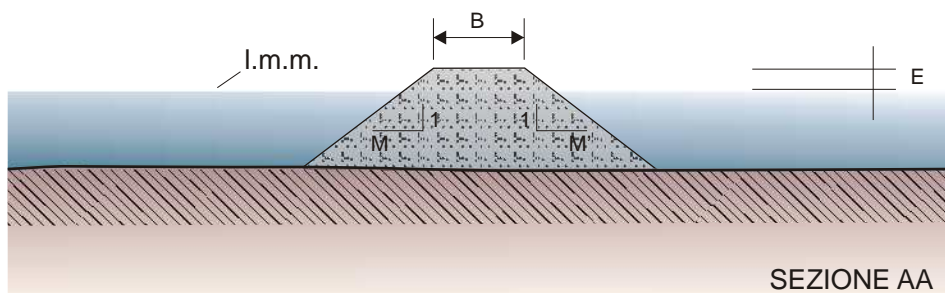
Si preferisce spesso interrompere la continuità della barriera con l'interposizione di varchi per assicurare un sufficiente ricambio di acqua. E' importante tener conto della distanza della barriera dalla spiaggia, in relazione all'ampiezza del varco o al grado di riduzione dell'energia incidente sull'opera.

**Figura 4.1.9:** Principali parametri per il dimensionamento delle barriere frangiflutti emergenti. Riguardo alle caratteristiche tecniche e costruttive dell'opera, devono essere condotte indagini preliminari sull'escursione delle maree, sul regime ondoso, sulle correnti e sul trasporto litoraneo, nonché sulla capacità portante e sulla resistenza del fondale all'erosione. Successivamente da considerare sono la profondità del fondale, la distanza dell'opera dalla riva, l'altezza del coronamento e la pendenza delle scarpate lato mare e lato terra.



### LEGENDA

- L Lunghezza barriera (80 ÷ 150 m)
- L' Lunghezza varchi (20 ÷ 40 m)
- D Distanza dalla linea di battigia (50 ÷ 200 m)
- B Larghezza in cresta della barriera (3 ÷ 5 m)
- E Elevazione sul l.m.m. (0.50 ÷ 1.50 m)



**Figura 4.1.10:** Roma, Comune di Fiumicino. Barriere emergenti inclinate verso la direzione della corrente litoranea prevalente. Questo tipo di opere, molto impiegato negli anni '60-'80 sul litorale laziale, viene realizzato allo scopo di contrastare l'azione diretta del moto ondoso e di favorire la formazione di nuova spiaggia. Terral Italy it2000™ © C.G.R. S.p.A. PARMA





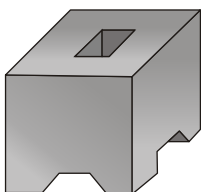
## Barriere con blocchi artificiali

Una barriera di questo tipo è formata da una struttura molto simile a quella di una diga o di un molo, anche se con una sezione trasversale più ridotta. Essa può essere costituita da un insieme di blocchi artificiali disposti senza alcuna zonazione interna, oppure avere un nucleo interno trapezoidale in pietrame. Lo strato più esterno viene realizzato disponendo alla rinfusa, o secondo le maglie di posa definite per ogni tipologia di elemento, le unità in calcestruzzo prefabbricate, di differenti pesi e forme.

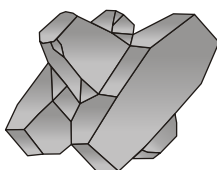
Per queste strutture frangiflutti, le forme di blocchi più utilizzate per lo strato esterno sono il tetrapodo, il dolos, il cubo classico o il parallelepipedo.

**Figura 4.1.11:** Tipi di unità artificiali in calcestruzzo. Negli ultimi decenni l'ingegneria costiera ha sviluppato soluzioni sempre più congeniali per la protezione di paraggi esposti a forti attacchi ondosi, mediante l'impiego di blocchi in calcestruzzo delle più svariate forme. I differenti tipi di elementi possono essere disposti a formare una configurazione casuale o regolare.

Nella foto un cantiere di prefabbricazione di tetrapodi installato a brevissima distanza dal luogo di posa degli elementi. Le cassaforme sono in acciaio; il riempimento in calcestruzzo avviene mediante autobetoniere che trasportano il materiale dal cementificio più vicino. Per grandi quantità di calcestruzzo, può essere conveniente creare in cantiere una centrale di betonaggio.



cubo modificato



accropodo



**Figura 4.1.12:** (In alto). Barriera in cubi di calcestruzzo. L'utilizzo di frangiflutti è indicato non solo per la difesa di tratti di spiaggia, ma anche per la protezione di infrastrutture e opere civili. Per essere pienamente efficace l'intervento deve essere realizzato prima che la spiaggia sia stata completamente erosa.

(In basso). Scogliere in tetrapodi. L'impiego di blocchi in calcestruzzo per la realizzazione di barriere e dighe risale agli anni '60, quando vennero brevettate le prime forme. L'utilizzo dei tetrapodi consente una buona interconnessione tra i vari elementi, con un elevato grado di rugosità e di porosità dell'intera struttura. La forma tronco-conica dei bracci favorisce un progressivo assestamento degli elementi ed un aumento della compattezza e della solidità dell'intero sistema.



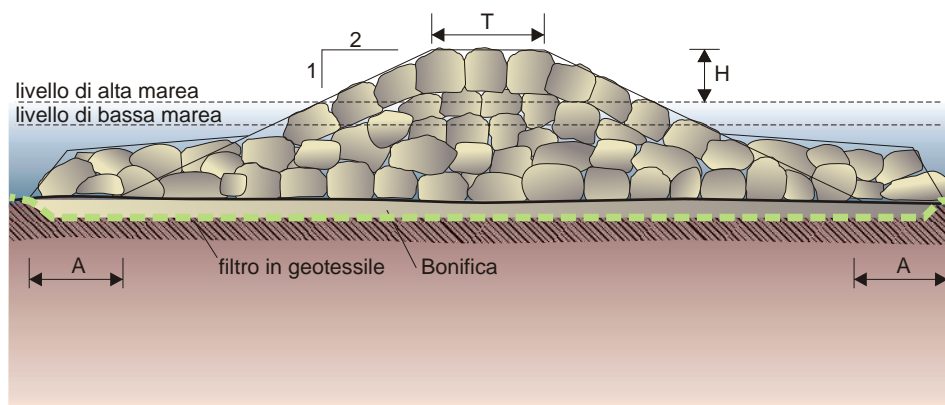
## Barriere in massi naturali

Si tratta delle tipologie d'opera più comuni, realizzate con pietrame, di pezzatura, tale da garantire il peso necessario a resistere alle sollecitazioni delle onde incidenti. Il materiale può poggiare su un filtro geotessile adagiato sul substrato. Gli elementi che costituiscono la barriera vengono solitamente collocati in modo da ottenere una reciproca interconnessione.

**Figura 4.1.13:** Barriera in massi naturali. L'opera viene realizzata in aree soggette ad onde marine aventi energia da moderata a media.

Legenda:

- T ampiezza della sommità in rapporto alle dimensioni dei massi
- H altezza sopra il livello di alta marea
- A larghezza minima della protezione al piede



**Figura 4.1.14:** Barriera frangiflutti in massi di cava. Il suo scopo principale è quello di intercettare le onde, dissipandone l'energia prima che colpiscano la costa. Nella zona di calma presente sul lato terra, se il rapporto tra larghezza del varco e distanza dalla battigia è stato ben calcolato, si ha tendenza alla deposizione di sedimento marino.



**Figura 4.1.15:** Barriera in massi naturali. Normalmente viene costruita su un adeguato imbasamento e con un nucleo in pietrisco. I materiali naturali più utilizzati sono in genere quelli calcarei (ad es. brecce calcaree cementate), ma si fa spesso ricorso anche a materiali ignei, quali graniti, lave, ecc.



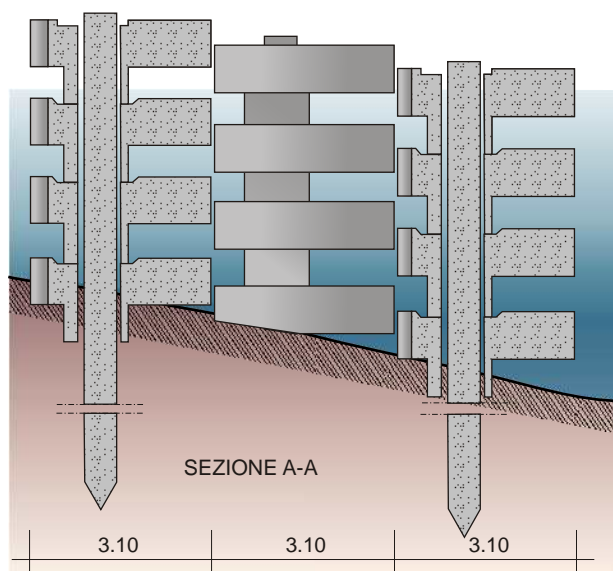
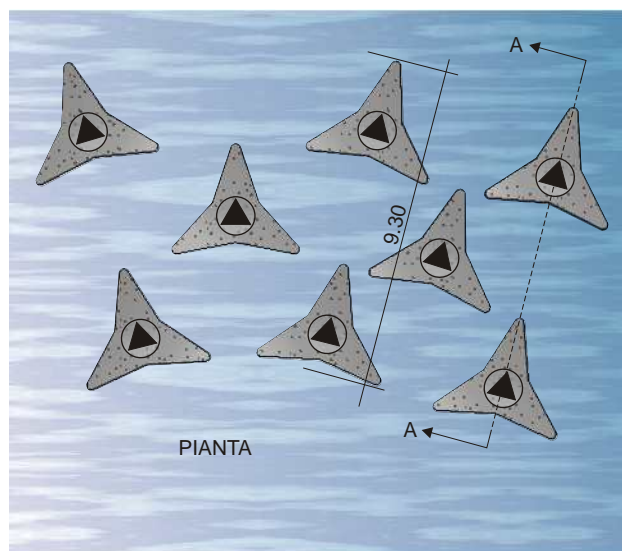


## Descrizione e caratteristiche

### Barriere Ferran

**Figura 4.1.16:** Barriera Ferran. La peculiare disposizione dei pali permette l'intrappolamento di sedimenti a tergo delle barriere, rallentando la formazione di protondimenti o tomboli emersi.

Tali barriere sono costituite da tre file di elementi prefabbricati in cemento armato, composti da un palo infisso a sezione triangolare con 4 piastre a stella e 3 distanziatori, aventi una disposizione planimetrica a cuspidi con angolo interno di  $130^\circ$ . La finalità di tali strutture permeabili è quella di smorzare l'energia dell'onda incidente, favorendo la sedimentazione a tergo di detriti anche grossolani. La loro disposizione consente un ricambio d'acqua sufficiente a mantenere la balneabilità della spiaggia, nonostante il notevole impatto estetico-paesaggistico. La balneazione, nelle vicinanze dell'opera, può tuttavia essere pericolosa, anche perché la struttura presenta superfici spigolose e può deteriorarsi nel tempo.

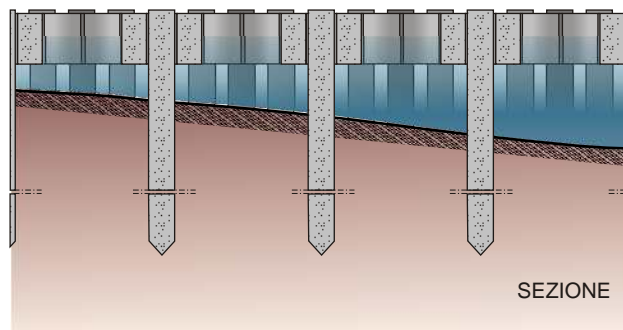
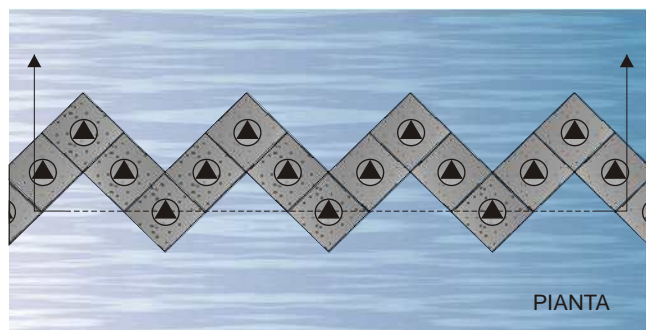


## Descrizione e caratteristiche

### Barriere semipermeabili a pali

Sono strutture composte da pali in calcestruzzo armato, infissi nella sabbia e disposti a quinconce, collegati da membrane orizzontali a più livelli. Il complesso di elementi verticali ed orizzontali, una volta posto in opera, conferisce al manufatto una sufficiente stabilità per resistere alle sollecitazioni del moto ondoso.

Le barriere semipermeabili, favorendo un certo scambio d'acqua tra l'area antistante e la zona protetta, dovrebbero consentire una migliore distribuzione delle particelle solide, favorendo l'instaurarsi di un profilo trasversale e di una configurazione planimetrica più dolci e regolari.



**Figura 4.1.17:** Pali disposti a quinconce. Disposizione di pali su tre file sfalsate a formare strutture a pianta semiquadrata, costituite da cinque pali ciascuno.

L'utilizzo di difese semipermeabili favorisce l'instaurarsi di un profilo costiero più uniforme e stabile rispetto al caso delle scogliere.

Inoltre, i risultati delle simulazioni di laboratorio pongono in evidenza come venga sensibilmente limitato l'impatto nei tratti adiacenti al litorale protetto.

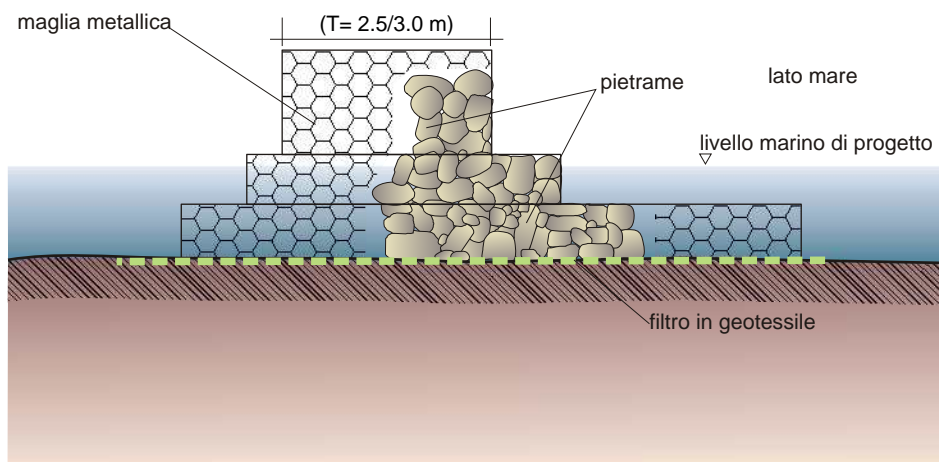
### Descrizione e caratteristiche

## Barriere con gabbioni

Sono strutture costituite da contenitori in rete metallica a sezione rettangolare, riempiti di pietrame, utilizzati singolarmente oppure disposti uno sopra l'altro e legati insieme mediante cavi metallici. I materiali che riempiono le gabbionate possono essere di piccola pezzatura, essendo tenuti assieme dall'involucro in rete metallica. La struttura, realizzata mediante elementi mutuamente collegati, è deformabile ma complessivamente stabile nei confronti del moto ondoso. L'uso di queste strutture è destinato ad acque poco profonde, in prossimità della costa e con moto ondoso moderato.

Queste opere sono generalmente resistenti, flessibili, permeabili e si adattano facilmente al substrato. Sotto la struttura viene posto uno strato filtrante (pietrame di idonea pezzatura o geotessuto convenientemente dimensionato) per limitarne l'assestamento nel tempo. La rete della gabbionata deve essere protetta dagli agenti chimici aggressivi. Le pietre all'interno dei contenitori devono essere il più possibile compatte per limitare distorsioni dell'opera sotto l'effetto del moto ondoso.

**Figura 4.1.18:** Sezione schematica tipica di una barriera in gabbioni. Nel settore superiore si collocano i gabbioni metallici, disposti in modo da costituire dei gradoni. Alla base della struttura viene disposto un materasso in rete metallica, anch'esso riempito in pietrame. Le barriere con gabbioni possono tollerare cedimenti differenziali grazie alla loro elevata flessibilità, sono permeabili e presentano una discreta resistenza meccanica. Non è prudente che le loro dimensioni superino quelle delle barriere in massi naturali ( $T=2.5/3.0$  m)



### Descrizione e caratteristiche

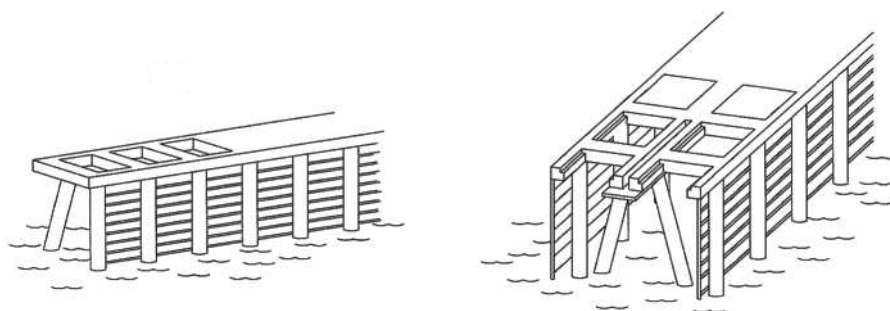
## Barriere schermanti

Sono costituite da barriere permeabili con schermi verticali che riducono i fenomeni di riflessione delle onde lato mare, limitandone gli effetti sui fondali antistanti.

La configurazione strutturale fondata su pali ne consente l'impiego in terreni che offrono scarsa portanza.

Sono costituite da un insieme di pali in acciaio che supportano sistemi di pannelli, dello stesso materiale, esternamente rivestiti in legno. Il loro impiego si adatta ad acque poco profonde con limitati valori di altezza d'onda e richiede molta manutenzione.

**Figura 4.1.19:** Barriere schermanti singole e doppie. Nel secondo caso la presenza di uno spazio tra le due pareti permette una maggior dissipazione dell'energia ondosa.



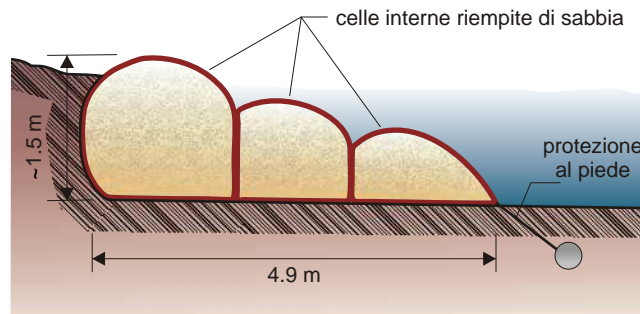
## Descrizione e caratteristiche

### Barriere con Geotubi o Geocontainer

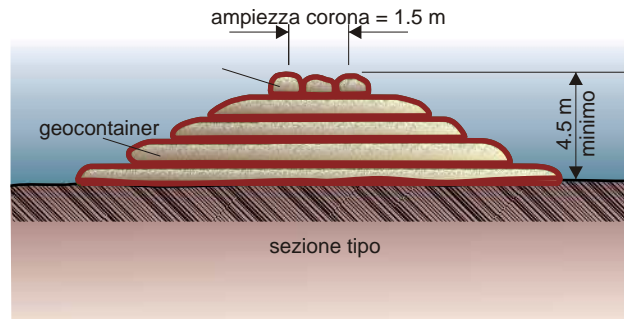
I Geotubi o Geocontainer sono strutture tubolari costituite da un involucro in geotessuto, in polipropilene o poliestere, riempito idraulicamente con sedimenti o con sabbie presenti in sito.

La loro lunghezza va da 150 m (Geotubi) a 300 m (Geocontainer), mentre l'altezza varia da 1,5 m a 2,5 m.

**Figura 4.1.20:** Sezione di una Barriera in geotubi. La struttura, in geotessuto, viene riempita mediante pompaggio di sabbie, anche provenienti da dragaggio. La durata dell'intervento è funzione delle caratteristiche tecniche del materiale geotessile.



**Figura 4.1.21:** Barriera con Geocontainers. La struttura è simile a quella con Geotubi, ma le dimensioni degli elementi sono maggiori.



**Figura 4.1.22:** Barriere con tubi Longard. Un tubo Longard è una struttura con un doppio strato in geotessuto, costituito da polietilene impermeabile, con un diametro di 1-1,8 metri ed una lunghezza di 100 metri. Per il riempimento dell'involucro vengono realizzati due fori di 50 cm di diametro muniti di flangia. Il tubo viene esteso per la sua intera lunghezza e riempito idraulicamente con sabbia prelevata in sito, dopodiché i fori vengono sigillati.

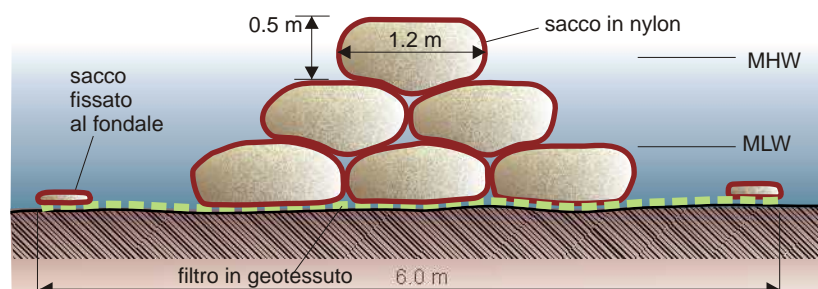


## Descrizione e caratteristiche

### Barriere con sacchi geotessili

Sono costituite da sacchi in geotessuto, pesanti ciascuno circa 50 kg, riempiti con sabbia e successivamente ammassati l'uno sull'altro. Alla base della struttura è prevista la posa di uno strato di materiale filtrante per limitare l'entità degli assestamenti. In genere tali barriere vengono predisposte a protezione di tratti costieri soggetti ad onde di moderata intensità.

**Figura 4.1.23:** Sezione di una barriera con sacchi geotessili. Tali strutture costituiscono una difesa temporanea (durata massima 5 anni) a causa della ridotta resistenza meccanica dei sacchi ed al loro degrado dovuto all'esposizione ai raggi solari.



## Barriere galleggianti

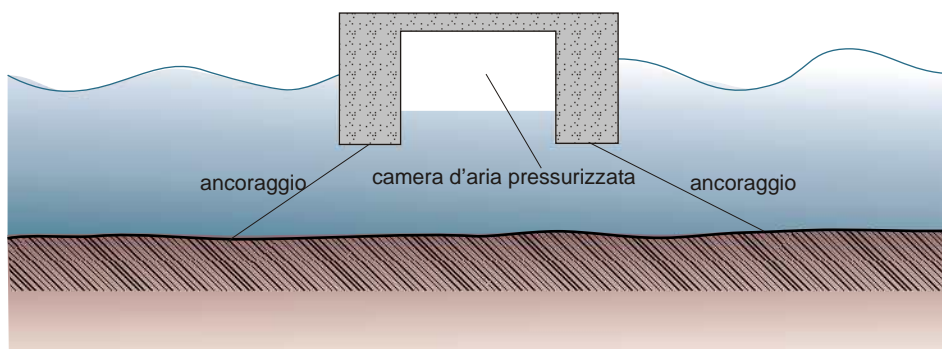
Tra i sistemi non convenzionali di protezione delle coste e dei porti vanno annoverate le barriere galleggianti, che si differenziano da quelle emergenti per non essere poggiate direttamente sul fondale, al quale sono vincolate da catene ed ancoraggi di varia natura.

Il principio di funzionamento è basato sulla dissipazione per parziale riflessione e frangimento dell'energia ondosa. Parte dell'energia è comunque trasmessa nella zona protetta per passaggio al di sotto e al di sopra della barriera o tramite il suo moto oscillatorio.

Le applicazioni più frequenti si hanno in acque profonde. Il miglioramento della capacità di attenuazione del moto ondoso si consegue con l'utilizzo di sezioni d'opera trasversali di dimensioni significative, paragonabili alla lunghezza d'onda incidente.

La rapidità dell'installazione rende queste opere idonee per interventi d'emergenza e di difesa temporanea. Tra le soluzioni più moderne va citata quella costituita da due pontoni laterali di galleggiamento, con l'interposizione di una camera ad aria compressa, che consente di cambiare il periodo di risonanza della struttura al variare della pressione dell'aria.

**Figura 4.1.24:** Barriera galleggiante con camera d'aria. La camera, con aria pressurizzata all'interno, consente alla barriera di adattarsi alle caratteristiche locali del moto ondoso.



Un'altra possibilità è rappresentata dall'Halo Ocean Wave Attenuator, dispositivo costituito da pannelli lineari verticali in polietilene, collegati reciprocamente mediante cavi elastici. I connettori circolari presenti al centro di ogni fila collegano i pannelli tra loro e consentono alle forze esercitate sul modulo Halo di essere trasferite ai cavi che assorbono l'energia riducendo notevolmente lo sforzo sulla struttura stessa.

La struttura modulare, capace di assorbire e dissipare correnti e onde, mantiene costante il livello dei sedimenti presenti, previene eventuali fenomeni erosivi e tende a favorire l'accrescimento della spiaggia.

Le diverse unità sono regolate in modo tale da ridurre l'altezza delle onde in funzione del periodo: del 50 % per quelle con periodo maggiore o uguale a 10 secondi, dell'80 % per quelle con periodo compreso tra 5 e 10 secondi. L'unità Halo, garantendo un continuo ricambio d'acqua, favorisce anche il mantenimento di un ambiente adatto per organismi marini. Le unità possono essere ancorate al fondale con pesi morti, pali o ancore.

**Figura 4.1.25:** Halo Ocean Wave Attenuator. Barriera galleggiante costituita da pannelli modulari che possono essere montati rapidamente.





## Barriere sommerse o soffolte

Una barriera soffolta risulta emergente in condizioni di bassa marea, mentre abitualmente la sua sommità si trova ad una profondità maggiore di 0,5 metri rispetto al l.m.m. Essa è formata da una struttura in massi naturali o in elementi artificiali, impostata su fondali poco profondi, disposta parallelamente alla linea di spiaggia.

Per quanto riguarda i materiali e le tipologie costruttive, possono essere adottate soluzioni analoghe a quelle delle barriere emergenti o dispositivi di nuova concezione.

Le barriere sommerse non ostacolano significativamente il ricambio delle acque, e quindi hanno un limitato impatto sulla qualità delle acque, aspetto particolarmente importante in mari con una ridotta escursione di marea quale il Mediterraneo. Inoltre, esse trattengono i sedimenti mobilizzati sul fondo, inibendone il trascinarsi sia verso il largo sia verso riva; sono quindi più indicate per la conservazione di spiagge naturali o oggetto di ripascimento che per la difesa di litorali in erosione. Il loro impiego risulta più utile nei casi in cui si voglia evitare la formazione dei tomboli.

Gli effetti della riduzione della energia ondosa prodotti dalle barriere sommerse si attenuano all'aumentare del battente d'acqua (aumento della profondità al di sopra del coronamento) e al ridursi della larghezza di berma.

In alcuni casi è stato osservato che le barriere soffolte possono modificare notevolmente il profilo della spiaggia, approfondendo il tratto di fondale compreso tra il piede della struttura e la profondità di chiusura, verso il largo. Il processo è stato documentato nel tratto di litorale toscano prospiciente Massa Carrara, e può essere attribuito all'esistenza di correnti dirette verso il largo, oltre che alla parziale riflessione dell'onda sulla barriera.

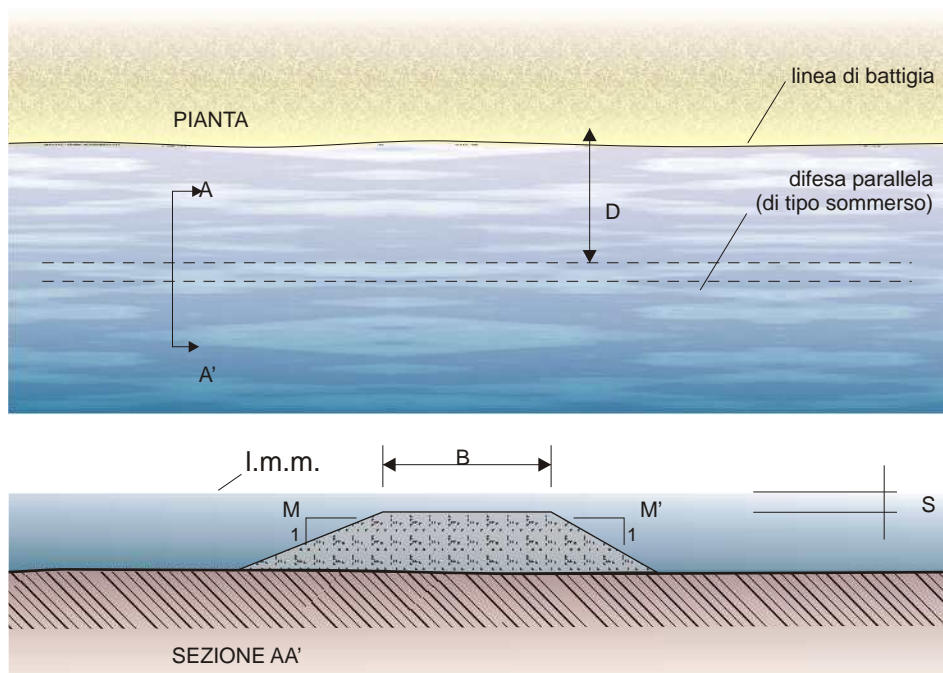
Dal punto di vista ecologico va sottolineato che le opere rigide rappresentano un substrato roccioso, che è un habitat ottimale per la colonizzazione delle comunità sessili. Questo fenomeno, osservabile in molte scogliere è stato studiato in dettaglio lungo la barriera soffolta costruita a protezione del settore centrale del litorale di Ostia nell'ambito di progetti finanziati dalla Comunità Europea (DELOS in particolare).

Per lo svolgimento della balneazione e della navigazione sono necessarie boe, pali o isolotti di segnalazione e varchi di passaggio.

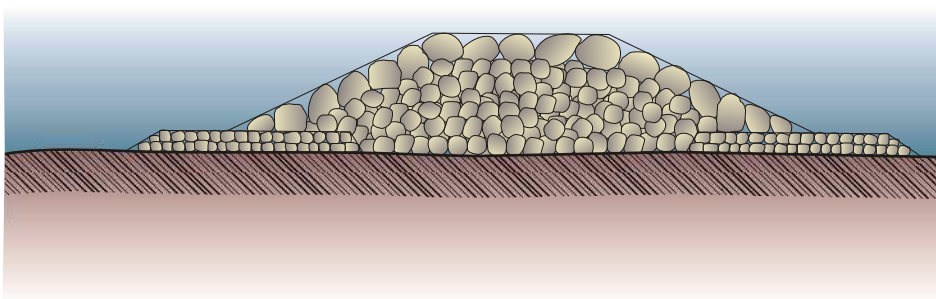
**Figura 4.1.26:** Dimensionamento delle barriere frangiflutti sommerse. Tale sistema di difesa riduce la possibilità di formazione di tomboli e mitiga gli effetti negativi sulla riva sottoflutto.

Legenda:

- S Sommergenza  
(>0.50 - 1.00 m)
- B Larghezza in cresta  
(4 - 20 m)
- M Pendenza del paramento lato mare (da 1 a 2)
- M' Pendenza del paramento lato spiaggia (da 1 a 1.5)



**Figura 4.1.27:** Schema tipico di una barriera sommersa o soffolta. La funzione principale di quest'opera è quella di diminuire l'intensità del moto ondoso, trattenendo il materiale sabbioso a tergo e rimanendo comunque non visibile.



**Figura 4.1.28:** Barriere sommerse. Le barriere sommerse possono rappresentare un ostacolo per la navigazione e la balneazione, pertanto necessitano di appositi dispositivi di segnalazione.



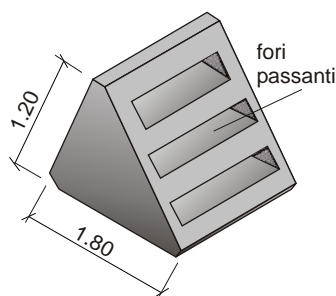
**Figura 4.1.29:** Le barriere sommerse, a differenza di quelle emerse, smorzano le onde solo parzialmente ma consentono un miglior ricambio delle acque. Vengono spesso costruite in combinazione con interventi di ripascimento e sistemi di pennelli, per la creazione di vere e proprie celle rettangolari che contribuiscono ad un miglior trattenimento dei sedimenti in prossimità della linea di riva.



**Figura 4.1.30:** Barriere soffolte. Le strutture possono emergere durante i periodi di bassa marea. Talvolta vengono disposte in alternanza con barriere emerse, ma più comunemente vengono realizzate per unire le testate di pennelli in pietra in nell'ambito di interventi di ripascimento.



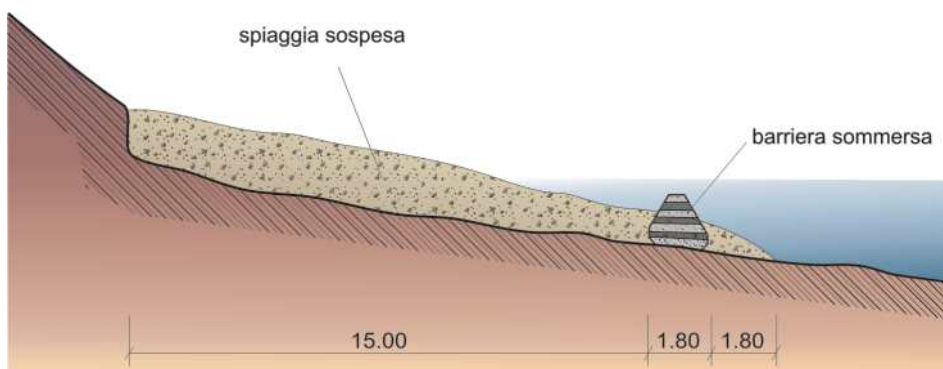
## Descrizione e caratteristiche



**Figura 4.1.31:** Elemento modulare Surgebreaker. E' utilizzato per proteggere spiagge naturali ed artificiali con provate caratteristiche di efficacia e durabilità, grazie alla sua capacità di ridurre la riflessione e l'energia ondosa trasmessa.

## Barriera sommersa con moduli Surgebreaker

Questo tipo di barriera è costituito da moduli prismatici con base quadrata e sezione trasversale approssimativamente triangolare; gli elementi in calcestruzzo hanno dimensioni modeste (1,2 m x 1,8 m di base x 1,2 m d'altezza) e presentano fessure orizzontali di spessore variabile per dissipare ulteriormente l'energia delle onde, ridurre i fenomeni di riflessione e limitare l'erosione al piede. Nel caso più frequente essa viene impiegata come soglia di sostegno di spiagge sabbiose o ghiaiose, naturali o artificiali. Gli elementi di cemento armato fibrorinforzato, del peso di circa 2 tonnellate, vengono accostati e collegati in serie su bassi fondali (tra 1 e 3 metri di profondità).

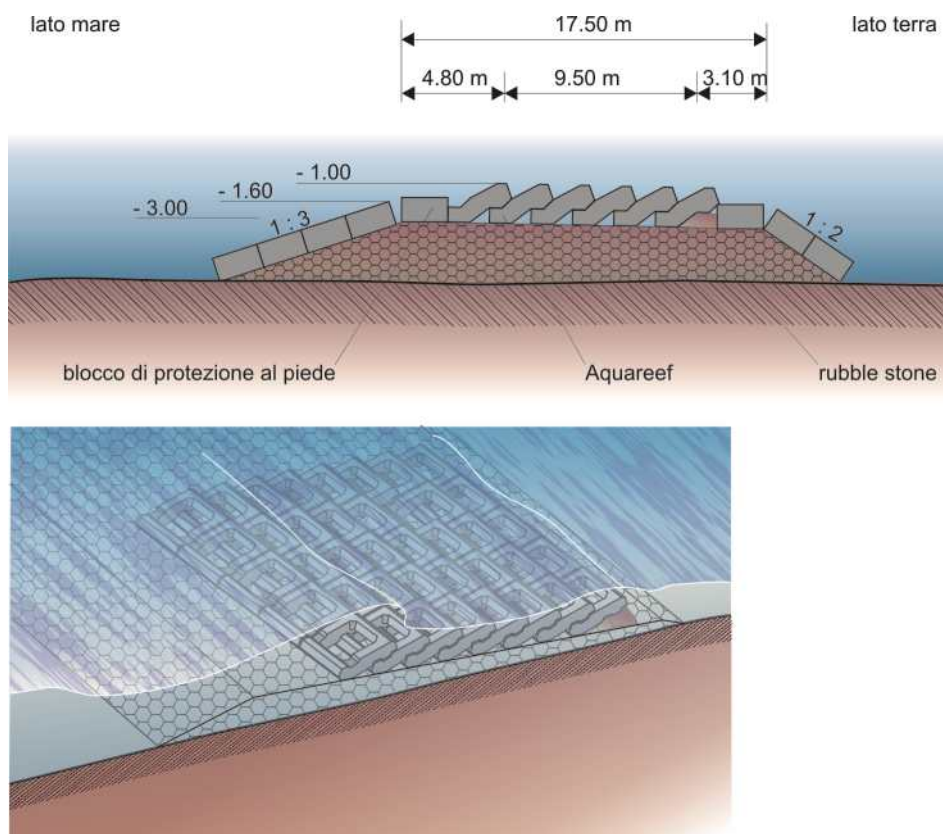


## Descrizione e caratteristiche

## Barriera con moduli Aqua-Reef (Aqua Blocks)

È costituita da una serie di piastre cave, in cemento armato, appoggiate l'una all'altra, in posizione inclinata su uno scanno in pietrame. Il suo utilizzo comporta la formazione graduale di un tombolo nella zona retrostante la struttura, a causa della ridotta agitazione ondosa a tergo.

**Figura 4.1.32:** Moduli Aqua-Reef. La configurazione dell'intera struttura deve essere tale che le singole unità siano inclinate lungo la direzione da cui proviene il fronte d'onda principale, in modo da far rallentare le onde e trattenere a tergo il materiale trasportato.





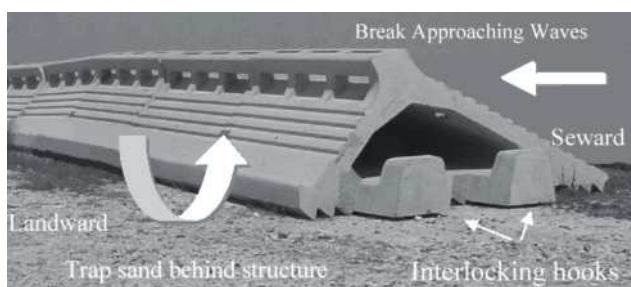
### Descrizione e caratteristiche

## Barriera con modulo prefabbricato Beachsaver Forte

È una barriera in cemento armato speciale, ad alta densità, ed elevata resistenza all'impatto e all'attacco chimico delle acque marine.

Tale struttura viene normalmente utilizzata a protezione di ripascimenti artificiali. La solidarizzazione tra le diverse unità riduce il rischio di scalzamento. La sezione trasversale presenta paramenti di pendenza diversa, con una maggiore inclinazione sul lato rivolto verso terra, dove sono presenti setti forati che favoriscono il contenimento dei sedimenti. Sul lato mare la minore pendenza del paramento favorisce l'apporto di sedimenti, mentre la presenza di ondulazioni aumenta il potere dissipativo della struttura.

Questa struttura assolve anche una funzione ecologica, offrendo un riparo alla popolazione ittica all'interno delle cavità.



**Figura 4.1.33:** Modulo "Beachsaver Forte". Il lato mare della struttura è reso scabro dalla presenza di una serie di scanalature orizzontali aventi la funzione di disperdere l'energia dell'onda, mentre il lato terra, grazie alla sua elevata pendenza, consente alla sabbia di restare intrappolata dietro la barriera. La presenza del gradino superiore con fessure consente una canalizzazione dei flussi di acqua derivanti dalle onde incidenti, con successiva deposizione della sabbia trasportata. Questo effetto è tanto più marcato quanto più aumenta l'energia delle onde (es. mareggiate e tempeste).

### Descrizione e caratteristiche

## Barriera a cassone

Sono costituite da strutture discontinue di cassoni in calcestruzzo armato che possono essere trasportati in galleggiamento ed affondati per creare una barriera sommersa. La loro funzione è quella di intercettare e stabilizzare i sedimenti mobilizzati dall'azione delle onde.

In commercio esistono cassoni prefabbricati di differenti misure, anche se i più utilizzati presentano larghezza 1,5 m, altezza circa 0,8 m e lunghezza 2,8 m. Ogni cassone pesa circa 2,3 tonnellate ed è costruito in cemento armato rinforzato. Due fori di 10 cm di diametro sono presenti sul fondo della scatola, chiusi con un tappo di piombo. Il tappo viene tolto per affondare il cassone e permettere la sua messa in opera.

Le casse devono essere posizionate in modo tale da essere superate dalle onde in condizioni di alta marea, al fine di permettere il loro riempimento da parte della sabbia in movimento. La loro applicazione è indicata in paraggi non molto esposti.

**Figura 4.1.34:** Barriere a cassone. Strutture in cemento preparate a riva per essere poi affondate in corrispondenza del sito previsto, in genere non molto lontano dalla riva.



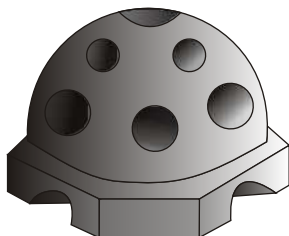
## Generalità

# Scogliere artificiali sommerse

Tali strutture vengono realizzate con blocchi di calcestruzzo di varie dimensioni e forme, aventi la funzione di proteggere a tergo la spiaggia e di favorire al tempo stesso lo sviluppo di habitat per la vita di organismi marini, grazie alla presenza di fori e/o cavità.

**Figura 4.1.35:** Le scogliere sommerse possono essere realizzate con unità di varie forme. La struttura e la disposizione dei singoli elementi contribuisce a trattenere materiale sabbioso e offre un riparo per organismi marini.

Moduli a forma di "Domo"  
La base ha un diametro di 17 piedi, mentre l'altezza è 3 piedi. Questi possono essere disposti assieme a formare una scogliera sommersa (1 piede ~ 30 cm)



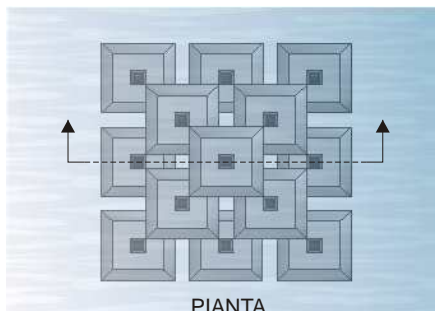
## Descrizione e caratteristiche

### Barriera sommersa con moduli Nettuno-Acquatecno

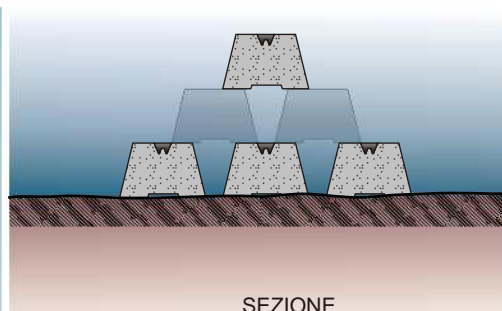
La struttura con moduli Nettuno-Acquatecno è caratterizzata da blocchi troncopiramidali di calcestruzzo, di dimensioni di 2,4 m x 2,4 m x 1,5 m, che presentano alveoli e cavità passanti.

La loro finalità è quella di costituire una difesa per le spiagge in arretramento e allo stesso tempo svolgere una funzione ecologica di rifugio per pesci.

**Figura 4.1.36:** Moduli Nettuno-Acquatecno. Disposizione planimetrica e sezione tipo. La duplice funzione di questi elementi si esplica attraverso l'impiego di barriere sommerse che, con opportune aggregazioni multiple, offrono supporto per molluschi e riparo per pesci e favoriscono l'intrappolamento di sabbie.



PIANTA



SEZIONE

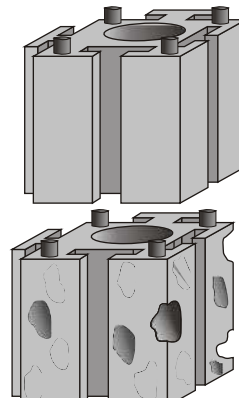
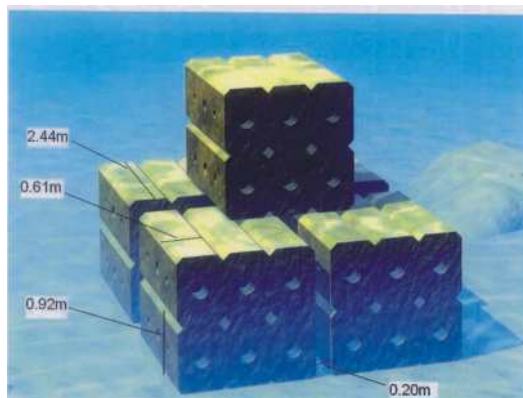
## Descrizione e caratteristiche

### Barriere con Reef Blocks

Si tratta di una scogliera semi-emergente, costituita da elementi di forma cubica in cemento armato (Reef Blocks) posizionati in due strati: il modulo base per la costruzione è di 5 unità, quattro costituenti la base ed una la sommità.

L'applicazione di questa struttura ha mostrato buoni risultati, soprattutto in zone con forti escursioni di marea. La sua funzione ecologica è significativa, poiché può essere facilmente colonizzata da varie specie animali, che possono annidarsi nelle cavità all'interno dei blocchi o negli interstizi tra i diversi elementi.

**Figura 4.1.37:** Reef Blocks. I moduli vengono disposti in modo da formare una struttura su più livelli. In genere, la struttura è costituita da una base con 4 elementi ed una unità superiore.



### Descrizione e caratteristiche



## Reef Balls

Sono strutture in calcestruzzo di varie dimensioni, impiegate come ausilio nel controllo dell'erosione costiera, ma utilizzate anche per migliorare l'habitat e la biodiversità dell'ambiente marino. I singoli elementi hanno una forma caratteristica simile ad un igloo e vengono posizionate in fondali con sabbie o praterie algali marine.

La forma a campana e la superficie costellata di molti fori di varie dimensioni favoriscono la colonizzazione da parte di varie specie, oltre a trattenere una certa quantità di sedimenti.

**Figura 4.1.38:** Unità Reef Ball. L'elemento ha una doppia funzione: trattenere sabbia in prossimità del litorale e favorire lo sviluppo di habitat idonei per gli organismi marini.

Sono di facile realizzazione e di semplice installazione, poichè il trasporto avviene trainando gli elementi con un'imbarcazione, utilizzando un galleggiante gonfiabile.

### Descrizione e caratteristiche

## Electrochemical Reef

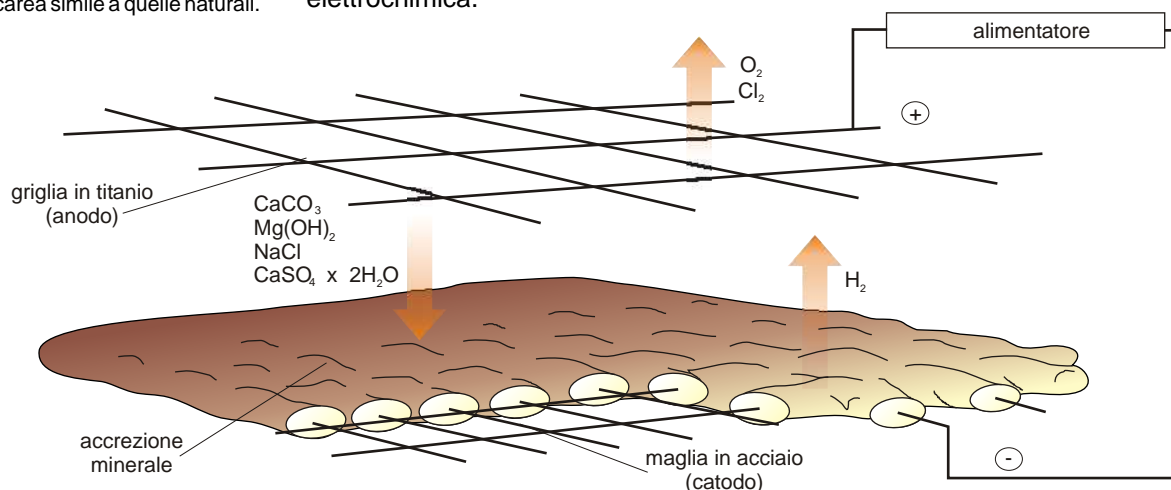
Tali strutture, utilizzate in acque poco profonde, oltre alla protezione della costa nei confronti dell'erosione, assicurano una funzione ecologica ed ambientale, favorendo la formazione di una vera e propria scogliera. In particolare, la tecnica di costruzione mediante elettrolisi consente di usare i minerali disciolti nelle acque per la costruzione in sito di un substrato semiartificiale: ioni calcio e ioni magnesio possono essere fatti precipitare su un catodo, mediante la connessione ad un generatore di corrente (DC). Il materiale aggregatosi è costituito da croste compatte di aragonite e brucite, che mostrano caratteristiche simili a quelle delle scogliere calcaree. Esse rappresentano, dal punto di vista ecologico, opere in materiali quasi naturali e dal costo relativamente contenuto, con risultati tanto più rapidi quanto maggiore è il contenuto di calcio e magnesio delle acque.

I vantaggi di tali strutture realizzate per via elettrochimica sono:

- Il ridotto impiego di materiali estranei alla spiaggia;
- la necessità di basse quantità di materiali da costruzione, che è spesso necessario trasportare per grandi distanze;
- la possibilità che gli eventuali danni dell'opera sommersa siano riparati mediante successive connessioni al generatore di corrente (DC);
- la possibilità che l'intera costruzione venga dissolta invertendo la polarità degli elettrodi, ove necessario.

**Figura 4.1.39:** Schema applicativo per la realizzazione di una "Electrochemical Reef". Si può notare che applicando un potenziale elettrico tra una griglia in titanio (anodo) e una griglia in acciaio (catodo), attraverso l'elettrolisi, si aggregano composti di calcio e magnesio dando origine ad una vera e propria scogliera calcarea simile a quelle naturali.

Le croste formatesi per via elettrochimica possono essere rinforzate ed accresciute da prodotti del carbonato di calcio di origine biogenica. Gli animali con scheletro calcareo e le alghe colonizzano, infatti, rapidamente la struttura in aragonite e la loro armatura viene cementata dall'effetto della precipitazione elettrochimica.





### Generalità

**L**e opere trasversali sono costituite da strutture posizionate obliquamente rispetto alla linea di riva, con lo scopo di proteggere la costa intercettando le correnti litoranee, in modo da contrastare i fenomeni erosivi in atto.

Esse inducono anche una riduzione dell'energia delle correnti marine costiere ed una parziale attenuazione del moto ondoso.

Tali strutture possono essere isolate o costituire un sistema complesso, come ad esempio nel caso di una serie di pennelli (sistema o campo di pennelli). Le loro caratteristiche geometriche possono essere diverse, a seconda del contesto in cui si interviene, sia per quanto riguarda le dimensioni, sia per l'andamento (profilo rettilineo o curvo), che per la continuità spaziale.

La riduzione del trasporto litoraneo, ottenuto attraverso queste tipologie d'opera, ha come scopo principale una migliore distribuzione dei sedimenti sul litorale, finalizzato alla stabilizzazione della spiaggia.

Il rallentamento della corrente, sia in termini di trasporto dei sedimenti che di ricambio delle acque, ha ripercussioni dirette e indirette sul regime delle spiagge sottoflutto, e quindi il ricorso a questo tipo di opere può avvenire solo dopo un'attenta progettazione e valutazione del rapporto costi/benefici.

In base alle tipologie d'opera più comunemente realizzate, i pennelli possono essere suddivisi nelle seguenti classi:

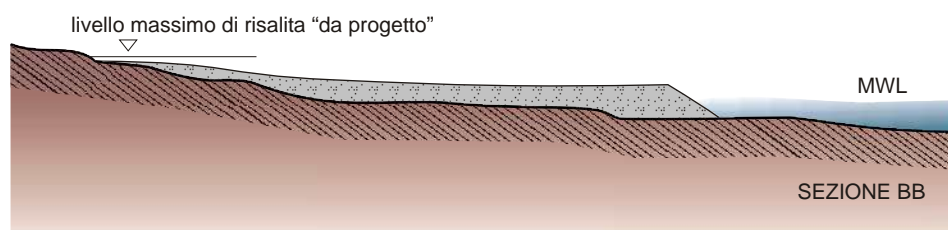
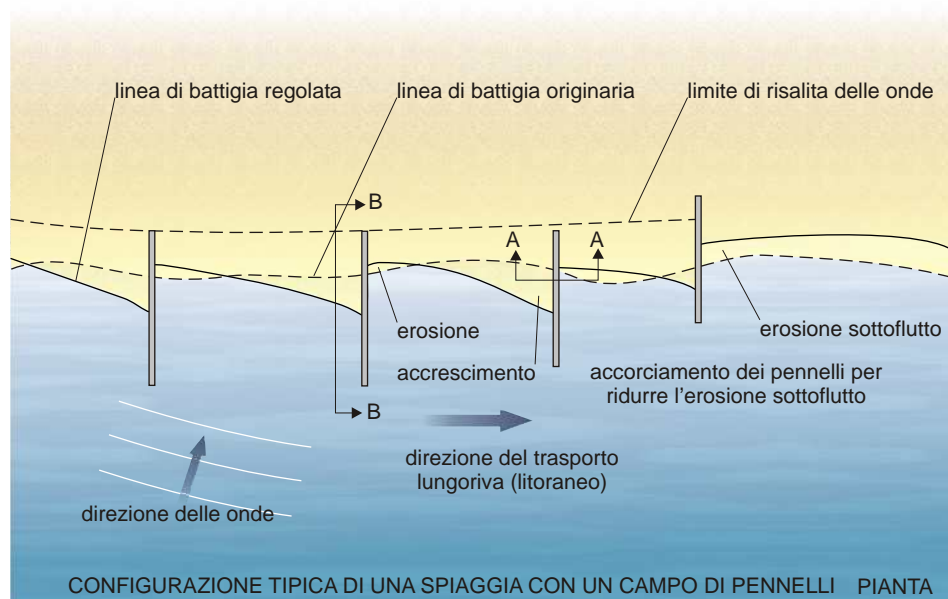
- **Pennelli impermeabili**
- **Pennelli permeabili**
- **Pennelli sommersi**
- **Pennelli compositi**
- **Pennelli di transizione**
- **Headlands**

**Figura 4.2.1:** Capo d'Orlando (ME) Campo di pennelli. Una spiaggia protetta con tale sistema viene modellata dalla interazione tra le singole strutture e le correnti litoranee, assumendo, col passare del tempo, una caratteristica conformazione dentellata.

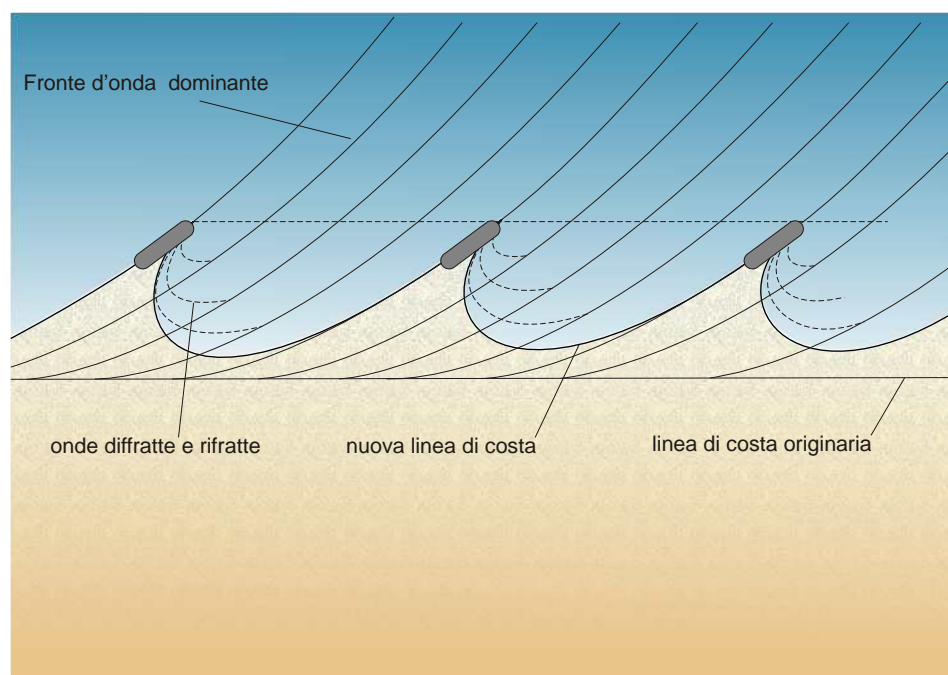


I pennelli sono strutture direttamente radicate a terra, con asse in direzione perpendicolare alla spiaggia, mentre gli headlands sono strutture posizionate anche a distanza dalla costa, con fronte rivolto verso la direzione predominante del moto ondoso.

**Figura 4.2.2:** Esempio di "campo di pennelli". Un sistema di pennelli può favorire la formazione di una spiaggia solamente se le onde e le correnti trasportano una sufficiente quantità di sedimenti. Per ridurre l'erosione sottoflutto, gli elementi terminali di ogni campo di pennelli devono essere progressivamente accorciati.



**Figura 4.2.3:** Esempio schematico di modifica della direzione della linea di spiaggia dopo la realizzazione di headlands. La struttura è localizzata a distanza dalla costa in posizione tale da favorire la formazione di un tombolo. Sul lato di sottoflutto della struttura, le onde diffratte e rifratte potranno determinare la formazione di una spiaggia con configurazione curvilinea che segue l'andamento dei fronti d'onda. Con una serie di strutture si formerà una linea di costa a forma dentellata.



Pennelli singoli o sistemi di pennelli vengono adottati come opere di difesa, quando la spiaggia è interessata da predominante trasporto longitudinale. L'effetto di un pennello è quello di intercettare una parte o la totalità del trasporto lungo riva e formare un accumulo sul lato sopraflutto. La capacità di attenuazione del moto ondoso e di intercettazione di sedimenti dipendono dalle dimensioni (altezza e lunghezza) della struttura.

La lunghezza di un pennello va determinata in base all'allineamento che si vuole attribuire alla futura spiaggia, tenuto presente che la linea di riva tenderà a disporsi perpendicolarmente alla risultante annua del moto ondoso. La lunghezza dipende inoltre dall'estensione della zona dei frangenti e dalla quantità di sedimento che si vuole intercettare.

In zone dove non è necessario mantenere un apporto di sedimenti sottoflutto, i pennelli possono essere costruiti con quota di coronamento e lunghezza sufficiente per bloccare completamente lo spostamento di materiale sabbioso nella zona d'influenza dell'opera. Dove invece sussiste la necessità di mantenere un apporto sottoflutto, i pennelli possono essere costruiti a pelo d'acqua e di lunghezza ridotta.

Nel dimensionamento di un pennello va considerato che la parte più esposta della struttura è quella di testata, che si trova ad assorbire il primo urto dell'onda incidente; la radice è meno sollecitata anche perché una parte dell'energia residua dell'onda va perduta per fenomeni di interazione col fondo. La testata va, quindi, dimensionata adeguatamente, in relazione sia alla morfologia del fondale, sia alla forma e dimensione dei blocchi utilizzati. Il corpo del pennello, procedendo verso terra può divenire più esile, mentre il manto di protezione laterale può essere asimmetrico con il lato più resistente verso la direzione prevalente di provenienza dell'onda.

**Figura 4.2.4:** Paola (CS). Campo di pennelli a T. Quest'opera trasversale composita, a "T" svolge una duplice funzione, che si esplica attraverso l'azione di contrapposizione alle onde incidenti della testata del pennello e la creazione di una zona di calma nel lato sopraflutto con deposito di sedimenti.



**Figura 4.2.5:** Marina di Massa (MS). Le strutture sono disposte in serie e variano in lunghezza da 30 metri a 100 metri, estendendosi dal retrospiaggia alla prima linea dei frangenti. La spaziatura dei pennelli deve essere abbastanza ampia da evitare lo scalzamento ai fianchi, ma abbastanza ridotta da costituire una trappola per i sedimenti.

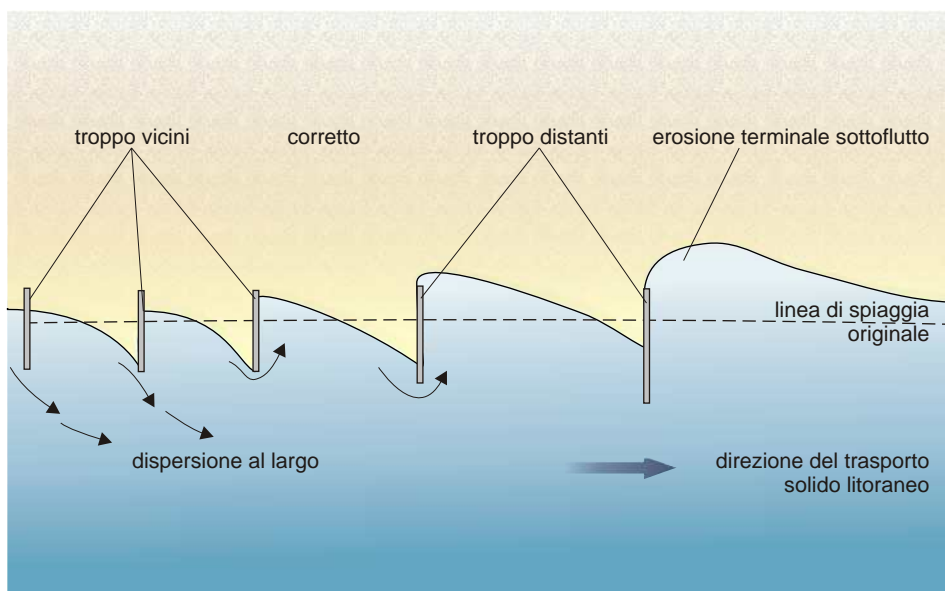


**Figura 4.2.6:** Fiumicino (RM). Spiaggia protetta da un campo di pennelli con antistante barriera sommersa.





**Figura 4.2.7:** Relazione tra la spaziatura dei pennelli e l'andamento del profilo costiero. Il fattore importante è la spaziatura dei pennelli, dimensionata in funzione della loro lunghezza, dell'allineamento previsto per la fascia di accrezione e della portata solida in transito. La lunghezza e la spaziatura devono essere correlate cosicché quando il pennello precedente è "pieno", la fascia di materiale sul lato sopraflutto di ogni pennello raggiungerà la base dell'adiacente pennello sottoflutto con un sufficiente margine di sicurezza per mantenere l'ampiezza minima della spiaggia, oppure per prevenire attacchi al fianco del pennello sopraflutto.



**Figura 4.2.8:** Ladispoli (Roma). Campo di pennelli a protezione del litorale. Quando la difesa costiera è costituita da un sistema di pennelli, la costruzione deve iniziare dal primo pennello lato sottoflutto, per poi proseguire in successione, verso il lato sopraflutto, dando il tempo ai sedimenti di riempire l'area desiderata. L'evoluzione che induce questo sistema nella linea di battigia e nell'andamento dei fondali antistanti è tale da far diminuire il trasporto litoraneo, poiché si riduce l'angolo tra il fronte d'onda e la linea di riva.



**Figura 4.2.9:** Vista verso mare di un pennello in pietrame. I pennelli in massi naturali agiscono come strutture di intercettazione e deviazione dei flussi litoranei, provocando una netta differenziazione evolutiva tra i due tratti di costa adiacenti ad esso.



# Pennelli impermeabili

**S**ono strutture trasversali che agiscono in modo analogo alle barriere e non consentono il passaggio di sabbia ed acqua, favorendo fenomeni di deposizione sopraflutto e di erosione sottoflutto.

I pennelli impermeabili hanno la funzione principale di stabilizzare le spiagge sabbiose attraverso il mantenimento di un ben determinato profilo costiero.

A seconda della loro lunghezza, essi possono rallentare o impedire il flusso longitudinale di sedimenti, ma determinano di conseguenza il depauperamento della spiaggia sottoflutto. Inoltre, se le caratteristiche dell'opera non sono ottimali, possono originarsi delle *rip-currents*, nel settore sopraflutto, che possono provocare perdita di sedimento verso il largo.

I pennelli impermeabili di più frequente utilizzo sono realizzati secondo le seguenti tipologie:

- **Pennelli in massi naturali con nucleo in tout-venant**
- **Pennelli in legno trattato**
- **Pennelli crib**
- **Pennelli con sacchi di sabbia**
- **Pennelli con tubi Longard**

## Descrizione e caratteristiche

### Pennelli in massi naturali con nucleo in tout-venant

Sono strutture costituite da un nucleo di materiale fine di cava (tout-venant), che le rende impermeabili, ricoperto da uno o più strati di massi naturali o artificiali che sono esposti all'impatto delle onde incidenti.

I pennelli in massi naturali vengono usati per stabilizzare la linea di spiaggia o rallentarne la velocità di erosione, anche in combinazione con versamenti diretti di sabbia. Il loro utilizzo è preferibile in paraggi esposti, grazie alla capacità di opporsi a forti azioni ondose, di limitare i fenomeni di riflessione, di ridurre il rischio di erosione al piede della struttura e la formazione di vortici nei pressi della stessa.

**Figura 4.2.10:** Vista verso terra di un pennello in pietrame. Nella costruzione di un pennello in massi naturali, l'ammorsamento nella zona di retrospiaggia avviene dopo la fase di scavo della testata lato terra. La presenza di un nucleo in tout-venant garantisce un assestamento dei massi di grandi dimensioni, disposti con mezzi meccanici, in modo da formare un solido incastro e dare una conformazione uniforme all'opera.

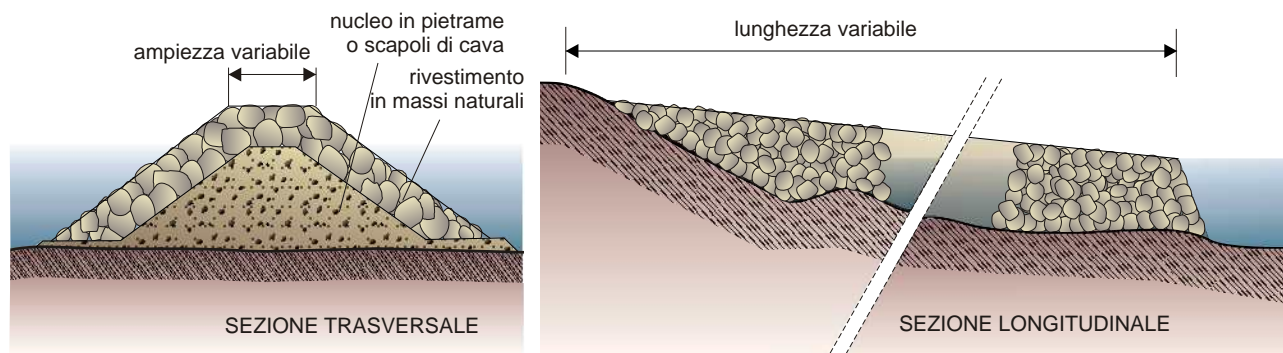




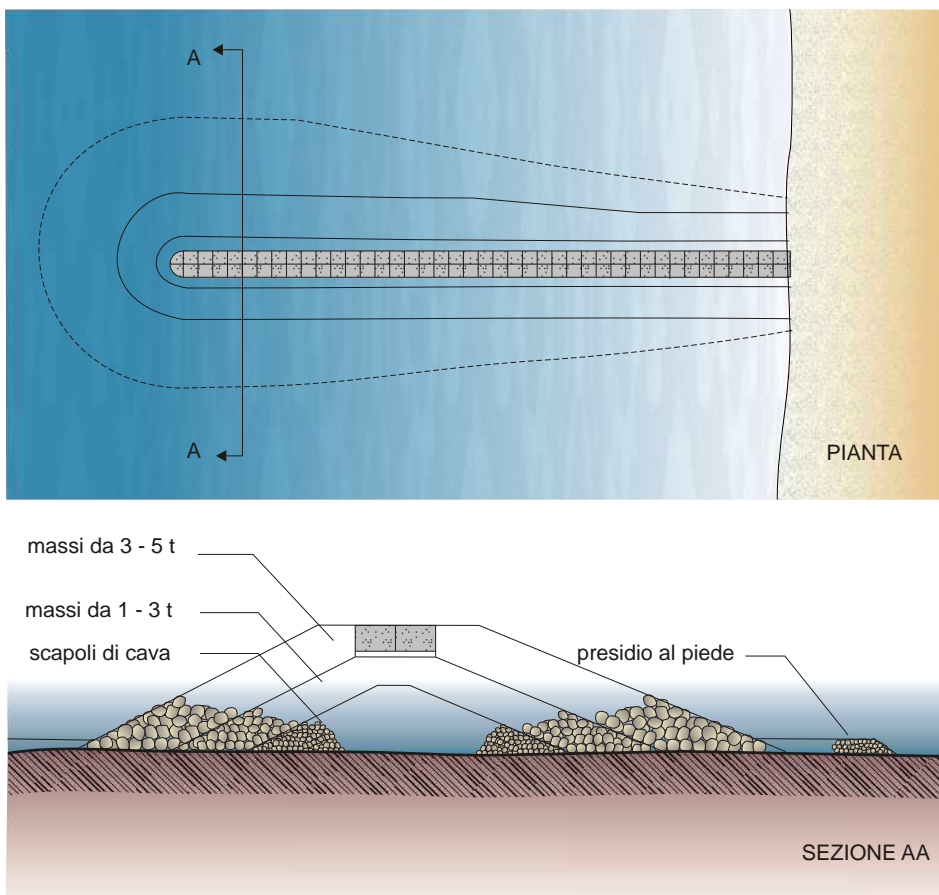
**Figura 4.2.11:** Ladispoli (Roma). Pennello in massi naturali. I pennelli, oltre ad ostacolare il naturale flusso delle correnti litorali, si oppongono direttamente anche, in alcuni paraggi, al moto di onde con fronte incidente obliquo rispetto alla costa.



**Figura 4.2.12:** Pennello con mantellata in massi naturali. La disposizione degli elementi costituenti lo strato più esterno deve avvenire secondo una configurazione che sia più omogenea possibile. Dimensioni e dettagli devono essere determinati in base alle condizioni del sito, in particolare in base alle condizioni ondose incidenti.



**Figura 4.2.13:** Sanremo. Pennello multistrato in massi naturali. Viene realizzato in paraggi esposti ad onde violente e con correnti di elevata intensità e capacità di trasporto. Tra la mantellata ed il nucleo è presente uno strato filtro intermedio. Tale strato impedisce l'asportazione del materiale fino costituente il nucleo della scogliera.





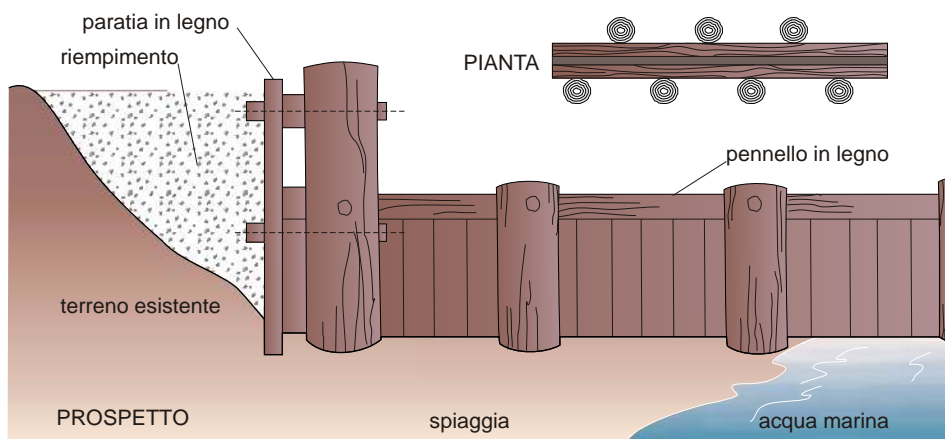
### Descrizione e caratteristiche

## Pennelli in legno trattato

I pennelli in legno trattato hanno una struttura sostenuta da pali, di adeguato diametro, infissi nel terreno. Ai pali sono fissate delle tavole incastrate tra di loro. Il legname può essere utilizzato previo trattamento ad alte pressioni con creosoto e catrame, per resistere alle condizioni proprie dell'ambiente marino.

Sono indicati per spiagge che necessitino di una rapida protezione.

Nel caso di deterioramento essi possono essere facilmente ristrutturati con l'uso di legname trattato, o modificati nella configurazione planimetrica (ad es. allungati).

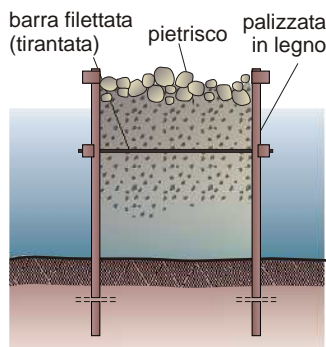


**Figura 4.2.14:** Pennello impermeabile con tavole e pali in legno trattati. Questo tipo di struttura è indicato per paraggi non soggetti a forte ondatazione e necessita di una buona infissione degli elementi nella sabbia e di un buon trattamento impermeabilizzante per il legname.

### Descrizione e caratteristiche

## Pennelli crib

Sono costituiti da una doppia fila di pali in legno collocati in modo da comporre una struttura "a scatola", riempita con sabbia, ghiaia, o pietrame, avendo cura di disporre uno strato superiore di massi di grandi dimensioni, opportunamente proporzionati in modo da prevenire l'asportazione del materiale più fine sottostante. I pali devono essere assicurati insieme con barre in ferro ma, come quelli in legno trattato devono essere spinti a profondità tale da non essere scalzati; in ogni caso, possono essere impiegati solo su fondali costituiti da materiali a granulometria medio-fine e non molto addensati.



**Figura 4.2.15:** Pennello crib. I pali sono posizionati ad una certa distanza, in modo da formare una struttura di alloggiamento per vari materiali di riempimento.

### Descrizione e caratteristiche

## Pennelli con tubi Longard

Un pennello di tipo "Longard" è costituito da un tubo in materiale sintetico di grandi dimensioni, disposto perpendicolarmente alla riva e riempito di sabbia, con lunghezza sino a 100 metri.

Per la costruzione dei pennelli, i tubi Longard devono essere sistemati su un tessuto filtrante, prima che avvenga il riempimento mediante sabbia. Il tessuto filtrante, infatti, aiuta a prevenire il cedimento dei tubi più grandi, che sono mantenuti in posizione da tubi più piccoli (di 25 cm di diametro) presenti ai lati, a protezione del filtro e per impedire eventuali rotolamenti.



**Figura 4.2.16:** Pennello con tubi Longard. I Longard sono applicati negli interventi a breve termine o nelle situazioni di emergenza, a causa della loro vulnerabilità al danneggiamento (ad esempio fori o lacerazioni nel tessuto con perdita del contenuto sabbioso).

## Pennelli permeabili

**S**ono strutture a corpo discontinuo che permettono il passaggio dei sedimenti, assorbendo nel contempo una parte dell'energia dell'onda incidente, con conseguente riduzione del trasporto solido litoraneo.

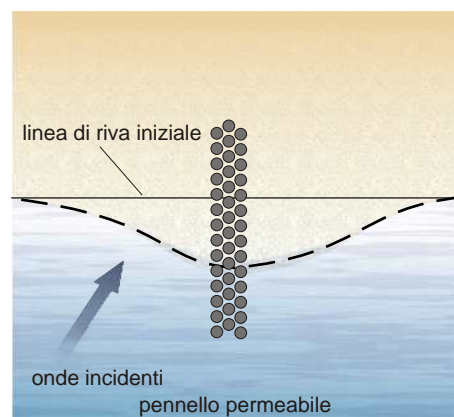
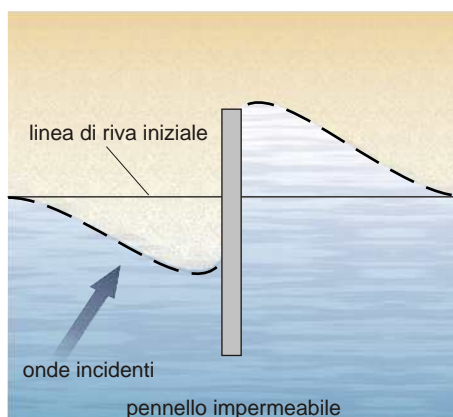
La struttura permeabile favorisce il mantenimento del profilo originale della spiaggia, smorzando l'energia dell'onda incidente senza annullarla del tutto, permettendo così la deposizione dei sedimenti su entrambi i lati dell'opera.

Il grado di permeabilità determina la distribuzione e la quantità di materiale che sedimenta nei limiti dell'area di influenza del pennello. Il dimensionamento di questo parametro è un problema particolarmente delicato: se la permeabilità è troppo elevata, l'opera potrà risultare inefficace, mentre se la struttura è troppo chiusa è possibile ricadere nei difetti propri dei pennelli a struttura continua (erosione sottoflutto).

I pennelli permeabili possono essere costruiti quando non si debba trattenere tutto il materiale in transito, sia per quanto riguarda l'erosione della spiaggia sottoflutto, sia nel caso in cui si possano verificare frequenti e significative inversioni della corrente lungo riva. La stessa soluzione attenua in parte anche il conseguente andamento a dente di sega della spiaggia, tenendo presente tuttavia che i pennelli permeabili possono essere resi impermeabili da alghe o materiali vari, trasportati dalla corrente, che possono intasarne i vuoti.

I pennelli permeabili di più frequente utilizzo sono: i pennelli in massi naturali e artificiali senza nucleo impermeabile; i pennelli con pali di legno distanziati e i pennelli con gabbioni.

**Figura 4.2.17:** Confronto tra l'applicazione di un pennello impermeabile e un pennello permeabile. Una difesa trasversale impermeabile comporta un aumento della dentellatura nell'andamento della spiaggia; una difesa trasversale permeabile consente un accrescimento della spiaggia più regolare.

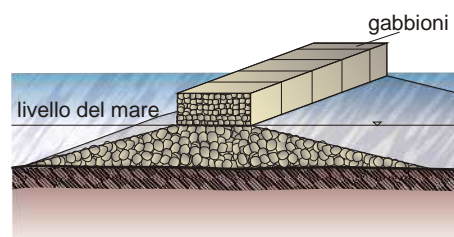


**Figura 4.2.18:** Pennello con palizzata in legname. L'utilizzo di una semplice struttura in legno, fa sì che grazie alla sua permeabilità non avvenga il fenomeno di dentellatura della linea di costa, con la formazione di un profilo costiero omogeneo, sia a monte che a valle dell'opera. Le strutture, una volta completate, agiscono deviando o intercettando le correnti lungo riva e, spesso, fornendo un ostacolo fisico al movimento del materiale di spiaggia. I limiti delle opere di difesa trasversali in pali di legno sono costituiti da una scarsa azione di barriera meccanica, dalla loro durata limitata e dagli alti oneri di manutenzione, nonostante il basso costo iniziale, e delle proprietà geologico-tecniche del substrato di incastro.



**Figura 4.2.19:** I pennelli in gabbioni sono costituiti da una fila di gabbioni metallici (in maglia metallica a doppia torsione) legati tra loro, riempiti con pietrame, e disposti (anche su più livelli) ortogonalmente alla costa. La parte verso terra del pennello deve essere fissata su un solido substrato di fondazione; la sua porzione superiore viene posta ad una quota all'incirca pari all'elevazione media della berna naturale. È richiesta inoltre un'adeguata protezione al piede della struttura, che può essere realizzata con materassi metallici riempiti anch'essi con pietrame.

I pennelli in gabbioni assorbono gradualmente l'impatto derivante dalla massa d'acqua e sono estremamente flessibili. Essi vengono realizzati in paraggi esposti ad onde di media energia, e risultano in parte permeabili all'acqua ed ai sedimenti trasportati dal moto ondoso.



## Pennelli sommersi

**S**ono opere radicate a riva, con sommergenza variabile, in funzione dei fattori locali che controllano i fenomeni erosivi, delle caratteristiche meteomarine e morfobatimetriche del sito.

Tali strutture non proteggono direttamente la spiaggia, ma condizionano rallentando il trasporto litoraneo, e consentono la formazione di locali accumuli sabbiosi e la generale diminuzione della pendenza della spiaggia sommersa. I pennelli sommersi consentono inoltre la sedimentazione di sedimenti provenienti dal largo nella zona protetta.

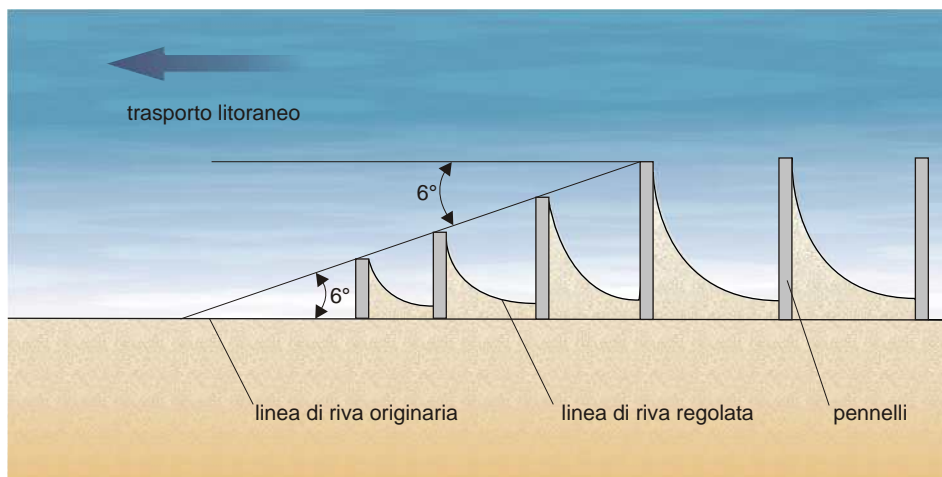
Talvolta, vengono impiegati in combinazione con barriere parallele (emergenti o sommerse) per realizzare ripascimenti protetti, oppure possono costituire un prolungamento sommerso di pennelli emersi.

## Pennelli di transizione

**P**er ridurre il problema dell'erosione nelle spiagge sottoflutto contigue ad una zona dove si è intervenuti con una serie di pennelli, si può realizzare un sistema, detto di transizione, composto da elementi disposti con lunghezze decrescenti nel verso del flusso litoraneo principale, secondo una linea ideale di inviluppo che forma un angolo di circa  $6^\circ$  con la riva.

Tale configurazione determina, con la sua disposizione a scalare, una zona di transizione tra il campo di pennelli principale e la spiaggia naturale contigua, che consente di evitare evidenti discontinuità nell'andamento della linea di riva.

**Figura 4.2.20:** Sistema di pennelli di transizione. Per consentire un maggior passaggio di sedimenti, la lunghezza e la spaziatura dei pennelli dovranno decrescere gradualmente nella stessa direzione della corrente litoranea principale.



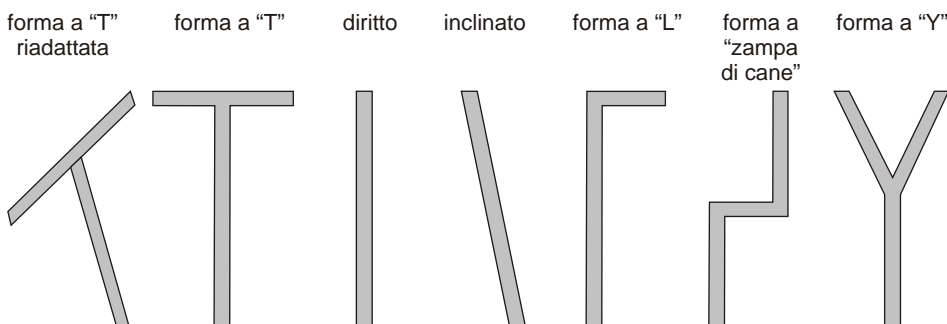


## Pennelli compositi

I pennelli compositi sono strutture costituite quasi sempre da massi naturali, disposti in modo da formare configurazioni geometriche di forma complessa. La loro costruzione è identica a quella dei pennelli semplici, ma la loro configurazione viene articolata con tratti variamente orientati rispetto alla linea di costa da proteggere, in funzione delle locali condizioni meteomarine.

I pennelli compositi spesso hanno segmenti paralleli alla spiaggia aggiunti alla sezione principale trasversale, chiamati aste, che determinano una forma risultante composta, a sperone, obliqua, dentellata, angolare, a Z, a L, a T o a Y. La struttura composta viene progettata con lo scopo di far raggiungere alla spiaggia un profilo di equilibrio dinamico il più stabile possibile.

**Figura 4.2.21:** Possibili configurazioni dei pennelli compositi, ciascuna con caratteristiche adatte alle particolari condizioni meteomarine locali. In generale, la deposizione di sedimenti a tergo delle estremità trasversali al pennello principale favorisce una riduzione dell'altezza delle onde incidenti ed una diminuzione della pendenza della spiaggia sommersa.

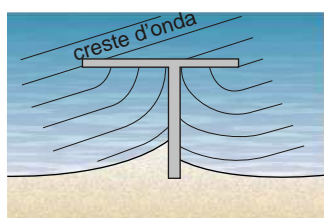


Le forme composite sono più efficienti di quelle rettilinee nel mantenere la posizione locale della linea di costa. Esse, infatti, riducono o reindirizzano lateralmente la corrente che si forma sul lato sopraflutto, riducendo in tal modo l'allontanamento di materiale dalla spiaggia e il movimento dei sedimenti.

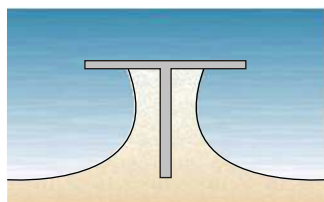
Pur assolvendo le stesse funzioni di protezione, i vari tipi di pennelli compositi determinano ciascuno un diverso allineamento della linea di riva, anche in relazione alla direzione delle onde incidenti.

Ad esempio, l'utilizzo di pennelli a T è indicato in situazioni con limitato apporto di sedimenti o in spiagge soggette ad onde di tempesta perpendicolari. Essi provocano accumuli di sabbia sia sui lati sopraflutto che su quelli sottoflutto, stabilizzando le spiagge tra loro comprese.

La risposta funzionale di un'opera trasversale a T è simile a quella di una scogliera emersa. L'unica differenza sostanziale è che la forma della spiaggia a tergo della struttura a T è controllata essenzialmente da onde che arrivano su ciascun lato dell'asta principale, ed in minor parte dalle correnti litoranee.



**Figura 4.2.22:** Pennello asimmetrico a T. In questo caso lo sperone più lungo viene costruito sul lato esposto al fronte d'onda principale, in modo da ridurre l'erosione della spiaggia sopraflutto.



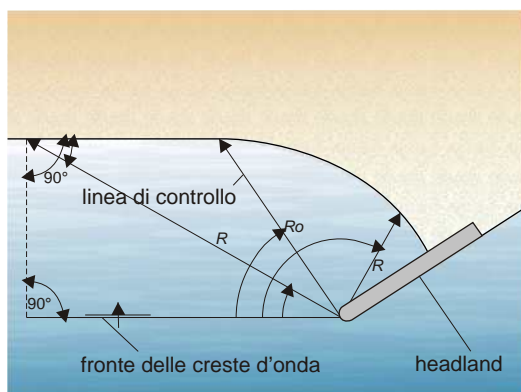
**Figura 4.2.23:** Schema di pennello a T. Gli elementi paralleli alla riva (speroni) riparano la spiaggia locale sottovento, incrementando l'accumulo di sedimenti. La conseguente accrezione dietro la struttura riduce anche l'altezza dell'onda e di conseguenza anche la sua ripidità. Pertanto, con l'approssimarsi all'asta, le onde tendono a modificarsi da erosive ad accrezionarie, mentre il fenomeno della diffrazione all'estremità dell'opera determina l'andamento della linea di costa.

## Headlands

**S**i fa ricorso a questo tipo di difesa litoranea quando si vuol favorire la crescita di una spiaggia orientata parallelamente alle creste delle onde incidenti se queste risultano oblique rispetto alla linea di costa, minimizzando o eliminando così totalmente l'asportazione di sedimento.

Il principio su cui si basa fa riferimento alle condizioni idrodinamiche che si verificano in natura in corrispondenza di promontori che sottendono piccole baie sottoflutto con profilo costiero curvilineo.

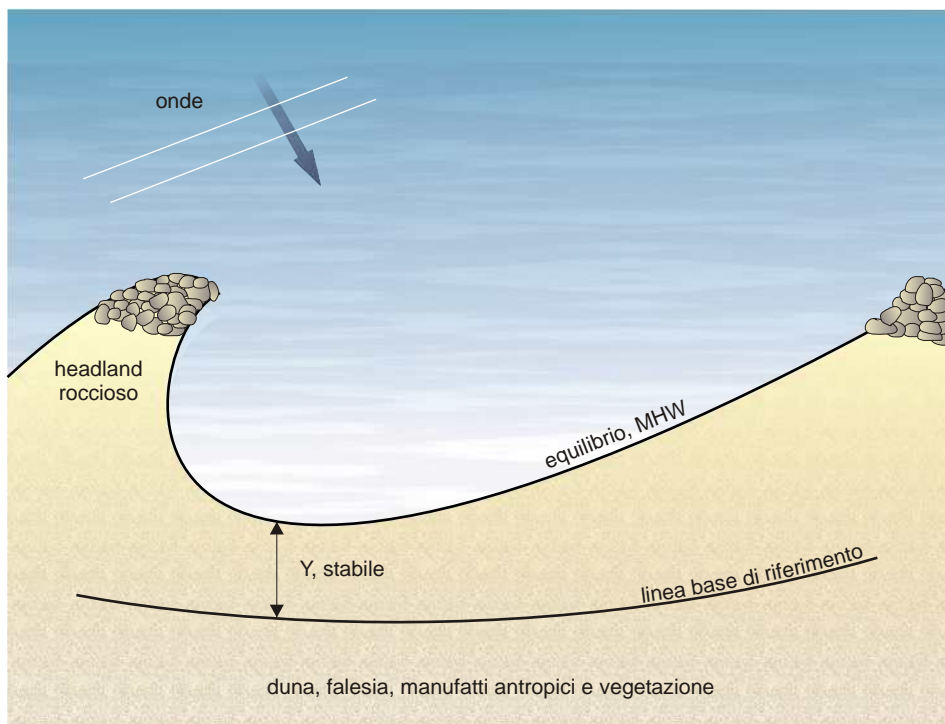
**Figura 4.2.23:** Parametri caratteristici nell'impostazione di headlands.



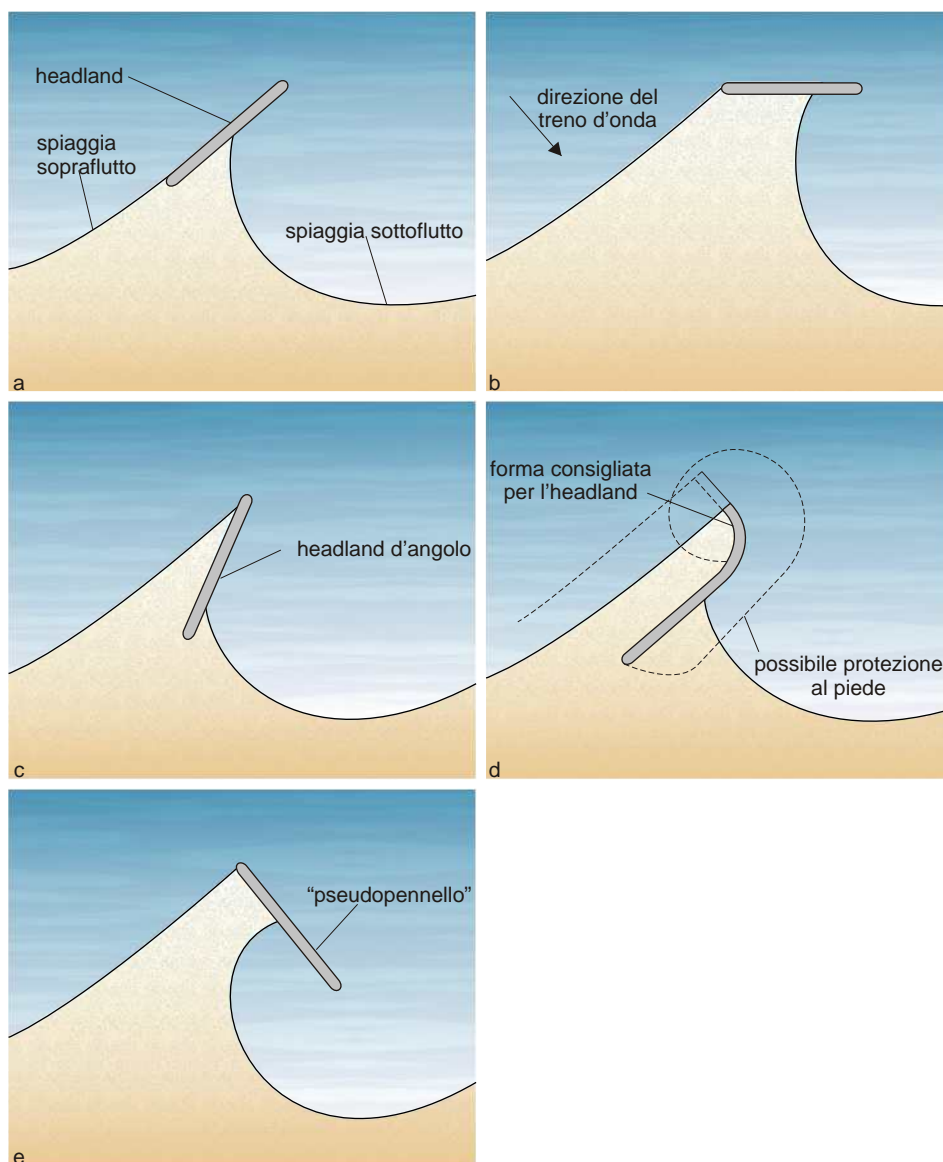
Le headlands sono quindi costruite per la protezione di baie sabbiose e portano allo sviluppo di una spiaggia di forma dentellata.

Possono essere realizzati in elementi artificiali (unità in calcestruzzo) o naturali (massi naturali) e generalmente vengono disposti in modo da formare una struttura con orientamento differente rispetto alla costa, la cui disposizione planimetrica dipende dalla direzione del fronte d'onda dominante.

**Figura 4.2.24:** Effetti morfologici sulla linea di riva, derivanti dalla realizzazione di un headland in massi naturali.



L'headland risulta più efficace nel caso in cui la parte radicata a costa della struttura abbia la concavità rivolta verso il fronte d'onda prevalente, poiché consente l'accrescimento della spiaggia per tutta la lunghezza dell'opera. In questo caso la quota di sommità del segmento principale può essere modesta e la sezione avere dimensioni ridotte. L'estremità curvata dovrà essere più elevata e costituita da elementi di dimensioni maggiori, in grado di opporre una adeguata resistenza alle onde di tempesta. La diffrazione delle onde attorno alla faccia curva minimizza la formazione di vortici e i fenomeni di scalzamento al piede.



**Figura 4.2.25:** Tipi di headlands e loro orientazione.

Nei casi a) e b) l'headland è orientato parallelamente alla linea di riva prevista ed è maggiormente esposto all'impatto delle onde di tempesta.

Nel caso c) un headland angolato (o inclinato) è inserito all'interno della spiaggia, con asse maggiore perpendicolare alla direzione d'onda incidente e viene protetto lato mare da un deposito sabbioso che, in caso di forti mareggiate, può essere rimosso.

Nel caso d) l'estremità sottocosta dell'headland è curvata verso mare, più alta del resto della sezione ed "armata" con massi più grandi e consente la formazione di una spiaggia tra la struttura lato mare e l'estremità stessa. Se al piede è presente una berma artificiale, le onde di tempesta non riescono a rimuovere completamente la spiaggia. Invece, quando giungono onde di modesta altezza, la spiaggia si accresce o si riforma nel giro di alcuni giorni. Inoltre, la configurazione ricurva provoca una diffrazione delle onde che minimizza la creazione di vortici ed i relativi fenomeni di scalzamento al piede.

Nel caso e) l'headland viene costruito affinché la spiaggia si formi e si stabilizzi alla sua estremità lato mare. Esso, è simile ad un pennello disposto parallelamente alla direzione delle onde.



## Generalità

**L**e opere di difesa aderenti esercitano un'azione di protezione della linea di riva mediante la riflessione delle onde incidenti e/o la dissipazione della loro energia.

Esse vengono utilizzate nei casi di rischio per infrastrutture stradali e ferroviarie o per edifici urbani situati in prossimità della costa, o per difendere l'entroterra da inondazioni nel corso delle mareggiate o in corrispondenza di tratti con forti escursioni di livello del mare.

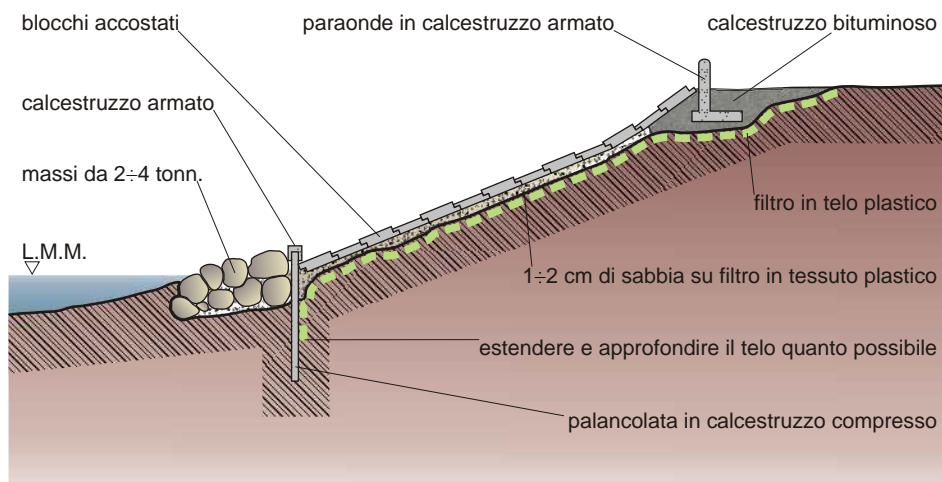
Le opere aderenti possono essere classificate secondo le seguenti tipologie:

- Rivestimenti
- Scogliere radenti
- Muri
- Paratie
- Argini

**Figura 4.3.1:** Sistema combinato di strutture aderenti a difesa di un impianto industriale. La scogliera è rivestita con elementi in cemento armato atti a creare una superficie frastagliata per favorire la dissipazione dell'energia del moto ondoso incidente prima dell'urto finale con il muro. Si noti la curvatura del muro verso mare con funzione antisormonto.



**Figura 4.3.2:** Schema di difesa aderente adatto a coste basse con azione ondosa limitata. Il sistema è costituito da rivestimento in piastre in calcestruzzo prefabbricato mutuamente incastrate tra loro, poggianti su sottofondo dotato di filtro. A completamento dell'opera una protezione al piede per contrastare lo scalzamento costituita da una barriera in massi e da un diaframma di palancole, in sommità un muro paraonde riflette le onde di risalita.



In generale si può affermare che i rivestimenti costituiscono una protezione “armata”, utilizzata nella difesa di sponde e coste in erosione per attacco ondoso, con efficacia condizionata in parte dalle caratteristiche litotecniche del substrato di posa delle strutture. Un rivestimento non fornisce alcuna protezione alle aree circostanti, ma protegge solamente il terreno retrostante.

Le scogliere radenti sono realizzate a ridosso della linea di riva, mediante gettate di massi naturali o artificiali, con lo scopo di dissipare l'energia delle onde incidenti.

I muri sono strutture realizzate per contrastare il moto ondoso e al tempo stesso trattenere il terreno a tergo. Essi vengono pertanto costruiti come rinforzo del profilo costiero.

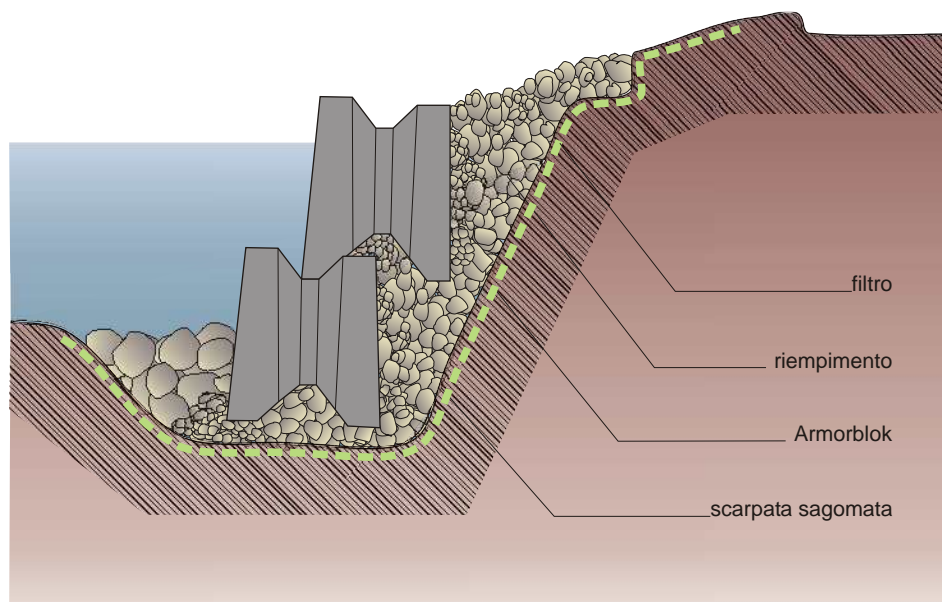
Le paratie hanno una funzione simile ai muri e sono costituite da elementi verticali di piccolo spessore, prive di fondazioni, inserite nel terreno e spesso dotate di tiranti. Essendo disposte verticalmente non permettono alle onde di dissipare energia, ma piuttosto favoriscono la loro riflessione.

Gli argini sono costituiti da terrapieni in materiale naturale compattato (ad es. argille), con rivestimento in pietrame lato mare. Essi vengono utilizzati soprattutto per contenere le escursioni di livello del mare.

Tutte le tipologie d'opera elencate presentano un impatto non trascurabile sull'ambiente costiero, soprattutto quando si utilizzano materiali artificiali. Normalmente queste opere incrementano la riflessione d'onda, determinando pericolosi fenomeni di interferenza il cui effetto finale è quello di incrementare l'agitazione ondosa in prossimità delle strutture. Nel caso più sfavorevole possono così generarsi moti che causano lo scalzamento alla base ed il conseguente deterioramento delle strutture.

Inoltre, se non si tiene correttamente conto del regime litorale, delle condizioni meteomarine locali e delle caratteristiche morfobatimetriche dell'unità fisiografica di riferimento, tali opere possono anche determinare un incremento dell'erosione nelle aree limitrofe o persino una diminuzione di superficie della spiaggia emersa.

**Figura 4.3.3:** Schema di scogliera in grossi blocchi prefabbricati e incastrati per applicazioni in zone costiere con profondità fino a qualche metro.



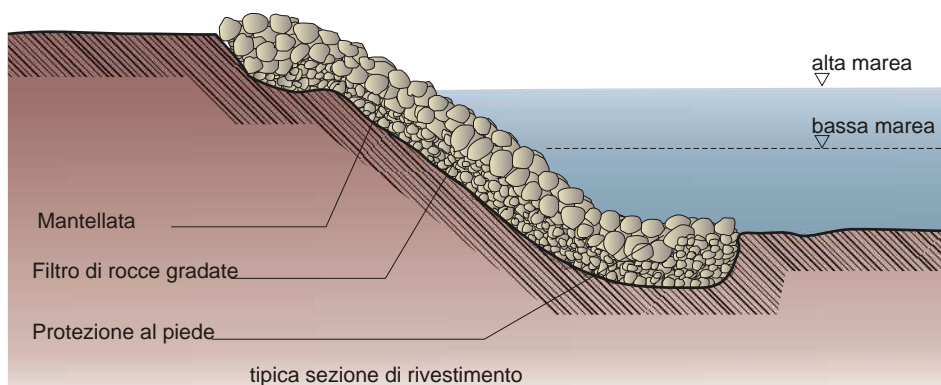
# Rivestimenti

Un rivestimento è una struttura realizzata per la difesa di una scarpata a mare. Esso è composto da tre elementi principali: uno strato di protezione esterno (mantellata), uno strato filtrante più interno ed una protezione al piede. La mantellata esterna può essere formata da massi in pietra o in calcestruzzo disposti alla rinfusa o da unità ordinatamente interconnesse a formare una maglia geometrica; il filtro assicura una funzione di drenaggio e di trattenimento del suolo sottostante; la protezione basale fornisce la stabilità necessaria contro lo scalzamento al piede. La risalita dell'acqua sopra il rivestimento può essere limitata con una struttura verticale o curva, posta sul coronamento.

La presenza del rivestimento può modificare la dinamica delle correnti litoranee, ed i processi erosivo-deposizionali locali. Una volta realizzata la struttura protettiva lungo la riva, il terreno a tergo dell'opera non è più soggetto ad azioni erosive, pertanto può diminuire l'apporto di materiale di origine litoranea nella zona costiera. Nel progettare un rivestimento va quindi tenuto in considerazione e sottoposto ad un attento studio il bilancio del trasporto solido longitudinale del tratto di litorale adiacente alla zona sottoposta all'intervento. Generalmente, se si vuole conservare l'integrità delle spiagge adiacenti al tratto rivestito, occorre realizzare strutture aggiuntive come pennelli, barriere e ripascimenti.

Frequentemente, le opere di rivestimento impediscono una normale fruibilità delle spiagge e, solo in alcuni casi, consentono un facile accesso al pubblico, mentre producono un considerevole impatto visivo.

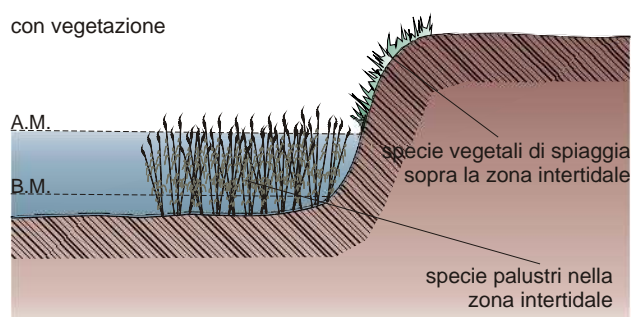
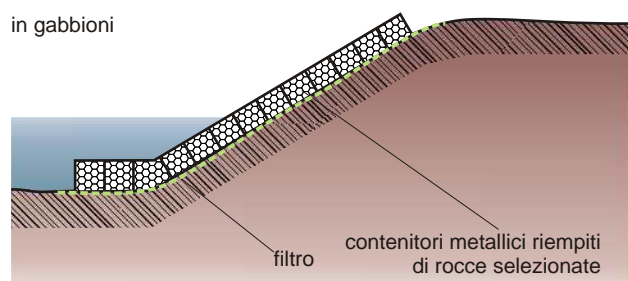
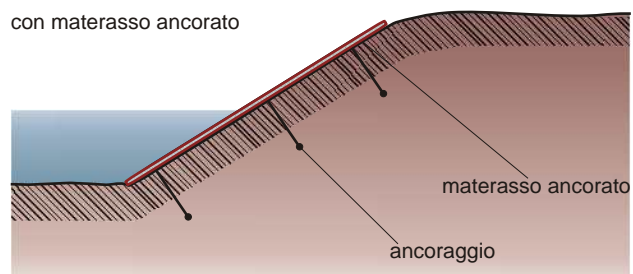
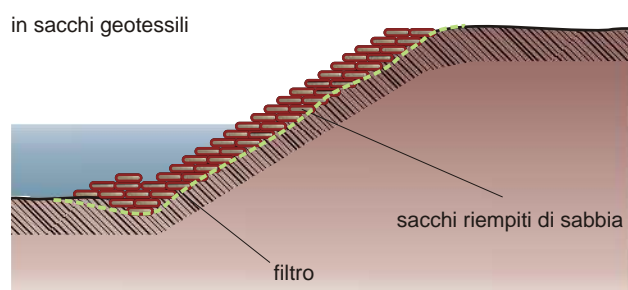
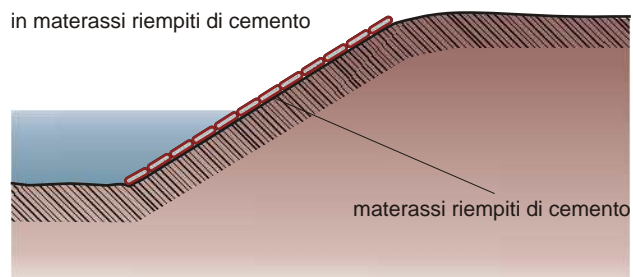
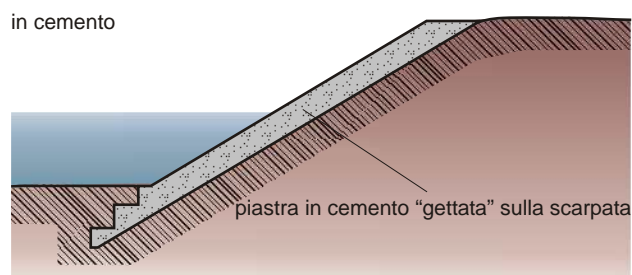
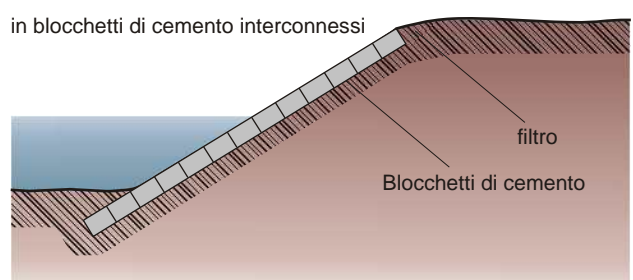
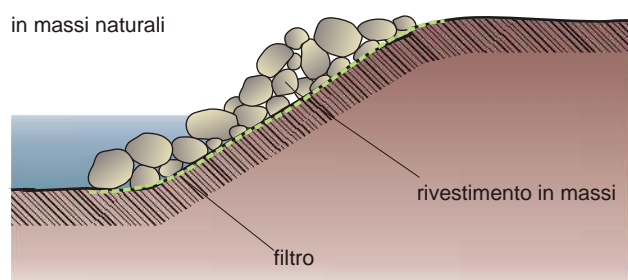
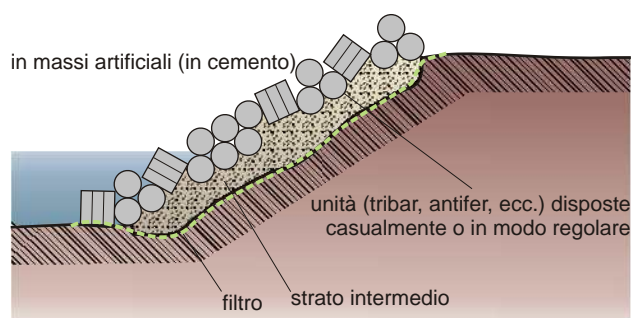
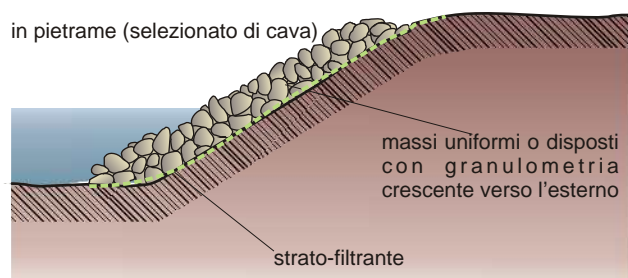
**Figura 4.3.4:** Tipica sezione di un rivestimento. I rivestimenti non svolgono in generale un'azione di contenimento del terreno di scarpata, ma lo proteggono dall'azione diretta delle onde e delle correnti marine, dissipando la loro energia.



**Figura 4.3.5:** I rivestimenti possono essere progettati in combinazione con altre opere di difesa costiera, quali scogliere e moli, in corrispondenza di aree portuali o urbanizzate. I versamenti di pietrame da terra contribuiscono a rafforzare la capacità di resistenza all'attacco ondoso e a mitigare l'azione di scalzamento al piede dei muri.







**Figura 4.3.6:** Tipi di rivestimento. L'estremità inferiore del rivestimento dovrebbe sempre essere sepolta al di sotto del fondale per evitare problemi di scalzamento alla base; inoltre è opportuno disporre un filtro tra i massi di protezione e il terreno della scarpata, per prevenire cedimenti differenziali e distribuire meglio il peso delle singole unità.

Le tipologie di rivestimento, in base ai materiali utilizzati, si suddividono in:

**Rivestimenti in elementi naturali**  
**Rivestimenti in elementi artificiali**

Le protezioni in elementi naturali sono strutture flessibili, costituite da pietrame sciolto di opportune dimensioni, ammassato lungo la scarpata o confinato in contenitori di rete metallica. La loro caratteristica fondamentale è la capacità di adattarsi, attraverso successivi e piccoli assestamenti, alla superficie della scarpata. Nella progettazione occorre valutare accuratamente la tendenza all'approfondimento del fondale al piede dell'opera, poiché vi è il rischio di franamento dei massi della mantellata, se non adeguatamente provvisti di idonee protezioni. Per la rapidità di esecuzione i rivestimenti in elementi naturali si adattano bene ad interventi realizzati in somma urgenza, su scarpate antistanti fondali con debole pendenza.

I rivestimenti in massi artificiali vengono adottati in aree litoranee dove sono presenti scarpate in arretramento ed in cui esistono problemi di reperimento di materiali naturali di cava.

Le tipologie più comunemente utilizzate sono costituite da grandi blocchi artificiali e da rivestimenti superficiali. La struttura con grandi unità in calcestruzzo si differenzia da quella di tipo "leggero" per la capacità di resistere in paraggi con condizioni meteomarine più severe, rispetto a quelle con unità di dimensioni e peso inferiori, idonee per tratti di costa riparati o soggetti a moderata ondatazione (ad es. baie e insenature).

**Figura 4.3.7:** Rivestimento in massi naturali. I rivestimenti vengono spesso realizzati con massi di cava di grandi dimensioni. Gli elementi devono rispondere a determinate caratteristiche di resistenza fisica e chimica, di durezza, di densità e di peso, ovvero essere idonei alla permanenza a lungo termine in ambiente costiero.



**Figura 4.3.8:** Rivestimento in piastre di cemento. I rivestimenti sono opere di difesa dall'erosione indicate per paraggi esposti ad onde di moderata entità. Nel caso in cui vengano realizzati in zone soggette a forti mareggiate, affinché abbiano una durata maggiore, devono essere protetti opportunamente (ad es. con barriere emerse o scogliere radenti) per fronteggiare l'attacco ondosso.





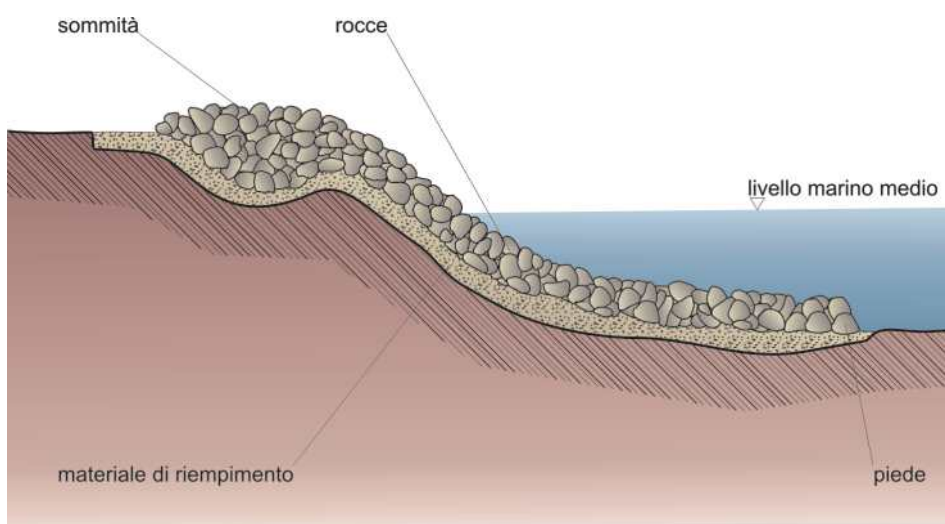
## Riprap o Rivestimenti in pietrame

Sono costituiti da uno strato di rocce naturali o massi di cava, disposti alla rinfusa, aventi spessore e dimensioni idonee. Il pietrame utilizzato per realizzare il riprap deve essere resistente, spigoloso e ben selezionato, ovvero con una prevalenza di elementi di grandi dimensioni rispetto a quelli di minore taglia, che riempiono i vuoti esistenti nell'interconnessione.

Uno strato filtrante deve essere posto tra la mantellata esterna e la superficie di appoggio per evitare la perdita di materiali attraverso i vuoti presenti nella struttura. Il filtro può essere formato da uno strato di frammenti rocciosi di piccole dimensioni o da geotessuto. In taluni casi per evitare erosione al piede viene realizzata una berma in pietrame. La disposizione irregolare degli elementi rocciosi consente all'opera di adattarsi a superfici di diversa forma. La permeabilità della struttura, inoltre, permette all'onda frangente di dissipare una notevole aliquota dell'energia in moti turbolenti. Dal punto di vista meccanico queste opere presentano proprietà di tipo plastico, poiché sono possibili anche sensibili spostamenti relativi dei massi che le compongono, senza che venga compromessa la loro stabilità.

La scelta di utilizzare i massi rappresenta, oltre che una soluzione durevole, anche una soluzione vantaggiosa dal punto di vista economico, soprattutto in zone dove il materiale è facilmente reperibile.

**Figura 4.3.9:** Sezione schematica tipica di un Riprap. Nella figura si notano i tre strati fondamentali (strato esterno, filtro in pietrisco o in geotessuto, protezione al piede) della maggior parte dei rivestimenti permeabili, con disposizione ordinata delle varie unità costitutive.



**Figura 4.3.10:** Rivestimento in massi. Spesso per limitare i danni alle infrastrutture viarie e ferroviarie causati da tempeste e mareggiate, si utilizzano rivestimenti con materiali di cava. La loro costruzione a ridosso delle massicciate viene eseguita con una disposizione più o meno regolare dei massi che ne aumenta la stabilità, mentre la loro conformazione superficiale irregolare consente una buona dissipazione dell'energia delle onde incidenti.



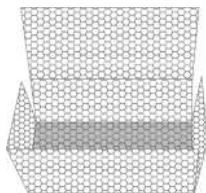


## Descrizione e caratteristiche

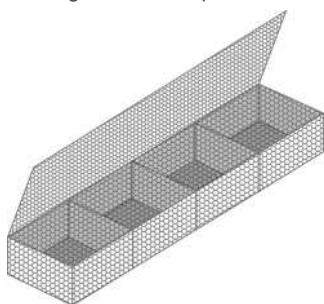
## Rivestimenti con gabbioni

I gabbioni sono contenitori, riempiti di rocce di selezionata pezzatura, costituiti da rete in filo di ferro a maglia esagonale a doppia torsione, con zincatura o rivestimento in materiale speciale anticorrosivo. Essi sono larghi e alti circa 1 metro, e con lunghezze variabili da 2 a 4 metri. Per dimensioni e peso possono essere utilizzati sia come rivestimento che come muro di sostegno.

I materassi sono simili ai gabbioni ma presentano spessori inferiori (circa 40 cm) e vengono normalmente utilizzati solo come rivestimenti. Le strutture sono assemblate in sito, e riempite successivamente con pietre aventi diametro da 10 a 20 centimetri. Dopo il riempimento i coperchi vengono chiusi ed allacciati ai contenitori.



gabbione semplice



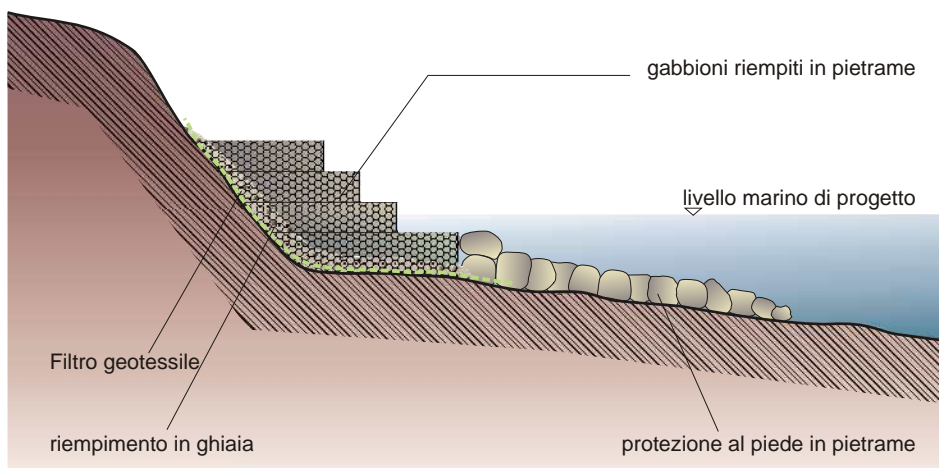
gabbione con setti interni

**Figura 4.3.11:** Gabbioni senza diaframmi e gabbioni con diaframmi.

**Figura 4.3.12:** Rivestimento con gabbioni e protezione al piede. Il pietrame di riempimento dev'essere sistemato in modo che non siano presenti vuoti, per dare uniformità all'opera.

Gabbioni e materassi possono essere suddivisi da diaframmi che riducono i movimenti interni del pietrame e rinforzano la struttura. Dove i litotipi di appoggio risultano poco permeabili, materiali filtranti e di fondazione, come geotessuto o ghiaia, possono essere sistemati tra il substrato ed i gabbioni ma normalmente i gabbioni sono sufficientemente drenanti. Le pietre devono essere disposte in modo serrato nei gabbioni per minimizzare i movimenti interni ed eventuali danneggiamenti della struttura zincata.

Tra i vantaggi legati alla loro utilizzazione c'è la flessibilità e la capacità di adattarsi ai movimenti della fondazione. Tra le evidenze negative c'è il fatto che i contenitori possono essere aperti direttamente dalle onde incidenti o a causa della corrosione, cosicché essi non vengono usati in aree dove le onde hanno elevata capacità di trasporto.



**Figura 4.3.13:** Esempi di protezioni di strade litoranee con rivestimenti in gabbioni. Nell'esempio a destra (litorale laziale) i gabbioni sono sistemati su un muro paraonde sagomato per riflettere l'onda incidente. Le gabbionature nei due casi assolvono anche ad una funzione di sostegno del terreno.



## Rivestimenti con blocchi in calcestruzzo

Con queste unità possono essere costruiti rivestimenti dotati di una grande stabilità, grazie alla loro elevata capacità di incastrarsi reciprocamente.

I blocchi artificiali possono essere disposti in un unico strato oppure in più strati, riducendo notevolmente il fenomeno della riflessione. Spesso sono sormontati da muri di coronamento per impedire la risalita delle onde.

In commercio esistono vari tipi di blocchi che differiscono nella forma e nel tipo di articolazione, ma che hanno in comune una discreta flessibilità e facilità di messa in opera. La loro struttura permeabile consente, inoltre, un drenaggio molto efficace.



**Figura 4.3.14:** Rivestimento in Unità A-Jacks. In questa opera di difesa non è prevista la presenza di barre o cavi d'acciaio di collegamento, ma l'omogeneità dell'intera massa è data dall'elevata capacità che hanno i singoli blocchi di interconnettersi reciprocamente, formando quindi una struttura solidale.



**Figura 4.3.15:** Rivestimenti in blocchi artificiali (Xbloc e Tribars). Gli elementi artificiali si possono suddividere in diverse categorie in base alle caratteristiche tecniche: massivi (Cubi, Antifer), complessi senza bracci (Accropod, Stabit), complessi con bracci (Dolos, Tetrapod). Le differenti tipologie di unità artificiali in calcestruzzo possono essere poste in opera per formare uno o più strati, più o meno ordinati. Le unità di tipo massivo sono generalmente più pesanti di quelle senza bracci e necessitano di attrezzature e cautele particolari durante la fase di cantiere. Le unità complesse vengono normalmente disposte su un'unica fila, mentre quelle massive sono generalmente collocate su più file. I blocchi complessi, messi su una fila, sono adatti in paraggi con acque poco profonde, e sono maggiormente soggetti a fenomeni di tracimazione e scalzamento al piede.



**Figura 4.3.16:** Rivestimenti in cubi di calcestruzzo (lungomare di Salerno) e in tetrapodi (prov. di Messina).

## Generalità

### Rivestimenti con unità artificiali leggere

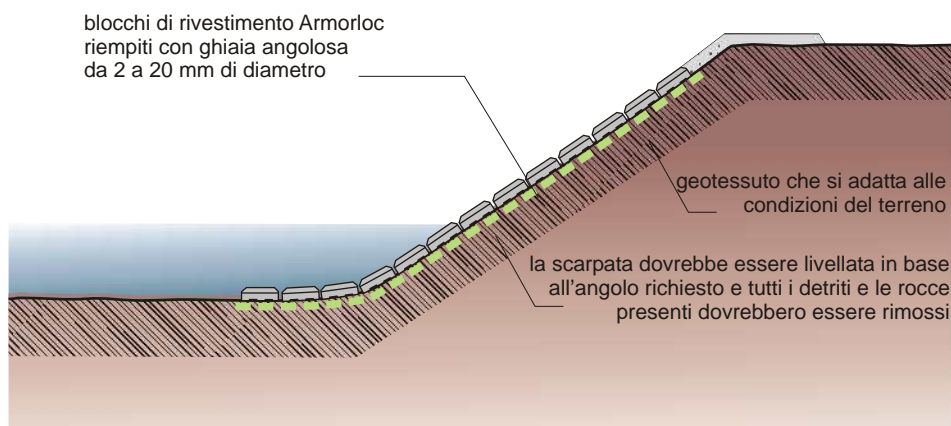
Si tratta di rivestimenti con struttura rigida o semi-rigida, costituiti da elementi in calcestruzzo di varia forma, che possono essere o meno interconnessi fra loro e utilizzati normalmente in paraggi dove il moto ondoso è assai modesto. Le singole unità sono composte da blocchetti o piastre in calcestruzzo, oppure da sacchi in geotessuto riempiti di calcestruzzo. Dal punto di vista tecnico le piastre possono essere più o meno solidarizzate: alcuni tipi costituiscono dei rivestimenti articolati tramite interconnessioni, altri formano delle superfici uniformi mediante semplice accostamento. Ogni tipologia di elementi può avere un certo livello di scabrezza superficiale e può essere cava o piena. Ad alti valori di rugosità o di vuoti, lungo la superficie esterna di un rivestimento, corrisponde una elevata dissipazione di energia ondosa.

I singoli blocchi, in alcuni casi, sono uniti insieme mediante cavi, a formare un sistema articolato assemblato, con opportuna sezione, adattata alle caratteristiche del sito. I blocchi interconnessi hanno il vantaggio di fornire un aspetto più uniforme all'opera e sono di facile installazione, ma di contro necessitano di un costante collegamento tra loro, altrimenti una volta danneggiato un elemento altre unità possono distaccarsi, fino alla completa rottura del rivestimento. Tra i blocchi e la superficie della scarpata viene collocato un filtro geosintetico, che permette una miglior distribuzione del peso delle unità, favorendo un assestamento più uniforme e consentendo una diminuzione delle pressioni interstiziali.

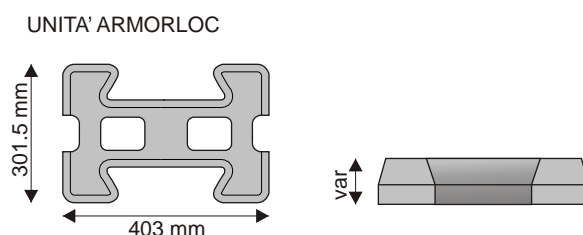
## Descrizione e caratteristiche

### Armorloc

Sono rivestimenti formati da blocchi forati, ciascuno interconnesso ai sei adiacenti, per costituire un'unica struttura con caratteri di notevole resistenza agli sforzi di taglio. Il sistema è installato su una geomembrana filtrante per la capacità di adattarsi alle particolari irregolarità del suolo e di prevenire la migrazione delle particelle di terreno. Il rivestimento Armorloc si può deformare per adattarsi alla conformazione del profilo di spiaggia, avendo cura di riempire con ghiaia gli spazi di interconnessione.



**Figura 4.3.17:** Esempio di sponda con rivestimento protettivo Armorloc. Ogni elemento costitutivo è connesso ad altri 6 elementi adiacenti, in modo da formare una struttura solidale e resistente al moto ondoso, in situazioni di bassa energia.

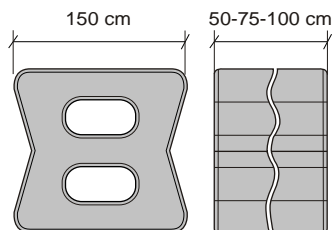




## Descrizione e caratteristiche

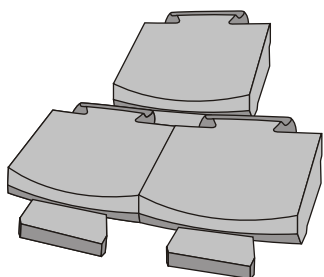
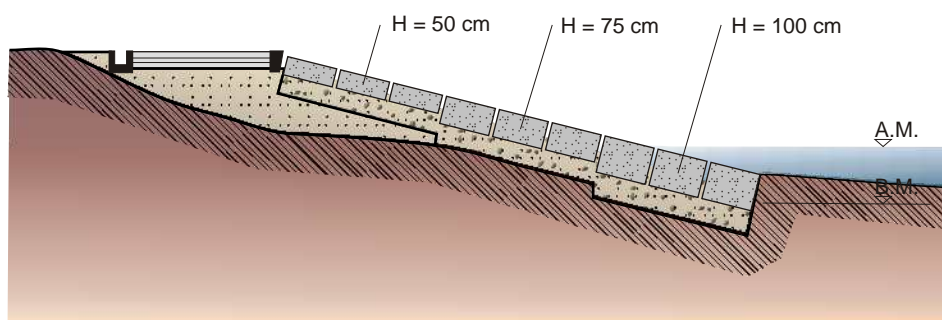
### Lotus-Uni

È un tipo di rivestimento, utilizzato per profili costieri con modeste pendenze, che riduce la riflessione dell'onda e, di conseguenza, il rischio di scalzamento al piede della struttura. I blocchi hanno una forma svasata che permette un mutuo collegamento tra i vari elementi, tutti prefabbricati secondo tre diversi spessori (50 cm, 75 cm, 100 cm), ma con la medesima sezione orizzontale, che consente un uso combinato a incastro sulla stessa scarpata.



**Figura 4.3.18:** Unità Lotus-Uni e Rivestimento tipo Lotus-Uni. Una variante di quest'intervento è quella con blocchi Crab o Coast, aventi talvolta i fori riempiti di pietrame e talora disposti a gradoni sfalsati.

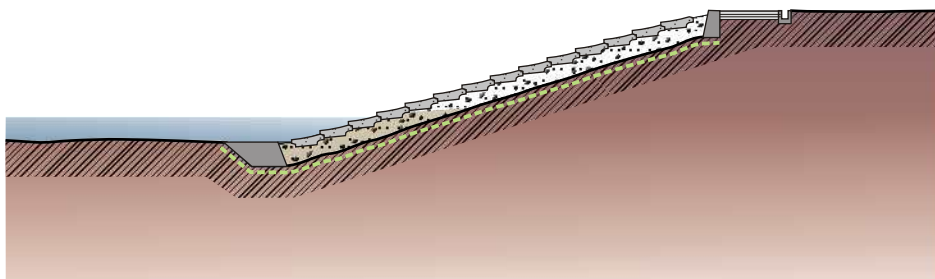
Questo rivestimento è stato sperimentato negli anni '80 in Giappone ed ha fornito risultati molto soddisfacenti.



**Figura 4.3.19:** Rivestimento con unità Terrace Blocks. Questo sistema, oltre a favorire un'attenuazione dell'energia delle onde, consente una buona fruibilità turistico-ricreativa nel caso in cui sia presente una spiaggia antistante.

### Terrace Blocks

In questa tipologia d'opera il rivestimento è costituito da piastre tondeggianti, interconnesse reciprocamente e disposte a gradinata, con modesta pendenza, in modo da agevolare l'accesso alla riva. La struttura è appoggiata su un doppio filtro in pietrame. La superficie, avente profilo scalettato, riduce la risalita delle onde.

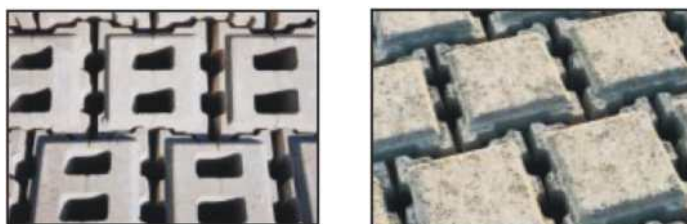


## Descrizione e caratteristiche

### Armorflex

È costituita da unità cellulari in calcestruzzo prefabbricato, connesse tra loro a formare un unico materasso di facile installazione in sito. I singoli blocchi sono collegati longitudinalmente per mezzo di cavi in ferro zincato o in poliestere. Le celle possono essere aperte o chiuse; quelle aperte favoriscono l'instaurarsi di un ambiente idoneo alla crescita di vegetazione, che contribuisce ad ancorare ulteriormente il sistema. Gli angoli smussati dei blocchi danno una elevata flessibilità al materasso, mentre le fessure tra i blocchi stessi consentono una buona permeabilità a tutta l'opera.

**Figura 4.3.20:** Unità Armorflex aperta e chiusa.

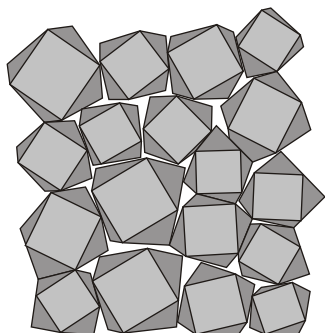


## Descrizione e caratteristiche

### Basalton

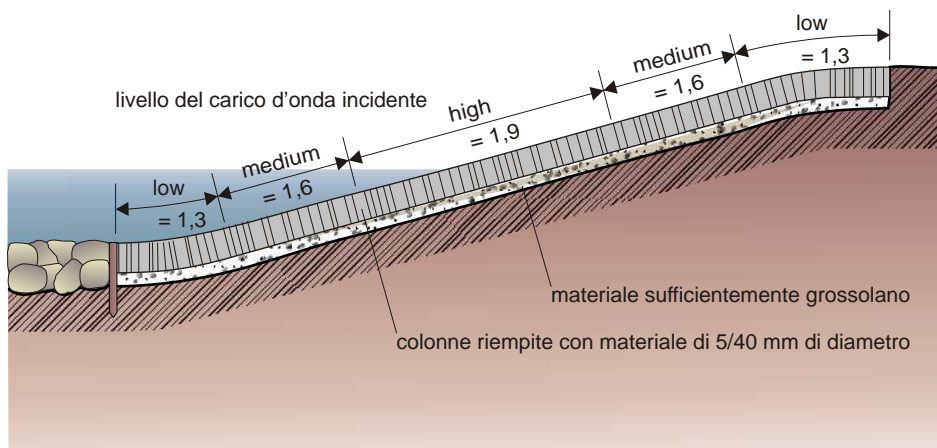
La struttura è costituita da elementi colonnari di calcestruzzo reciprocamente interconnessi. La forma viene sagomata opportunamente per evitare i movimenti verso l'alto delle singole unità, sotto condizioni di carico dinamico. I rivestimenti Basalton forniscono i seguenti vantaggi:

Rapida installazione meccanica;  
elevata durezza dei materiali;  
permeabilità e flessibilità;  
adattabilità alla maggior parte delle conformazioni del substrato;  
vasta scelta delle densità della "maglia".



PIANTA

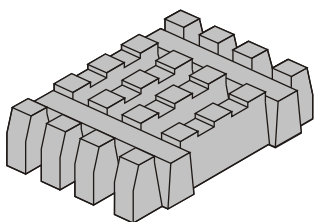
**Figura 4.3.21:** Schema di rivestimento tipo Basalton. Le caratteristiche tecniche delle unità Basalton consentono loro di resistere a spostamenti ed a carichi dinamici applicati sulla superficie, solamente se disposte a costituire una struttura a maglia molto fitta ed omogenea.



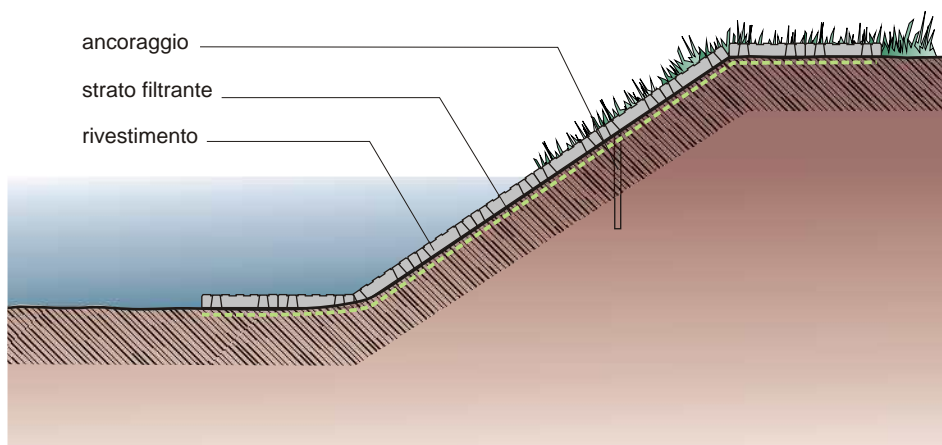
## Descrizione e caratteristiche

### Monoslabs o Turfblocks

I Turfblocks sono unità brevettate che vengono facilmente installate a mano su uno strato filtrante. Ogni blocco misura 40 x 60 x 12 cm e pesa circa 50 kg. La loro forma appiattita necessita di una fondazione stabile, poiché ogni cedimento differenziale al di sotto dei blocchi li rende suscettibili a possibili capovolgimenti sotto l'azione delle onde.



**Figura 4.3.22:** Unità Turfblock e sezione di un Rivestimento Turfblock. Nello schema si osserva il sistema di ancoraggio degli elementi, il filtro geosintetico alla base e la disposizione delle unità sulla scarpata.

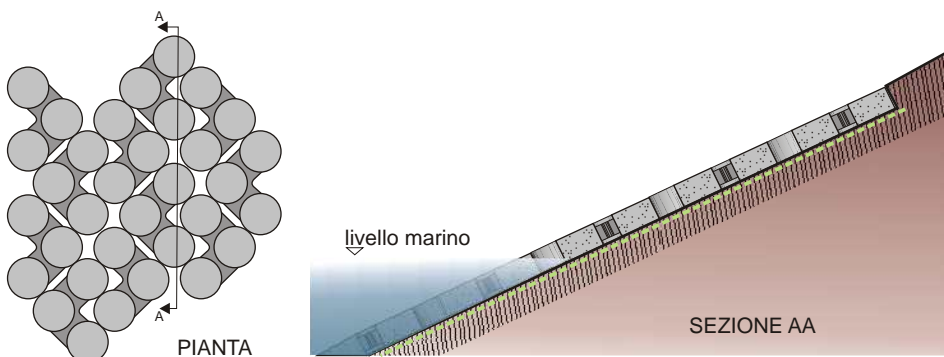


### Descrizione e caratteristiche

## Elbloc

I blocchi Elbloc sono unità in calcestruzzo a forma di "L", che vengono disposti a formare una struttura interconnessa. L'efficacia del rivestimento è legata al grado di incastro dei blocchi. I test di laboratorio hanno mostrato una buona stabilità in zone di limitata profondità.

**Figura 4.3.23:** Rivestimento tipo Elbloc.

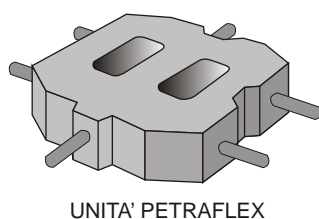


### Descrizione e caratteristiche

## Petraflex

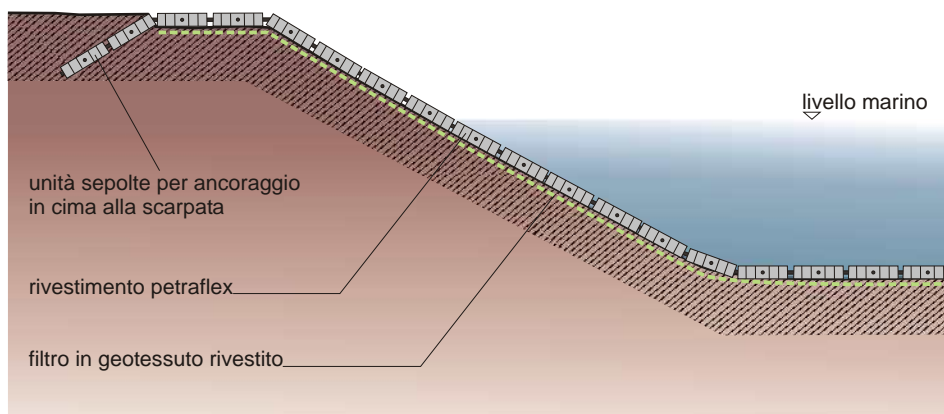
Si tratta di un rivestimento flessibile, applicato su un filtro in geotessuto, le cui unità, realizzate in calcestruzzo con differenti dimensioni, sono rastremate ed interconnesse ad incastro mediante cavi. I materassi Petraflex vengono preassemblati e dimensionati in base all'estensione dell'area d'intervento. I cavi laterali, tra materassi adiacenti, vengono connessi piegando un manicotto di alluminio.

Questo tipo di materasso è adatto alla protezione a lungo termine della linea di costa in condizioni di moto ondoso di lieve entità.

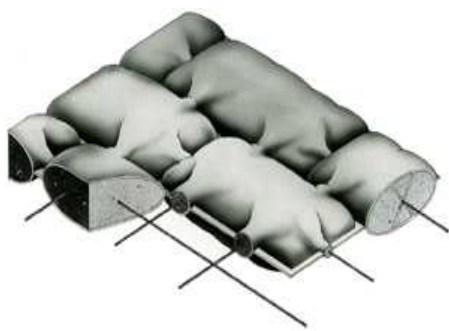


UNITÀ PETRAFLEX

**Figura 4.3.24:** Sezione schematica di un Rivestimento Petraflex, progettato per il controllo dell'erosione a lungo termine. L'elevata durabilità è data dalla presenza di cavi d'acciaio che facilitano l'interconnessione e rendono solidale la struttura.



### Descrizione e caratteristiche



**Figura 4.3.25:** Rivestimento con Unità Texicon.

## Texicon

Viene costruito riempiendo unità in tessuto geosintetico rinforzato, a doppio strato, con un aggregato cementizio. Le unità vengono installate in sito a formare un'unica struttura. Le unità Texicon, una volta posizionate, vengono riempite contemporaneamente, pompando una miscela cementizia al loro interno, secondo una conformazione finale che si adatta all'andamento della costa.

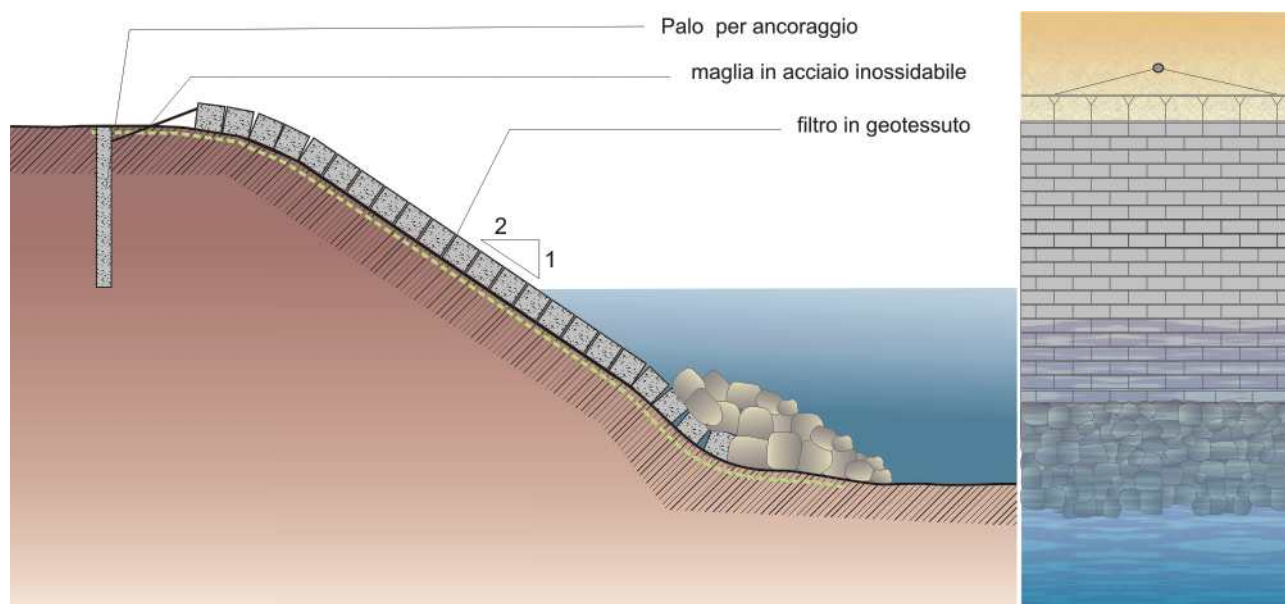


## Descrizione e caratteristiche

### Terrafix Blocks

Sono unità in calcestruzzo, con elementi interconnessi da un sistema di giunti maschio-femmina. I fori presenti al centro di ciascun blocco permettono il collegamento di tutte le unità attraverso cavi di acciaio inossidabile. L'uniforme incastro che si viene a creare con le unità descritte, pesanti circa 25 kg l'una, favorisce la solidità e la durata dell'opera. I blocchi vengono assemblati in materassi e stesi direttamente sulla scarpata opportunamente sagomata.

**Figura 4.3.26:** Rivestimento con Terrafix Blocks. Sezione in basso e vista frontale a destra.



### Dytap

Il sistema, simile al Terrafix, consiste in un insieme di elementi prefabbricati interconnessi con cavi di acciaio, che formano una superficie dall'aspetto finale esteticamente gradevole. L'installazione di materassi articolati consente di eseguire il rivestimento della scarpata senza dover incastrare ciascun blocco, ma collegando più sezioni lateralmente.

**Figura 4.3.27:** Operazione di installazione di una Unità Dytap

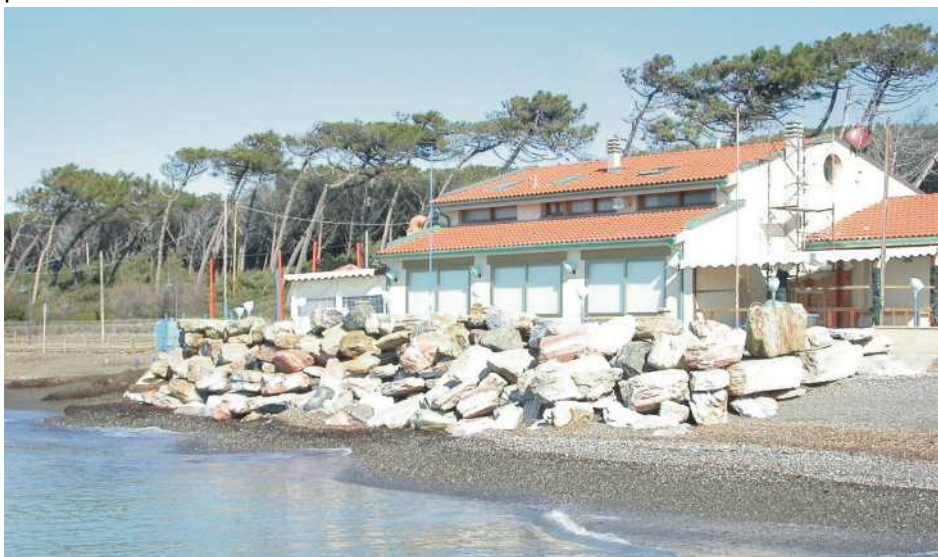
## SCOGLIERE RADENTI

**L**e scogliere radenti (o aderenti) sono strutture di difesa costituite da massi naturali o artificiali disposte parallelamente alla linea di riva, in corrispondenza della spiaggia emersa. Tale tipologia di intervento viene impiegata nella protezione di zone senza particolare pregio ambientale, oppure si utilizza come protezione temporanea di emergenza, ove si abbia la necessità di interrompere provvisoriamente l'arretramento dell'arenile o limitare la risalita dell'onda.

L'utilizzo di massi con presenza di spazi vuoti tra gli elementi conferisce alle opere una notevole flessibilità, cosicché anche nel caso in cui avvengano spostamenti relativi delle unità che le compongono, la stabilità complessiva non viene compromessa. La permeabilità della scogliera consente alle onde incidenti di penetrare al suo interno, dissipando gran parte dell'energia nell'impatto con i massi.

Il fenomeno della riflessione del moto ondoso viene attenuato, mentre quello di scalzamento al piede dell'opera subisce solo un modesto rallentamento. L'affossamento creato dall'onda al piede dell'opera può essere compensato sovradimensionando la sezione trasversale oppure rinforzandola con la posa di pietrame in eccesso.

**Figura 4.3.28:** Scogliera radente. Le scogliere radenti possono essere anche applicate a situazioni di emergenza in cui edifici o strade siano direttamente minacciati da fenomeni erosivi. Generalmente necessitano di una costante manutenzione, soprattutto in occasione delle mareggiate che avvengono nel periodo invernale, e vanno adeguate, e vanno rimosse al più presto sostituendole con opere adeguate ad un impiego a lungo termine.



**Figura 4.3.29:** Scogliere radenti. Queste opere, essendo permeabili, consentono alla massa d'acqua di dissipare la gran parte dell'energia penetrando al loro interno e danno luogo ad un limitato approfondimento dei fondali antistanti. Esse sono indicate nei casi in cui gli apporti litoranei sono scarsi e la spiaggia è in forte arretramento.



# MURI

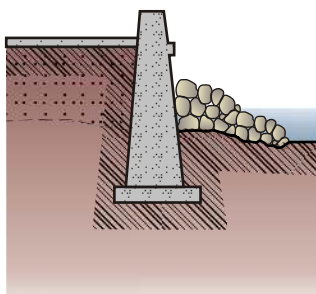
I muri sono strutture compatte e continue, realizzate per difendere zone di retrospiaggia dall'azione diretta del moto ondoso. Essi vengono costruiti parallelamente alla linea di riva come rinforzo di una parte del profilo costiero, per proteggere zone di lungomare, strade e case posizionate vicino al limite naturale della spiaggia.

I muri di sponda, che proteggono e sostengono il terreno retrostante, possono innescare, come le paratie, locali fenomeni di approfondimento dei fondali. Infatti, l'azione delle onde, che frangono e si riflettono sulla parete, determina l'asportazione di parte dei sedimenti al piede di essa che può diventare instabile. In questi casi, è necessario prevedere alla base dell'opera adeguate protezioni, come un taglione o la posa di pietrame alla rinfusa o entro materassi in rete metallica. Il pietrame deve essere di dimensioni tali da garantire la stabilità e va disposto a strati con gli elementi di granulometria maggiore all'esterno. Un'altra soluzione, come si vedrà nel seguito, può essere rappresentata dalla modifica di alcune caratteristiche geometriche di progetto della struttura, come l'accentuazione della concavità del coronamento e della base.

I muri vengono costruiti in diversi tipi di materiali, resistenti all'azione delle onde:

- Muri in calcestruzzo
- Muri in terra rinforzata
- Muri in gabbioni

**Figura 4.3.30:** Palermo, località Santa Flavia. Muro verticale in calcestruzzo. La protezione al piede, con massi naturali, consente di limitare gli effetti del fenomeno della riflessione, che a lungo andare può provocare l'approfondimento del fondale antistante e lo scalzamento della struttura.



**Figura 4.3.31:** Costruzione di un muro verticale con sottostruttura di cut-off in pali, a protezione del piede. Il cut-off ha la funzione di impedire l'azione diretta delle onde marine sulla parte inferiore del muro. La difesa viene completata tramite il versamento di pietrame disposto alla rinfusa.



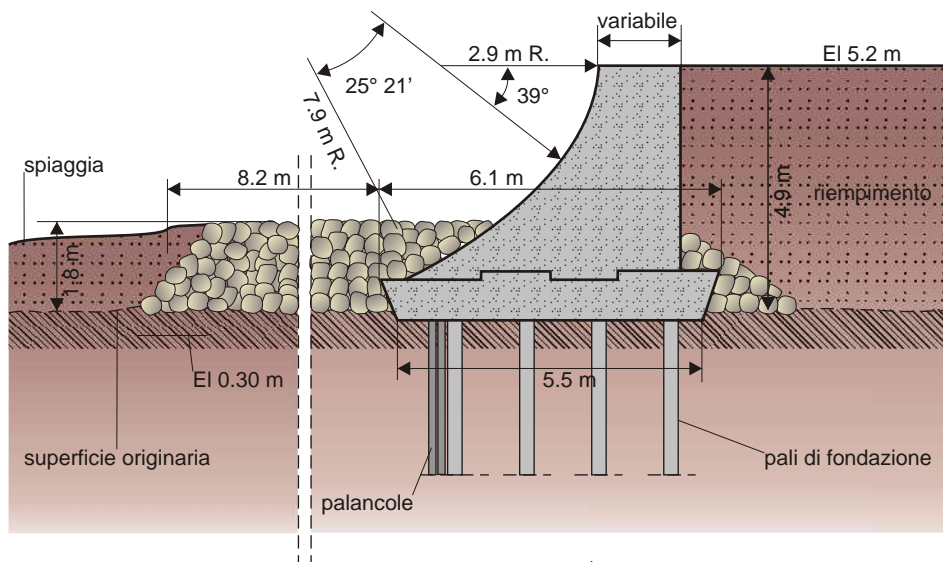


## Descrizione e caratteristiche

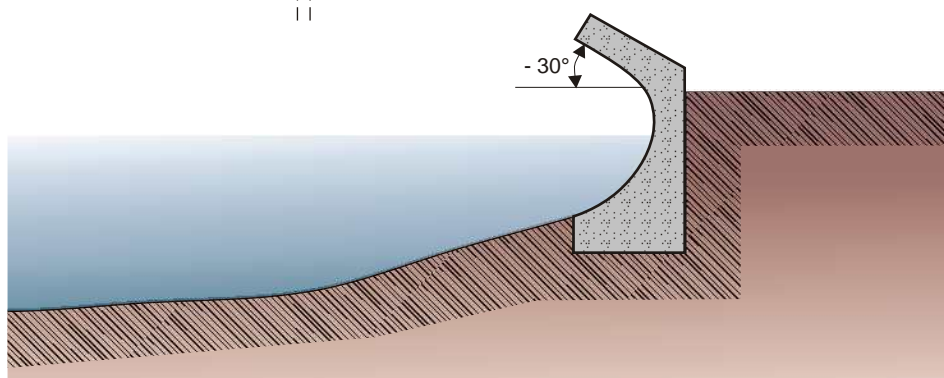
### Muri in c.a. con parete curva

Vengono realizzati per attutire l'impatto e la risalita delle onde, deviandole verso mare. Nel tragitto gran parte dell'energia viene dissipata, attenuando i fenomeni di riflessione. Considerata la forza dell'impatto delle onde, occorre comunque disporre una adeguata protezione al piede del muro.

**Figura 4.3.32:** Esempio di realizzazione di struttura, con muro a raggio composto, fondata su pali e fronteggiata da una protezione inferiore in pietrame. La prima fila di pali viene rinforzata anteriormente grazie all'infissione di una serie di palancole.



**Figura 4.3.33:** Esempio di muro concavo con parapetto inclinato di 30°. La sua funzione principale è quella di evitare che le onde in risalita scavalchino il coronamento e producano erosione a tergo, evitando anche l'ingresso di acqua su strade o vicino ad edifici.



**Figura 4.3.34:** Muro concavo con paraonde. La presenza di un coronamento ricurvo contrasta la risalita e il conseguente scavalcamento dell'opera da parte delle onde più violente. Al piede del muro, o nelle sue vicinanze, è opportuno prevedere la collocazione di massi di protezione.

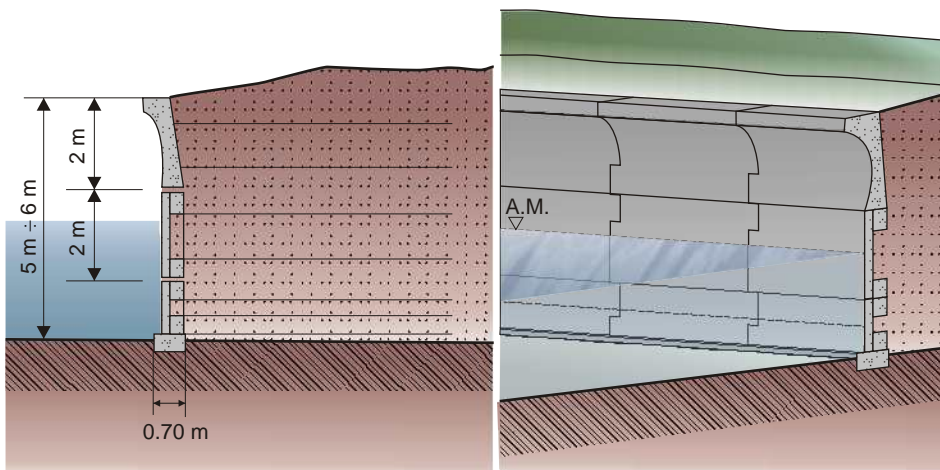
La costruzione viene fatta in sito con getti di calcestruzzo entro casseforme predisposte (vedi riquadro), quando non si utilizzano elementi già prefabbricati. La scelta della tipologia da adottare varia da paraggio a paraggio, in base all'altezza d'onda prevista sulla costa, ai venti, alle correnti litoranee, alla morfobatimetria e alla presenza o meno di strutture antropiche.



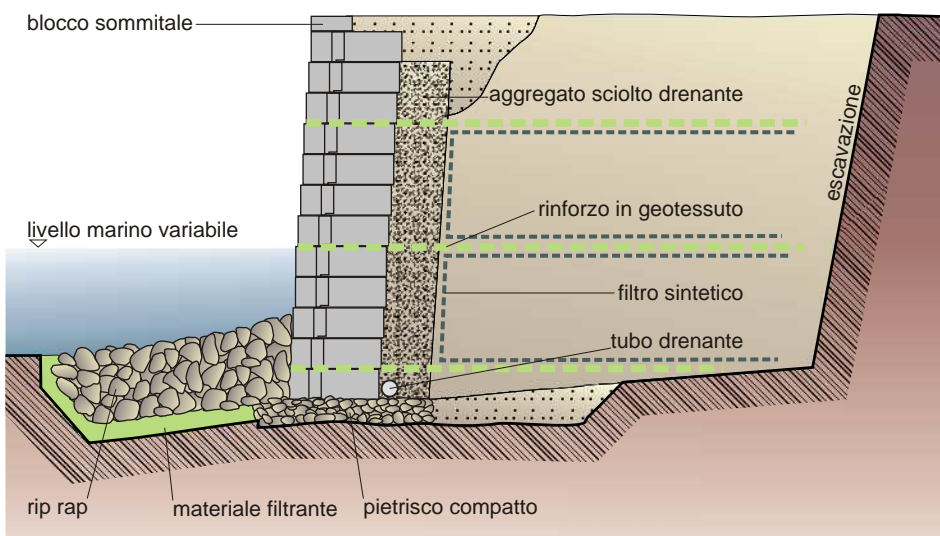
## Muri in terra-armata e in terra rinforzata

I muri in terra armata vengono utilizzati come opere di sostegno, sfruttando le forze resistenti generate dal peso proprio del terreno e dall'attrito tra questo e nastri d'acciaio immorsati al suo interno, che sono collegati verso l'esterno ad un paramento sottile in pannelli di calcestruzzo armato. I muri in terra armata vengono usati per il sostegno di strade e ferrovie costruite lungo le coste. Il muro deve essere poggiato su una fondazione rigida con difesa al piede. Spesso il pannello sommitale è dotato di un risvolto deflettente per limitare i sormonti dell'onda incidente. I muri in terra rinforzata hanno funzione analoga ai precedenti dai quali sostanzialmente differiscono per l'armatura in materiali geosintetici.

**Figura 4.3.35:** Schema di Muro in Terra Armata con pannelli a Z alti 2 metri ciascuno, sistemati a zig zag e giuntati con grandi barre filettate. La struttura è progettata per essere collocata nella parte di spiaggia sommersa. La miglior resa si ha in condizioni di fondali con terreni compatti e in acque poco profonde.



**Figura 4.3.36:** Anchor Wall System. Questo sistema di sostegno in terra rinforzata con armatura di teli di geosintetico, è adatto ad aree costiere con paraggi esposti ad onde di media energia. Il paramento esterno è costituito da blocchi in calcestruzzo, mutuamente interconnessi a formare una parete continua, leggermente inclinata verso terra. Il profilo dell'opera può essere adattabile all'andamento della linea di costa. A tergo del paramento, prima del terrapieno, viene posto uno strato drenante.



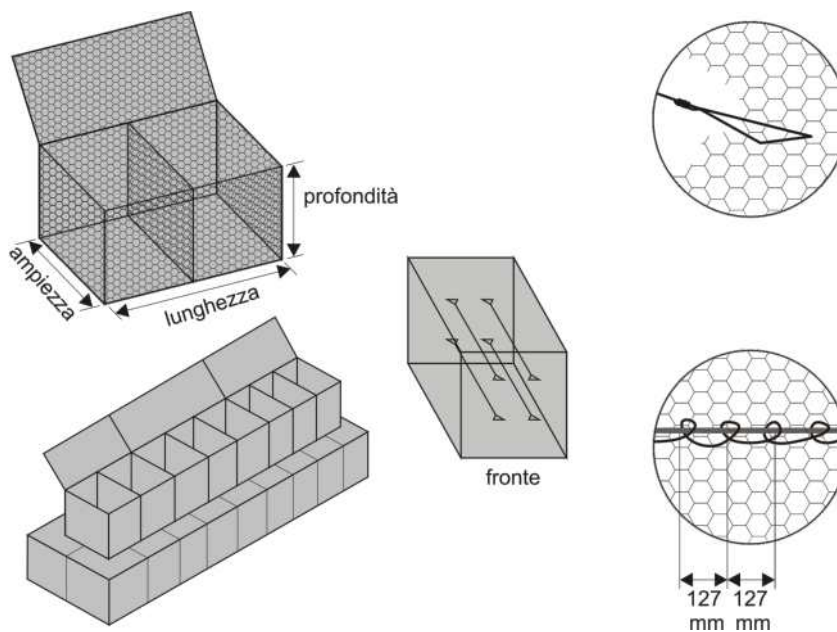
**Figura 4.3.37:** Muro in terra armata a sostegno di una strada.



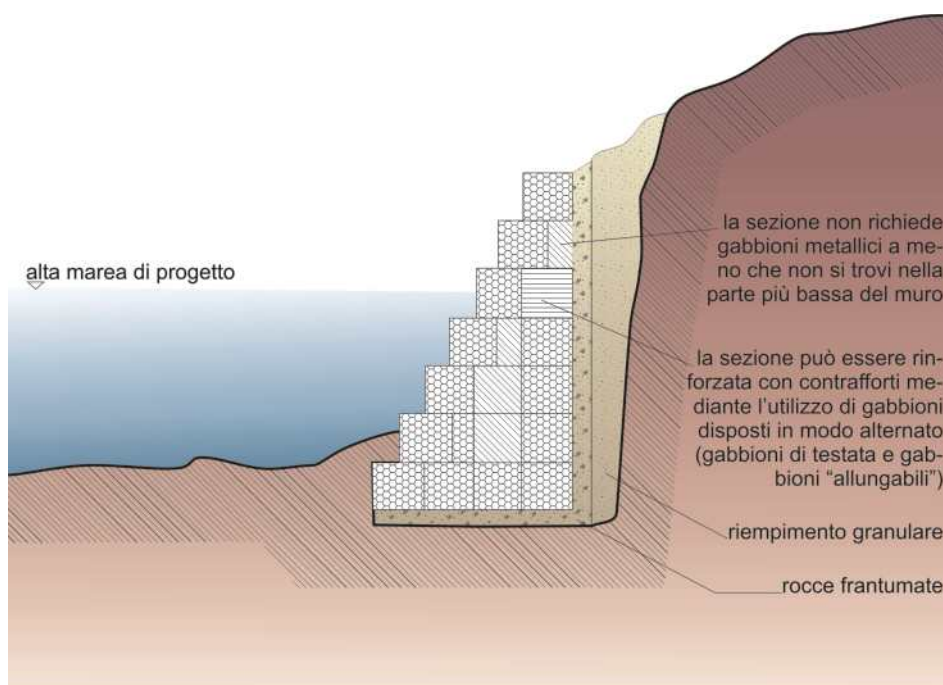
## Muri con gabbionate

Sono muri di sostegno a gravità, di altezza inferiore ai 3-5 metri, con caratteristiche simili ai gabbioni utilizzati nel caso dei rivestimenti. La loro configurazione è a gradonata, con la parete lato terra ancorata al substrato. La caratteristica principale è quella di far sì che buona parte dell'energia del moto ondoso si disperda attraverso le fessure presenti tra le rocce che riempiono i contenitori metallici, poiché si tratta di strutture permeabili da entrambi i lati. La loro realizzazione è indicata in aree con onde aventi moderata energia.

**Figura 4.3.38:** Gabbionate utilizzate per muri a mare. I muri in gabbioni prevedono l'utilizzo di contenitori metallici con diaframmi interni che limitano i possibili movimenti del pietrame di riempimento e rinforzano la struttura. Il riempimento deve essere fatto in modo da non lasciare vuoti fra le rocce e da non determinare deformazioni e rotture della rete metallica.



**Figura 4.3.39:** Muro con gabbioni. La struttura viene costruita a difesa di tratti di costa soggetti a onde aventi moderata energia. La scarpata marina viene sagomata in modo da contenere la sezione del muro, il quale può essere o meno in contropendenza rispetto ad essa. Alla base dell'opera è prevista la collocazione di un filtro in pietrisco o geotessuto che facilita gli assestamenti delle gabbionate.





## PARATIE

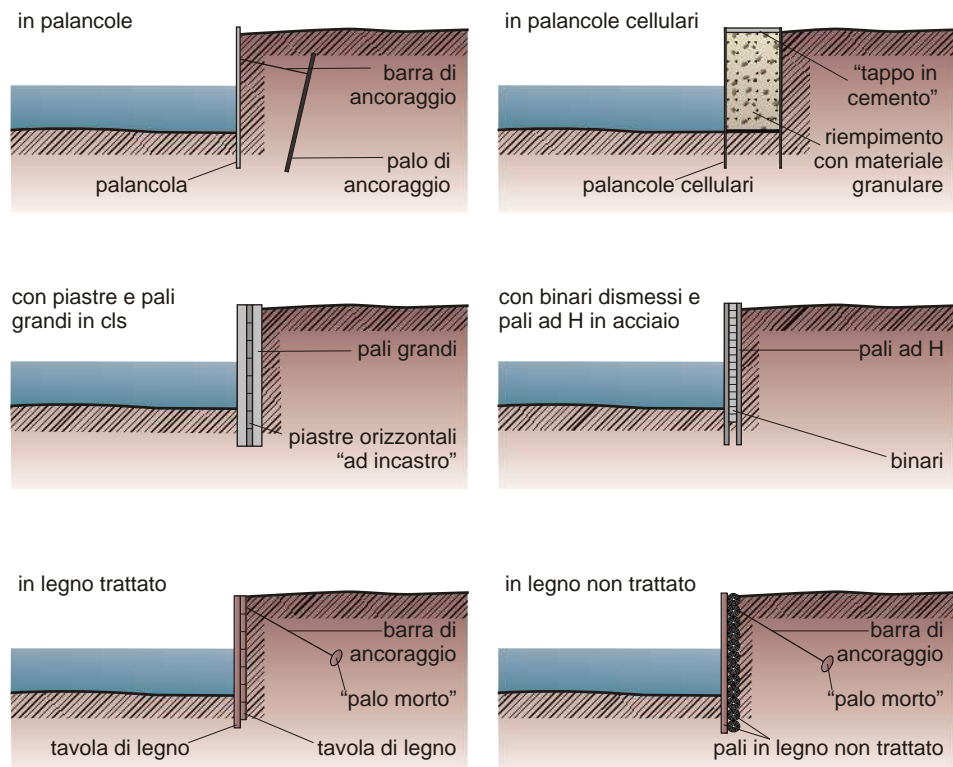
Le paratie sono strutture di sostegno costituite da legname, acciaio o calcestruzzo, allineate alla linea di riva infisse direttamente nel terreno. Vengono spesso utilizzate per la protezione delle sponde dei canali navigabili negli scali portuali e adibite all'attracco o alla sosta di imbarcazioni per finalità commerciali o industriali. Più raramente esse vengono impiegate anche per la difesa di coste in erosione, con funzione di trattenimento e stabilizzazione dei sedimenti. In alcuni casi le paratie vengono costruite a supporto di opere di bonifica idraulica o trovano un'ulteriore applicazione in ambito portuale come temporanea protezione dal moto ondoso in zone dove sono in costruzione opere a mare (banchine, dighe, ecc).

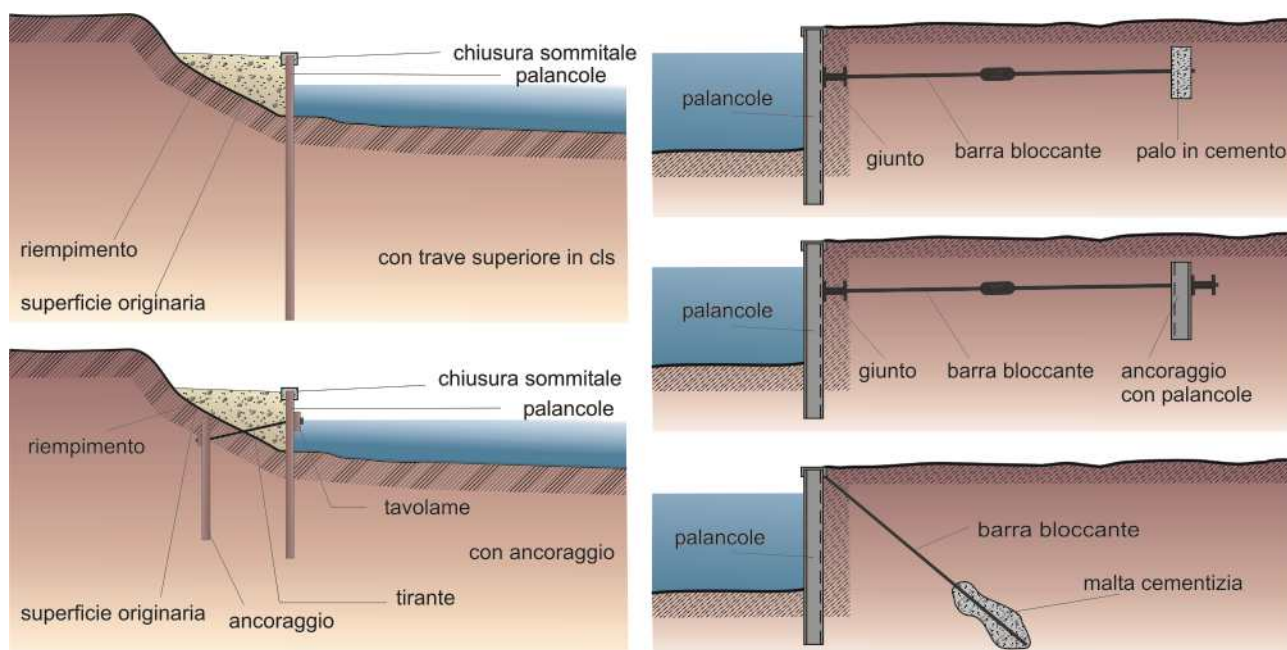
La profondità delle opere dipende dalle caratteristiche del terreno, mentre l'altezza è funzione delle altre condizioni al contorno del sito e dei manufatti da proteggere. Poiché si tratta di strutture sottili, le paratie devono essere dotate di sostegni, atti ad assorbire la spinta del terreno a tergo, che vengono realizzati mediante barre o funi di acciaio aventi adeguati ancoraggi. Se la paratia è abbastanza rigida, in alternativa agli ancoraggi, si può utilizzare una trave superiore di collegamento (cantilever), in modo tale da rendere unitaria e solidale tutta la struttura.

Il lato interno della paratia viene generalmente rivestito con tessuto sintetico che previene il dilavamento del terreno, consentendo la filtrazione dell'acqua. Al piede, in paraggi esposti, è sempre necessario realizzare una protezione per prevenire l'azione di scalzamento ad opera delle onde.

I principali inconvenienti che possono verificarsi durante il funzionamento delle paratie sono rappresentati da un incremento dei fenomeni di riflessione d'onda e dal possibile innesco di un attacco erosivo nei settori ad esse adiacenti.

**Figura 4.3.40:** Esempi comuni di paratie. Le differenti tipologie comprendono, in prevalenza, strutture infisse nel terreno (ad es. palancole), che richiedono una adeguata profondità di penetrazione.

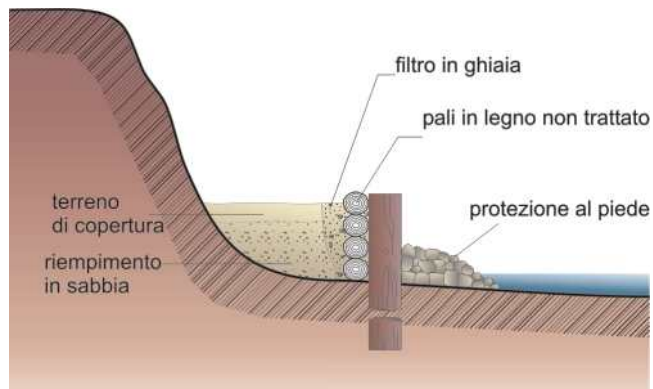
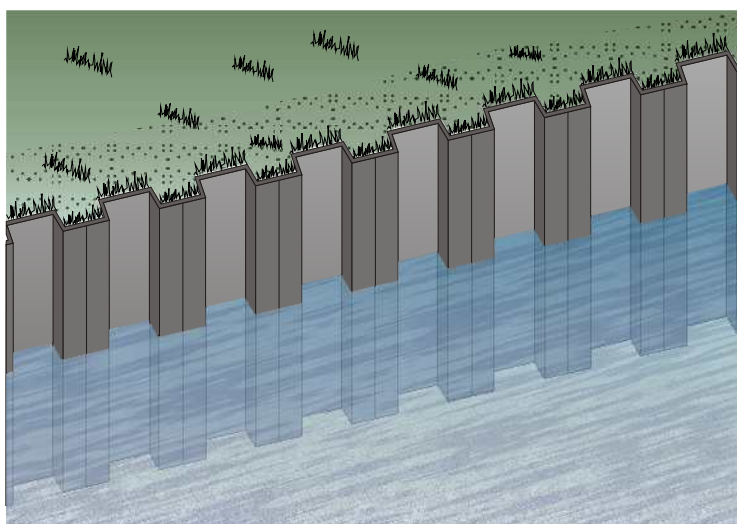




**Figura 4.3.41:** Sistemi di ancoraggio. I diversi tipi di ancoraggio vengono scelti in base alle caratteristiche meccaniche dei terreni e alle condizioni meteomarine locali.



**Figura 4.3.42:** Paratie in acciaio. Sono costituite da palancole metalliche che possono essere infisse sia in terreni compatti che incoerenti. Le loro giunzioni impediscono all'acqua ed alla sabbia di penetrare. La struttura finale può essere chiusa superiormente con una trave in calcestruzzo oppure ancorata.



**Figura 4.3.43:** Paratia in legno. Essa è costituita da pali di grande diametro ai quali sono incastrati pali di legno orizzontali, a tergo dei quali viene fatto un riempimento di ghiaia e terreno granulare, poggiato su tessuto filtrante. L'installazione di un filtro resistente, capace di far da ponte tra i vuoti presenti fra i pali, può garantire una buona integrità del sistema e prevenire rotture.

### Generalità

**L'**erosione costiera, causata dal deficit di bilancio sedimentario delle spiagge, è un processo che potenzialmente interessa oltre 3000 km del territorio costiero nazionale, costituito per il 44% da coste basse sabbiose. Negli ultimi decenni si è osservato un diffuso e significativo arretramento della linea di riva in molte spiagge italiane.

Recentemente, si è cercato di sperimentare contromisure in grado di fronteggiare l'arretramento delle coste in modo organico. Il crescente interesse per le problematiche che riguardano la fascia costiera è ascrivibile anche al notevole impulso del turismo balneare che, soprattutto dalla metà del secolo scorso, ha trasformato le spiagge in aree attrezzate ad alto reddito. Il valore di tali aree, secondo recenti studi, oscilla tra gli 800 ed i 1800 euro/mq e la loro perdita comporta, pertanto, notevoli danni economici, oltre che all'ambiente naturale, in termini di perdita di paesaggio e del suo ecosistema.

Le cause principali dell'erosione costiera sono legate all'azione antropica che, attraverso la realizzazione di invasi, l'escavazione di sedimenti dagli alvei fluviali e la realizzazione di interventi di difesa finalizzati a contrastare le frane dei versanti, nonché ad un uso più estensivo del suolo, ha ridotto in modo significativo il trasporto solido dei fiumi. A queste cause vanno aggiunti anche alcuni fenomeni naturali come gli eventi meteomarinari estremi e le variazioni climatiche.

I notevoli interessi economici e sociali che convergono sulla fascia costiera richiedono l'attuazione di opportuni interventi finalizzati a contrastare l'erosione delle spiagge. Tali interventi dovrebbero agire contrastando le cause del fenomeno e/o contenendo i suoi effetti. Gli interventi più diffusi sono le opere rigide che, riducendo l'energia del moto ondoso, ne contrastano l'azione erosiva e i ripascimenti che, pur non riducendo le perdite di sedimento connesse all'azione erosiva del mare, contribuiscono artificialmente ad aumentare il bilancio sedimentario con l'obiettivo di far avanzare, o quanto meno stabilizzare la linea di riva.

**Figura 4.4.1:** Vista panoramica dell'arenile di Ostia (settore di Levante, Roma) durante gli interventi di ripascimento del 1999. (Foto G.B. La Monica).



**Figura 4.4.2:** Spiaggia protetta con opere rigide. (Foto BeachMed)





---

In base alle caratteristiche del sedimento utilizzato si possono distinguere le seguenti tipologie di ripascimento:

- **Ripascimento non protetto o morbido**
- **Ripascimento protetto da opere rigide**

Il tipo di ripascimento ed il suo costo variano in funzione della granulometria e provenienza degli inerti impiegati. Utilizzando la scala granulometrica di Wentworth (1922), nel caso di materiali con granulometria superiore ai 2 mm l'opera è classificabile come "stabilizzazione con ghiaia"; al di sotto dei 2 mm è classificabile come "ripascimento con sabbia". L'utilizzo di sabbia che, come la ghiaia, può avere origine sia continentale che marina, prevede anche la movimentazione di sedimenti accumulati lungo la costa.

La fase preliminare di un intervento di ripascimento prevede la realizzazione di una serie di studi specialistici volti ad individuare le zone maggiormente esposte al fenomeno erosivo e le caratteristiche del trasporto solido lungo riva (studio geomorfosedimentologico), l'entità e la frequenza delle forzanti meteomarine incidenti nel settore d'interesse (studio meteomarino) e la variazione che la linea di riva potrebbe subire in funzione della sua struttura geolitologica e delle diverse tipologie di opere nel breve e lungo periodo (studio morfodinamico).

Il passo successivo è l'individuazione (per mezzo di prospezioni geofisiche ad altissima risoluzione) e la caratterizzazione (per mezzo di carotaggi e successive analisi chimico fisiche previste dalle normative vigenti in materia) di un deposito sedimentario adatto alla ricostruzione della spiaggia. L'idoneità del sedimento è valutata sulla base di diversi parametri: granulometria, composizione mineralogica e petrografica e, in caso di valore paesaggistico delle spiagge, colore. In particolare, la similitudine delle distribuzioni di frequenza viene definita attraverso due parametri: dimensione media e classamento dei granuli, per garantire il raggiungimento di un profilo di equilibrio dell'arenile stabile nel tempo. La valutazione della deviazione standard o classamento, che esprime di quanto le dimensioni dei granuli si discostano dal valore medio, permette una stima dell'omogeneità dimensionale del sedimento ed è pertanto un parametro di primaria importanza per determinare la qualità di un deposito.

Nell'analisi dei costi, l'ubicazione e il volume di sedimento da movimentare devono essere valutati in dettaglio, in quanto, anch'essi incidono, insieme alla tecnologia e la logistica utilizzati, sui costi ed i tempi di realizzazione dell'intervento.

## Ripascimento non protetto o morbido

Con la definizione “ripascimento non protetto” (o morbido) si è soliti indicare un intervento realizzato tramite il versamento di sedimento lungo un tratto di litorale, al fine di ricostruirlo (anche solo parzialmente), riequilibrarne temporaneamente l'assetto morfodinamico e contribuire artificialmente al suo bilancio sedimentario.

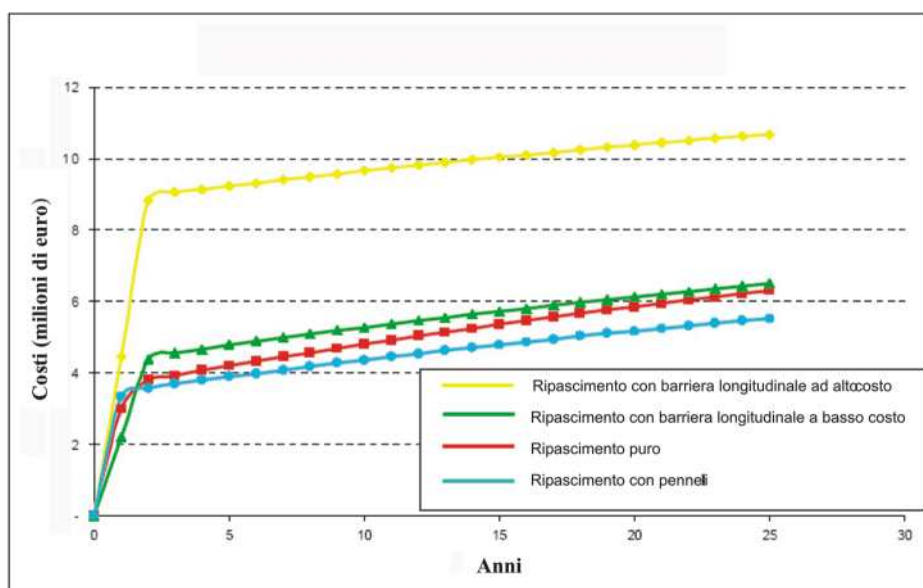
Si tratta di interventi il cui impatto ambientale sugli equilibri dinamici delle spiagge risulta in genere minimo. Infatti questi non prevedono la realizzazione di opere rigide, che alterano le correnti litoranee e la circolazione dei sedimenti lungo costa.

Sotto il profilo economico, gli interventi di ripascimento non protetto sono meno onerosi rispetto a quelli protetti da opere di difesa (fatta eccezione per l'intervento con pennelli trasversali), sia nel breve che nel lungo periodo.

La perdita di sedimento dovuta al trasporto longitudinale o trasversale viene contenuta con interventi di manutenzione. Pertanto, a fronte di un risparmio economico in fase di costruzione, la mancanza di opere di difesa rigide comporta l'utilizzo di maggiori volumi di sedimento (ghiaia, sabbia, ecc.) ed un maggior onere di manutenzione.

Verranno descritte di seguito le seguenti tipologie di ripascimento non protetto:

- Ripascimento con utilizzo di sabbie marine profonde
- Ripascimento con utilizzo di sabbie litoranee
- Ripascimento con utilizzo di materiale di cava
- Intervento con utilizzo di ghiaia



**Figura 4.4.3:** Descrizione degli investimenti necessari alla realizzazione di opere di ripascimento (puro e protetto). Soltanto l'intervento con pennelli trasversali (linea azzurra) risulta meno oneroso nel lungo periodo rispetto al ripascimento puro (linea rossa). (Diagramma Beachmed)

## Utilizzo di sabbie marine profonde

Il ripascimento realizzato con sedimenti provenienti da cave marine prevede lo sfruttamento dei depositi sabbiosi olocenici che giacciono sulla piattaforma continentale fino a circa 100 m di profondità. L'estrazione delle sabbie dal fondo marino presenta vantaggi, quali: i tempi ridotti per la realizzazione degli interventi e i grandi volumi a disposizione; fra gli svantaggi, sono da considerare: la ridotta accessibilità dei giacimenti (spesso sepolti sotto depositi pelitici non idonei ai ripascimenti), lo sfruttamento di depositi che costituiscono una risorsa non rinnovabile, l'alterazione in ambito locale del ciclo geologico della sedimentazione.

Si tratta generalmente di depositi sedimentari riferibili a paleospieagge formatesi a partire dall'ultimo periodo glaciale, quando il livello medio del mare era molto più basso rispetto a quello attuale. Pertanto, l'intervento comporta il versamento sull'arenile di sabbie depostesi in un ambiente morfodinamico e sedimentario analogo a quello della spiaggia attuale.

Dal punto di vista tecnico, l'intervento si realizza da mare mediante l'impiego di draghe, che presentano diverse dimensioni e costi di esercizio in funzione dei volumi da movimentare e della distanza tra il sito di prelievo e quello di ripascimento.



**Figura 4.4.4:** Immagini morfobatimetriche dei fondali della cava marina di Anzio (a sinistra) e di Montalto di Castro (a destra) ottenute per elaborazione dei dati acquisiti con tecnologia multibeam. (Foto ICRAM).

Un deposito sabbioso deve possedere alcuni requisiti fondamentali per essere coltivato ai fini di un ripascimento. I principali sono:

- Spessore non inferiore a 3-4 metri;
- Copertura pelitica non superiore a pochi metri;
- Profondità compresa fra 20 e 70 metri (anche se le draghe più recenti permettono di sfruttare i giacimenti ad oltre 100 m di profondità);
- Significativa estensione areale;
- Ridotte peculiarità geo-ambientali.

Questi vincoli limitano la possibilità di sfruttamento dei depositi sabbiosi e, a causa delle caratteristiche tecnico-operative dei mezzi, riducono a pochi i siti idonei alla coltivazione. Di conseguenza, negli ultimi anni si è verificata una crescente ricerca di nuove cave di prestito, facilitata anche dalla continua evoluzione delle strumentazioni necessarie per le prospezioni.

L'attuale stato delle conoscenze dei fondali marini ed i limiti operativi degli interventi hanno finora permesso di intervenire con questa metodologia solo su alcuni tratti di litorale del nostro paese.



---

I depositi sedimentari da utilizzare devono inoltre avere caratteristiche tali che la loro coltivazione sia compatibile con la salvaguardia degli ecosistemi marini.

Lo sfruttamento dei depositi marini per interventi di ripascimento origina impatti sull'ambiente ridotti rispetto all'utilizzo di inerti provenienti da cave a terra. Le maggiori criticità possono concentrarsi soprattutto nel sito di prelievo e nell'area di refluento, dove la risospensione delle particelle più fini ed il conseguente intorbidamento dell'acqua rappresentano una fonte di disturbo per le forme di vita animale e vegetale. Sotto il profilo estetico-paesaggistico, l'impatto ambientale di un intervento di ripascimento è generalmente positivo o tutt'al più nullo.

In linea teorica il ripascimento può essere applicato a tutte quelle zone di costa sabbiosa che, per il concorso di differenti cause, si trovino in una situazione di deficit sedimentario. In pratica, i costi di intervento, legati al prelievo e trasporto di sedimento, comportano una restrizione del campo di applicazione a quei siti che, grazie alla loro ubicazione, permettono di contenere i costi. La valutazione del rapporto costi/benefici, derivante in genere dalla diversa fruibilità delle spiagge in termini turistici, può risultare un fattore discriminante per la realizzazione di un ripascimento di questo tipo.

**Figura 4.4.5:** Panoramica di una draga in funzione durante la fase di scarico del sedimento. (Foto BeachMed).



**Figura 4.4.6:** Particolare delle tubazioni utilizzate per il refluento di sabbia lungo l'arenile di Ostia nel 1999. (Foto Centro Monitoraggio Litorali Laziali).



## Utilizzo di sabbie litoranee

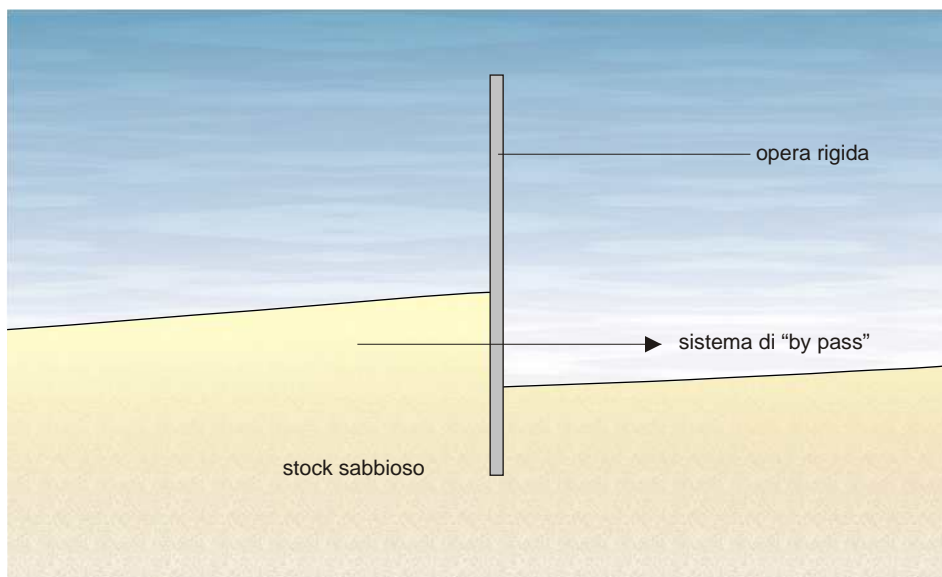
Questa metodologia di ripascimento prevede la movimentazione di sabbie da un arenile all'altro, o da una porzione di spiaggia dove prevalgono processi di accumulo verso tratti in erosione, al fine di distribuire in modo omogeneo il sedimento e riequilibrare il bilancio sedimentario fra unità attigue. Solitamente questi interventi vengono adottati per "recuperare" il sedimento accumulato a ridosso di infrastrutture che, ostacolando la circolazione sottocosta, diminuiscono o interrompono completamente il trasporto lungo riva.

Il ripascimento con sabbie litoranee può essere condotto via terra o via mare. Il ripascimento "via terra" non presenta particolari difficoltà tecniche ed in molti Paesi è tutt'ora applicato come procedura di manutenzione ordinaria delle spiagge. Questa tecnica comporta una pressione sul traffico locale durante la realizzazione degli interventi (analogamente a quanto avviene nei casi in cui si utilizzano cave terrestri) ed una significativa usura del manto stradale, in particolare, se i volumi di sedimento da movimentare sono elevati.

Il ripascimento "via mare" è eseguito utilizzando sistemi di by-pass. Più che di una metodologia progettuale si può parlare di un'efficace tecnica di parziale ripristino del bilancio sedimentario sottoflutto o di opere di manutenzione per ripascimenti già ultimati. Si tratta di interventi a basso impatto ambientale, che permettono inoltre un risparmio di risorse naturali, dal momento che non necessitano di nuovi quantitativi di sedimento, ma consentono di recuperare quanto perso da un arenile a causa del suo squilibrio dinamico. In Italia i sistemi di by-pass sono stati già adottati in diversi siti. Tra i casi più noti si ricordano i Porti di Carrara e Viareggio (Toscana) ed il sabbiodotto permanente che è stato recentemente realizzato per permettere l'attraversamento di porto Canale Garibaldi (Emilia Romagna).

L'intervento con impiego di sistemi di by pass è limitato a quei contesti ambientali in cui si ha la presenza di significativi accumuli di sedimento lungo costa. Va evidenziato che lungo i litorali italiani, costellati di opere marittime di diverso tipo, tale metodologia può trovare molte applicazioni. Il principale vantaggio che essa offre è quello di non necessitare del reperimento continuo di nuovo sedimento, aspetto generalmente più dispendioso per la maggior parte delle strategie di difesa costiera, recuperando e restituendo alla naturale dinamica del litorale quanto perso in precedenza. Nel caso di Porto Garibaldi il costo dell'operazione è stato di circa 10 euro/m<sup>3</sup>. Bisogna sottolineare che l'utilizzo delle sabbie litoranee per il ripascimento degli arenili permette di sfruttare i sedimenti come risorse, prima che diventino un ostacolo alla navigazione (compromettendo la funzionalità delle strutture portuali), che subiscano una contaminazione a causa delle attività antropiche (divenendo pressoché inutilizzabili) o che siano rimosse abusivamente.

**Figura 4.4.7:** Schema di applicazione di un sistema di by pass per il refluento di sabbie litoranee accumulate a ridosso di un'opera antropica.



Nel caso di by pass a mare, con pompe aspiranti-refluenti, l'impatto generato sull'ambiente costiero è piuttosto ridotto, dal momento che si tratta di un refluento di sedimento sulla spiaggia emersa della durata di pochi giorni. A Porto Garibaldi, ad esempio, sono stati recentemente movimentati 214.000 m<sup>3</sup> in due settimane. In caso di intervento via terra, l'impiego di autocarri per il trasporto del sedimento allunga i tempi di realizzazione e comporta stress ambientali simili a quanto descritto nella parte relativa all'utilizzo di materiali di cava.

### **Sistema di by pass a mare**

Questa tipologia di intervento prevede l'impiego di pompe, installate su base fissa o su mezzi flottanti, in grado di aspirare una miscela di acqua e sedimento (solitamente costituita dall'80% e 20%, rispettivamente) da una zona di accumulo per distribuirlo lungo il tratto di litorale da ricostruire, oltrepassando l'opera antropica che interrompe il naturale trasporto sedimentario. Spesso l'operazione è concentrata in uno spazio ridotto e si limita a depositare il materiale nella zona limitrofa al molo o al pennello che si intende superare. Altre volte il sedimento recuperato può essere ricollocato anche a maggiori distanze: il sabbiodotto realizzato recentemente sul litorale ferrarese, ad esempio, ha interessato un settore di 7-8 km. In questi casi si utilizza un sistema di tubazioni, generalmente in polietilene, del diametro di pochi decimetri, opportunamente adagiate sul fondale mediante zavorre. Nella fattispecie l'opera risulta più complessa e più onerosa, vista la strumentazione di cui necessita. Il meccanismo di aspirazione dei sedimenti può essere ottimizzato utilizzando un disgregatore ad acqua per risospendere il sedimento, che viene poi aspirato e convogliato nelle tubature.

### **Sistema di by-pass a terra**

Questo tipo di intervento prevede la ridistribuzione di sedimento lungo il litorale attraverso il recupero da una zona di accumulo, il successivo trasporto su strada (generalmente mediante autocarri) e, infine, il versamento nel tratto di litorale da ricostruire, dando origine ad una cella di drift litoraneo alimentata artificialmente. Le difficoltà logistiche, l'impatto sull'ambiente, i costi legati al trasporto su strada (quando possibile anche direttamente sull'arenile) rappresentano i limiti maggiori di questa soluzione, che sinora ha trovato poche applicazioni sul nostro territorio.



**Figura 4.4.8:** Messa in opera della tubatura per by pass al Porto Canale Garibaldi (Foto A. Peretti).



**Figura 4.4.9:** Disgregatore ad acqua utilizzato per mobilizzare il sedimento dall'area di dragaggio (Foto A. Peretti).



## Utilizzo di materiale di cava

Il ripascimento realizzato con materiali provenienti da cave a terra è stato per molti anni quello più diffuso, dal momento che l'individuazione del materiale sul territorio risultava più facile rispetto a quella in ambiente marino.

In questo tipo d'intervento risulta prioritario effettuare una dettagliata caratterizzazione sedimentologica e stratigrafica dei depositi di cava, indispensabile per valutare la compatibilità dei sedimenti con quelli dell'arenile e per quantificare i volumi da coltivare.

Dopo aver eseguito la caratterizzazione dei depositi, il materiale che risponde ai requisiti progettuali del ripascimento viene eventualmente selezionato attraverso setacciatura. Il fattore che influisce maggiormente sul prezzo unitario finale dell'inerte è il costo del trasporto, che generalmente avviene su gomma.



**Figura 4.4.10:** Camion utilizzato per trasporto di materiale di cava. (Foto M. Conti).

La realizzazione di un ripascimento con materiali di origine continentale è piuttosto complessa e articolata. Allo studio preliminare, cui si è fatto già cenno, segue la caratterizzazione di dettaglio del sito di prelievo, per il quale sono valutate le caratteristiche dei depositi da un punto di vista qualitativo e quantitativo. Le indagini si svolgono solitamente per mezzo di prospezioni geofisiche, geognostiche o, dove possibile, con un'analisi diretta degli affioramenti. Ad esempio, i materiali di Ponte Galeria utilizzati a Ostia Centro nel 1990, costituiscono parte della struttura deltizia ed alluvionale del Fiume Tevere. Attraverso le prospezioni sismiche e l'esecuzione di sondaggi, sono stati ricostruiti con un alto livello di dettaglio gli eventi geologici che hanno influito sulla evoluzione dell'ambiente deltizio durante gli ultimi 17.000 anni, ossia dall'ultima fase di low stand marino (minimo del livello marino, 110-120 m) fino ad oggi. Operando una coltivazione selettiva dei depositi, o effettuando una prima setacciatura nei piazzali di cava, si può ottimizzare il rendimento, aumentando il rapporto tra materiale compatibile con il ripascimento e volume totale estratto. Il materiale così ottenuto viene trasportato con autocarri sul tratto di litorale da ripascere, quindi steso con l'ausilio di pale meccaniche.



**Figura 4.4.11:** Sequenza stratigrafica dei depositi di delta del Fiume Tevere affioranti lungo un fronte di cava a Ponte Galeria (Roma). (Foto S. Milli).



**Figura 4.4.12:** Fronte di scavo di una cava di Ponte Galeria nei pressi di Roma. (Foto S. Milli).

Diversi sono i problemi ambientali generati dallo sfruttamento di cave terrestri e dal successivo versamento degli inerti nei siti di intervento.

L'impatto ambientale dell'opera è rilevante sia nella zona di prelievo dell'inerte che nell'area di versamento. Durante la coltivazione si verifica un cambiamento del paesaggio che è funzione delle caratteristiche morfologiche dell'area di escavazione e dell'intensità e durata dell'attività estrattiva. Gli interventi di ripristino ambientale previsti dalle recenti normative nazionali e regionali durante ed al termine della coltivazione hanno permesso il risanamento di alcune aree di cava, ma per altre non sempre gli interventi di recupero sono possibili, efficaci o economicamente sostenibili.

L'intervento di ripascimento può inoltre causare stress ambientali su vaste aree congiungenti le cave con l'arenile in ricostruzione. In particolare, tra gli impatti legati al trasporto su strada dei materiali, limitatamente al periodo dei lavori e all'area interessata, vi sono inquinamento, diffusione di polveri sottili, usura delle strade e rallentamento della circolazione.

In linea generale, gli interventi di ripascimento che prevedono l'utilizzo di sedimento trasportato da terra hanno un tempo di esecuzione molto più lungo (qualche mese) rispetto a quelli che prevedono il trasporto di sedimento da mare (una o due settimane), a parità di volumi immessi. Questo riduce notevolmente l'impatto sugli organismi marini, alcuni dei quali hanno la possibilità di allontanarsi dall'area se infastiditi dal versamento di inerte, ma al tempo stesso rende l'arenile parzialmente inagibile ed esposto a forti mareggiate (potenziale causa di erosione accelerata) durante il periodo necessario al completamento dell'opera.

Il ripascimento per mezzo di materiale di cava a terra ha un ampio spettro di applicazione e può essere realizzato, in linea teorica, in tutti i siti che necessitano di un riequilibrio del proprio bilancio sedimentario. In realtà, per rendere l'intervento vantaggioso, è indispensabile che l'inerte sia coltivato non lontano dell'arenile da ricostruire, dato l'elevato costo del trasporto. In Italia l'intervento più importante di ripascimento protetto con materiale di cava è stato realizzato nel 1990 ad Ostia Centro. In tale occasione, circa 1.300.000 mc di sabbia e ghiaia sono stati estratti dai depositi di Ponte Galeria e trasportati con autocarri (75.000 viaggi). Molto più spesso si è ricorsi all'utilizzo di materiale di cava per eseguire interventi di ripascimento su brevi tratti di litorale o per la manutenzione delle strutture di difesa costiera, praticati talvolta dagli stessi operatori balneari e dai proprietari di strutture prospicienti la costa.



**Figura 4.4.13:** Particolare dei piazzali di cava durante la coltivazione delle arenarie. (Foto M. Conti).



**Figura 4.4.14:** Lavori per ripascimento protetto di Ostia Centro (1989). Notare che il camion che entra nel cantiere ha il carico di sabbia coperto da un telo al fine di ridurre la dispersione del sedimento durante il trasporto. (Foto Centro di Monitoraggio dei Litorali Laziali).

## Interventi con utilizzo di ghiaia

In Italia la ghiaia viene estratta principalmente da cave a terra, anche se in altri paesi, in particolar modo nel Regno Unito, si è praticata negli ultimi anni una intensa coltivazione anche in ambiente marino. La ghiaia viene spesso utilizzata anche per conferire maggior stabilità ad arenili il cui sedimento originario è sabbioso.

Vi sono due tipologie di spiagge artificiali in ghiaia: una è finalizzata a consentire l'uso turistico dell'arenile, l'altra è progettata principalmente per garantire la difesa di strutture prospicienti la costa ed ha come sottoprodotto una spiaggia eventualmente sfruttabile dal punto di vista turistico.

Questo tipo di intervento ha come prima finalità quella di proteggere un arenile conferendogli notevole stabilità e capacità di assorbimento dell'energia del moto ondoso. Sotto il profilo paesaggistico l'impatto è piuttosto difficile da prevedere, in quanto il risultato di un ripascimento in ghiaia può essere diverso in funzione delle caratteristiche e dei volumi del materiale utilizzato. In alcuni casi avviene una sepoltura rapida e, anche se mai definitiva, piuttosto duratura della ghiaia. In tal caso l'impatto può considerarsi pressoché irrilevante. In altri contesti il profilo complessivo dell'arenile può risultare alterato nella zona di raccordo fra la cresta della berma e la battigia, con parziale compromissione della fruibilità della spiaggia.

In linea generale, la torbidità dell'acqua antistante una spiaggia in ghiaia è piuttosto bassa. Ben più problematico è il caso in cui il grado di arrotondamento dei clasti utilizzati (soprattutto se provenienti da macinazione) non è sufficientemente elevato da consentire ai bagnanti il calpestio a piedi nudi.

Gli interventi con utilizzo di ghiaia vengono scelti per siti particolarmente compromessi e di limitata estensione, caratterizzati da bilancio sedimentario fortemente negativo, la cui salvaguardia ha notevole importanza per le infrastrutture ubicate a ridosso dell'arenile (strade, linee ferroviarie, ecc.). Come nel caso delle sabbie, anche per l'utilizzo di ghiaia è preferibile che il sito di intervento sia ubicato relativamente vicino al sito di estrazione, al fine di contenere i costi del trasporto.

Dal punto di vista turistico, e conseguentemente economico, un versamento di ghiaia, a causa delle caratteristiche tessiturali e per le variazioni morfologiche cui è soggetto nel tempo, non garantisce la stessa fruibilità di una spiaggia ricostruita con sabbia.



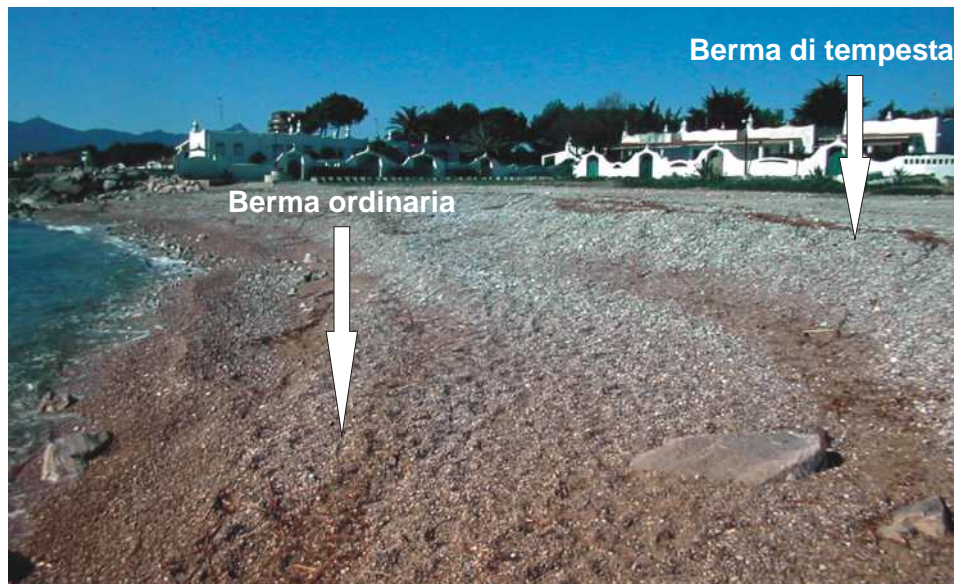
**Figura 4.4.15:** La spiaggia di Cala Gonone, Sardegna Orientale prima (sinistra) e dopo (destra) l'intervento con ghiaia. (Foto E. Pranzini).



L'impiego di ghiaia origina un spiaggia poco mobile, dunque più “resistente” all'azione erosiva del mare. L'inerte ha buoni tempi di persistenza sul sito di intervento, allungando l'intervallo di tempo necessario per nuovi versamenti e riducendo di conseguenza i costi di manutenzione dell'opera. Il materiale grossolano conferisce alla spiaggia una discreta porosità che è la caratteristica ottimale per l'assorbimento dell'energia del moto ondoso, anche in caso di eventi meteomarinari estremi.

Gli svantaggi dell'utilizzo di ghiaia su arenili sabbiosi sono l'alterazione del profilo di spiaggia originale e l'imprevedibilità dell'evoluzione morfologica post-opera del sito. In particolare, si è spesso riscontrato che la spiaggia oggetto di versamenti di ghiaia presenta una cresta di berma elevata (gravel ridge) e una fascia di battigia ripida, in quanto il materiale versato non viene uniformemente distribuito sulla spiaggia ma tende ad accumularsi sulla berma. Una parte del materiale tende a distribuirsi verso l'interno dell'arenile, oltre la berma, formando ventagli di sedimento (washover fans). Questa distribuzione del materiale può comportare ristagni d'acqua e limitare lo scambio di sedimento fra la porzione emersa e sommersa della spiaggia. Al fine di modificare le caratteristiche granulometriche del materiale, ad esso possono venire aggiunte piccole porzioni di sedimento più fine. Oppure, cosa che comporta una certa complicazione rispetto alla fruibilità turistica, le classi più grossolane possono essere macinate.

**Figura 4.4.16:** Dettaglio del gradino di berma tipico delle spiagge ghiaiose artificiali. (Foto G. Bovina).



**Figura 4.4.17:** Dettaglio dei washover fans sulla spiaggia di Foce Verde (Latina). (Foto G. Bovina).



## Ripascimento protetto

**I**l termine “ripascimento protetto” indica un intervento di difesa costiera realizzato con versamento di sedimenti accoppiato ad una serie di opere rigide (barriere, pennelli o entrambi), costruite al fine di contenere il materiale versato e proteggere l'arenile dai processi erosivi.

Tutte le considerazioni riguardanti le diverse tipologie di sedimenti utilizzati per opere di ripascimento non protetto devono considerarsi valide anche per interventi di questo tipo. Il ripascimento protetto si distingue principalmente in quanto crea spiagge con ridotto dinamismo e maggiore durata; per questo motivo è, al momento, la soluzione maggiormente adottata sul territorio nazionale.

Il ripascimento protetto, che necessita di un investimento superiore a quello richiesto per il solo versamento di sabbia (ripascimento morbido), ha lo scopo di ridurre i fabbisogni di sabbia prolungando gli intervalli di tempo fra versamenti manutentivi successivi. La presenza delle opere rigide permette, infatti, di diminuire la perdita di sedimento dal settore di costa che si vuole proteggere.

La realizzazione delle opere rigide a protezione della spiaggia ricostruita altera le caratteristiche idrodinamiche originali dell'area costiera, provocando cambiamenti dell'ambiente marino circostante sia a breve che a lungo termine. La presenza di barriere frangiflutti, in particolare, modifica la circolazione dei sedimenti influenzando, nel lungo periodo, il bilancio sedimentario della spiaggia, che può subire una significativa variazione del profilo originale. Inoltre, i pennelli sono soggetti, in corrispondenza di mareggiate piuttosto forti, a fenomeni di escavazione (scouring) intorno al piede della struttura. La presenza di correnti rivolte verso il largo, di forte intensità, come quelle che possono originarsi nei varchi di barriere sommerse può, inoltre, rappresentare un pericolo per la balneazione. In ultimo, la presenza di opere di difesa (in particolare i sistemi costituiti da pennelli e barriere soffolte) riduce la circolazione delle acque, aumentandone il tempo di residenza su bassi fondali, e determina un'alterazione delle loro proprietà fisico-chimiche.

**Figura 4.4.18:** Serie di pennelli con versamento di sedimento realizzata sulla spiaggia di Valencia (Spagna). (Foto BeachMed).





Il ripascimento protetto costituisce uno sviluppo recente nell'ambito degli interventi di salvaguardia e protezione delle coste e può essere applicato ad un'ampia gamma di situazioni, laddove ci sia una conoscenza approfondita della dinamica sedimentaria. Le opere di protezione devono comunque essere progettate per ridurre al minimo il proprio impatto sui processi morfodinamici della spiaggia e dell'unità fisiografica in cui si trovano, con l'obiettivo di proteggere e mantenere per periodi relativamente lunghi le spiagge ricostruite.

Un limite del ripascimento protetto può essere legato alla fruibilità delle spiagge aventi interesse economico, nelle quali la presenza di opere rigide può ridurre l'accessibilità. Per esempio, le barriere soffolte che sono caratterizzate da una sommergenza ridotta, cioè da una cresta molto vicina alla superficie dell'acqua, riducono le possibilità di collegamento tra l'arenile ed il mare, oltre a rendere più difficile la navigazione delle piccole imbarcazioni.

Il ripascimento protetto è un intervento che prevede la realizzazione di opere rigide di protezione e un successivo versamento di sedimento a ridosso di queste. Le caratteristiche dell'intervento possono, dunque, variare come pure i costi ed i tempi di realizzazione, in funzione di tipologia, dimensioni e disposizione delle opere in progetto. Le principali tipologie di opere realizzate a protezione dell'arenile sono le barriere frangiflutti (negli ultimi anni si sono preferite quelle soffolte), i pennelli, o una combinazione delle due.

**Figura 4.4.19:** Andamento a cuspidi della linea di riva influenzato dalla presenza di opere di protezione. (Foto Beachmed).



**Figura 4.4.20:** Bozza del progetto di una spiaggia artificiale protetta con pennelli e barriera soffolta a Marina di Pisa. (Foto BeachMed).





## Generalità

**P**er “Aree Costiere Umide” si intendono quei settori del litorale in cui sono presenti piccoli bacini quali lagune, stagni, paludi e laghi costieri, permanenti o temporanei, le cui acque possono essere statiche o correnti, salmastre o salate, la cui profondità, nella fase di bassa marea, non supera i 6 metri (Convenzione RAMSAR).

Benché non ci sia accordo completo tra le diverse definizioni utilizzate in letteratura, in generale viene chiamato bacino costiero un'insenatura marina che si isola, nel tempo, dal mare aperto, per evoluzione di un cordone litoraneo. Il collegamento con il mare può essere limitato, periodico o del tutto assente. In genere si parla di “lago” in senso stretto quando si è in presenza di dimensioni e profondità ragguardevoli. Se il battente varia di molto nel corso delle stagioni ed il bacino è fortemente condizionato dalla distribuzione temporale delle precipitazioni meteoriche o dall'alimentazione di falda e di corsi d'acqua effimeri, si usa più correttamente il termine di “stagno” (ad esempio gli stagni retrodunali). Quando sono presenti invece ampie bocche di collegamento fra bacino e mare aperto si parla generalmente di “lagune”.

Un'ulteriore suddivisione delle zone umide costiere può essere fatta sulla base delle modalità di formazione e della salinità: si va dai laghi costieri salati formati per evoluzione di cordoni dunali o di tomboli (es. lago di Orbetello, peraltro comunemente definito “laguna di Orbetello”) ai bacini idrici di acqua prevalentemente dolce generati dall'evoluzione complessa dei delta fluviali dei grandi corsi d'acqua (ad esempio, alla foce del Po).

Le modalità con cui esse si originano ed evolvono dipendono dai complessi equilibri che si instaurano, lungo la fascia costiera, tra moto ondoso, correnti e maree, in relazione anche all'apporto, deposito ed erosione dei sedimenti.



**Figura 5.0.1:** Modello semplificato della genesi dei laghi di Lesina e Varano. All'inizio dell'Olocene, con la risalita del livello marino, l'Adriatico occupa due ampie insenature lungo la costa garganica. L'erosione della costa consente l'accumularsi dei sedimenti sabbiosi e le correnti marine, che nell'area favoriscono trasporto e deposito prevalentemente verso occidente, portano alla formazione di cordoni litoranei che, con il passare del tempo, tendono a saldarsi e ad isolare bacini di laguna ristretta. Nel caso del Lago di Lesina la chiusura del bacino è stata favorita anche dall'accumularsi dei depositi alla foce del Fiume Fortore.

Le condizioni ideali per la formazione di aree umide e per la loro conservazione si realizzano in periodi di sostanziale stabilità o risalita lenta del livello marino (sia per cause climatiche che per subsidenza locale), in corrispondenza di apparati fluviali deltizi, dove l'azione del mare tende a ridistribuire lungo la costa i sedimenti trasportati dai corsi d'acqua. Con il passare del tempo i depositi tendono a stabilizzarsi e a costituire lunghe lingue di sabbia e limo parallele alla linea di costa (cordoni litoranei) che isolano bacini idrici, quali appunto le lagune, i laghi e gli stagni costieri. La complessa interazione tra sedimenti, salinità delle acque, morfologia dei bacini, ed associazioni vegetali, diversifica in seguito questi ambienti, nei quali i due processi geomorfologici concomitanti, l'uno dovuto all'azione dei fiumi e l'altro a quella del mare, evolvono verso uno stato di equilibrio, sempre molto dinamico.

L'equilibrio estremamente delicato di questi ambienti, fortemente condizionato dal clima e dall'uomo, ne amplifica la valenza naturalistica e paesaggistica. L'articolata morfologia e le ampie variazioni di salinità e di temperatura condizionano pesantemente la vita degli organismi animali e vegetali che colonizzano questi ecosistemi. Non si tratta in realtà di luoghi in cui è facile vivere, bensì di habitat severi, fortemente selettivi, talora "estremi": solo le specie che presentano adattamenti fisiologici particolari riescono a compiere l'intero ciclo vitale.

La severità delle condizioni ambientali fa sì che la biodiversità della fauna acquatica e ripariale sia in genere modesta. Le specie che si sono adattate a queste condizioni di vita proliferano quindi in numero spesso molto elevato di individui, costituendo una risorsa alimentare di eccezionale importanza per altri organismi, e per il genere umano (la caccia e la pesca nelle aree umide sono pratiche antiche quanto l'uomo stesso).

**Figura 5.0.2:** Lungo le coste adriatiche settentrionali sono presenti numerosi stagni costieri connessi alle grandi lagune di Grado-Marano, Venezia-Chioggia e del delta del Po. Proprio in corrispondenza del tratto terminale del Po, si sviluppano le ben note "Valli di Comacchio", con bacini estesi circa 100 km, profondità media di 0,6 m e massima di 2 m, separate dal mare da un cordone sabbioso largo un paio di chilometri.

Oltre allo sfruttamento di tali risorse, con mezzi sempre più moderni ed impattanti, negli ultimi 150 anni, il rapporto tra uomo e aree umide costiere si è sviluppato sino ad alti livelli di conflittualità, che hanno originato grandi modifiche ambientali e paesaggistiche. La realizzazione delle grandi bonifiche del secolo scorso, ad esempio, volta a sottrarre alle acque le terre inospitali per combattere la piaga della malaria e disporre di nuove aree per la coltivazione, ha rappresentato una conquista ed un momento importante di crescita economica e sociale. Questa pratica, però, ha portato ad un completo stravolgimento del paesaggio e ad una grave alterazione dell'equilibrio instauratosi in secoli di convivenza con l'ambiente naturale.



**Figura 5.0.3:** Nel Salento, nei dintorni di Otranto sono presenti alcuni fra i più importanti laghi costieri italiani: i Laghi Alimini; quello settentrionale è circondato da tre lati dall'antica linea di costa paludosa e verso mare il limite è definito da un'area dunale. Il cordone costiero, largo in alcuni punti poche decine di metri, è interrotto da un canale che permette lo scambio tra lago e mare.

Dopo la fase delle bonifiche, la disponibilità di nuove aree per attività economiche e turistiche, potenzialmente fonte di grande ricchezza, ha favorito il proliferare di progetti di sviluppo spesso ad elevato impatto ambientale, frutto di una pianificazione approssimativa o addirittura inesistente. L'intensa espansione industriale, la progressiva e sempre più pressante urbanizzazione delle coste hanno modificato a tal punto l'estensione e le caratteristiche naturali delle zone umide costiere da poterle ormai considerare, a tutti gli effetti, degli ambienti relitti, presenti in areali estremamente ristretti.

Le principali cause del degrado delle zone costiere umide e, più in generale, delle fasce litorali, sono costituite dalla modifica dell'assetto idraulico, dell'apporto e dell'equilibrio idrico, nonché dallo stravolgimento di alcune unità morfologiche fondamentali che le caratterizzano (duna, cordone litorale, ecc.).

Gli effetti sono di elevato impatto su fattori di tipo sia ecologico (modifica degli habitat ed ecosistemi animali e vegetali), sia geomorfologico (scomparsa o riduzione di dune, cordoni, barene e velme) sia economico (danni alle infrastrutture per erosione ai litorali e riduzione del valore economico degli ambienti).

La tutela delle aree umide costiere è legata principalmente al mantenimento delle condizioni di equilibrio esistenti tra l'erosione e l'apporto di sedimenti, in presenza di condizioni idrauliche spesso diverse da quelle iniziali attraverso cui si era raggiunto l'equilibrio stesso.

Le opere per la mitigazione degli effetti del degrado, descritte in questo capitolo, sono volte principalmente al mantenimento dei caratteri morfodinamici dei siti, ricercando un equilibrio tra erosione e sedimentazione, e prevedono, principalmente, il ripristino e/o la conservazione delle strutture naturali. Si tratta per lo più di opere che prevedono l'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica, che sono riassumibili nelle seguenti tipologie principali:

- **Opere di sistemazione idraulica e geomorfologica**
- **Opere per il controllo dell'erosione**
- **Opere stabilizzanti**
- **Opere combinate di consolidamento**



**Figura 5.0.4:** Il lago di Paola, visto in direzione SE, dal ponte di Sabaudia, (sullo sfondo il M. Circeo) e in direzione NO, dal M. Circeo.



### Generalità

**L**e opere per il mantenimento idraulico e geomorfologico di una zona costiera umida sono:

- **Opere di regolazione idrica (dragaggi)**
- **Opere di ricostruzione di Dune, Velme e Barene**

### Descrizione e caratteristiche

#### Opere di regolazione idrica (dragaggi)

La circolazione delle acque ed il ricambio idrico tra la laguna ed il mare rappresentano gli elementi primari necessari al mantenimento dei delicati equilibri fisici e biologici dell'ambiente lagunare e delle sue risorse.

Nel caso di una circolazione idrica carente, si avrebbe, ad esempio, una naturale evoluzione verso ambienti acquitrinosi, soggetti nel tempo ad interrimento e, conseguentemente, ad una progressiva scomparsa.

Questo tipo di intervento, di semplice concezione, è finalizzato, a migliorare la circolazione idrica dell'area, a prevenire l'interrimento dei canali e a ripristinare le normali caratteristiche della dinamica lagunare. Esso consiste nella ricalibratura del letto dei canali, interessati da un progressivo interrimento, mediante dragaggio. Il sedimento viene asportato mediante l'utilizzo di draghe o pompe draganti. La profondità che va raggiunta è variabile in funzione degli scopi prefissati e della morfologia dell'area. Il materiale dragato durante queste operazioni può essere utilizzato per la ricostruzione e/o il ripascimento di dune, velme e barene.

#### Opere di ricostruzione di Dune, Velme e Barene

Le dune rappresentano il risultato di lenti processi di accumulo di sedimenti ad opera del vento e costituiscono un serbatoio in grado di rifornire naturalmente le spiagge soggette ad erosione. I principali meccanismi di degrado dipendono sia da fattori naturali, quali l'erosione delle coste, le oscillazioni del livello marino e la subsidenza, sia da fattori antropici, quali l'urbanizzazione del litorale e lo sviluppo di infrastrutture lungo costa. La ricostruzione delle dune viene fatta mediante l'apporto di sabbia, scelta dopo accurate analisi granulometriche, petrografiche e sedimentologiche, che abbiano accertato l'affinità con i sedimenti del sito d'intervento. Dopo il versamento del materiale, a mezzo di autocarri o tramite impianti di refluento fisso, le dune devono essere modellate e sagomate. Successivamente è necessario stabilizzare le scarpate dunali mediante vimate rivestite, schermi frangivento e vegetazione resistente o adatta all'ambiente marino (es: ammofile, tamerici...).

Le velme e le barene, strettamente legate all'ambiente lagunare, sono strutture pianeggianti costituite da sedimenti in prevalenza fini o fangosi, in zona intertidale, sommerse periodicamente (velme) o episodicamente (barene) dalle acque. Nel caso in cui esse siano interessate da fenomeni erosivi e/o di riduzione areale, gli interventi di ripristino ambientale prevedono la ricostruzione della morfologia e degli ecosistemi preesistenti, mediante l'incremento artificiale degli accumuli di sedimento entro zone con perimetro ben determinato. Ove necessario, cioè nelle barene emerse, la stabilizzazione del deposito può essere attuata mediante il rinverdimento con piante alofile.

**Figura 5.1.1:** Foto A) Barena di Certosa (Laguna Veneta)  
Foto B) Sistemi di barene e velme nell'area della Laguna Veneta.  
Foto C) Rinverdimento di una barena con piante alofile (Laguna Veneta).



### Generalità

**L**e opere per il controllo dell'erosione sono volte al controllo dei processi erosivi che si verificano lungo le sponde delle lagune e lungo gli argini dei canali lagunari, attraverso la protezione superficiale ed il rinforzo delle porzioni di sponda instabile a contatto con l'acqua.

Le tipologie più comunemente realizzate sono costituite da:

- Rivestimento con biotessili in cocco o in juta
- Rivestimento vegetativo con geostuoia sintetica tridimensionale e rete metallica a doppia torsione
- Geostuoia sintetica tridimensionale prebitumata industrialmente a caldo

### Descrizione e caratteristiche

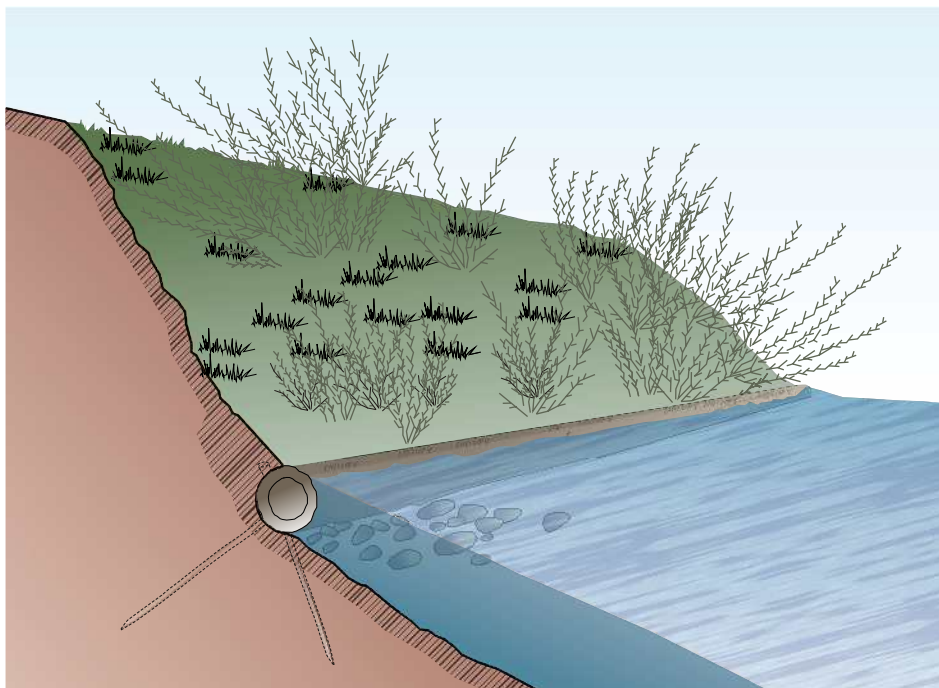
#### Rivestimento con biotessili in cocco o in juta

Si utilizzano per il rivestimento antierosivo spondale di zone lacustri e di dune soggette a fenomeni erosivi superficiali di origine eolica e meteorica. Vengono abbinati a semina e messa a dimora di talee e/o arbusti.

Questo tipo di intervento, di semplice attuazione e di efficacia immediata, consiste nel rivestimento della superficie da proteggere con un biotessile in fibre di cocco o di juta caratterizzato da maglie di dimensioni centimetriche, fissato al suolo mediante picchettatura. Le maglie della stuoia consentono alle piante di crescere liberamente, assicurando la protezione anche una volta che il biotessile è completamente degradato.

I materiali utilizzati per la realizzazione delle opere sono di facile reperimento e di rapido impiego. Le fibre di cocco vengono impiegate laddove sia richiesta una maggiore durabilità del rivestimento. Per la buona riuscita dell'intervento è importante che la sponda da rivestire venga preventivamente regolarizzata, asportando eventuali apparati radicali ed eliminando avvallamenti e piccoli dossi.

**Figura 5.2.1:** Stuoia di juta:  
Rivestimento di una sponda mediante stesura di biotessile biodegradabile in juta e fissaggio dello stesso mediante interro in testa e al piede, picchettatura con staffe o picchetti in ferro e acciaio piegati a U. La posa della stuoia deve avvenire su superfici precedentemente regolarizzate e liberate da radici. Ma oggi esistono stuoie composte con semi di specie adatte, che necessitano solo di irrigazione negli stadi iniziali della messa in opera. Tali rivestimenti devono sempre essere abbinati ad una

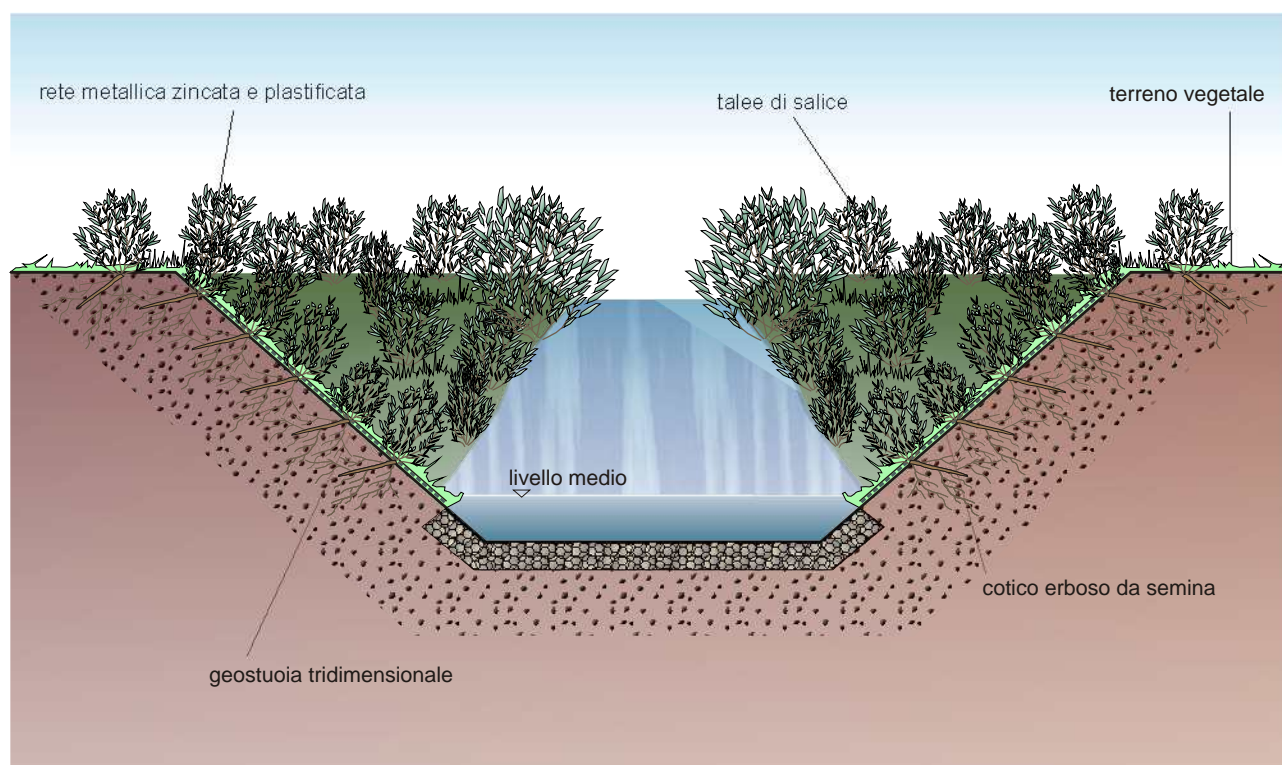


## Rivestimento vegetativo con geostuoia sintetica tridimensionale e rete metallica a doppia torsione

Tale tecnica viene utilizzata per la protezione di sponde in erosione soggette a frequenti sommersioni. Il rivestimento viene realizzato mediante la stesura di una stuoia sintetica tridimensionale, sormontata da una rete metallica a doppia torsione. Rete e geostuoia vengono fissate al terreno mediante picchetti metallici. Il rivestimento viene completato da idrosemina a spessore (miscela di sementi, acqua, collanti, concimi, ammendanti), e dalla messa a dimora di arbusti autoctoni e di talee di specie idonee ad una rapida propagazione vegetativa.

Tra i vari tipi di rivestimento spondale quelli in rete a doppia torsione costituiscono le strutture più robuste, ad immediata e duratura funzione antierosiva e di drenaggio. Le superfici da trattare devono essere preventivamente liberate da radici e pietre e rese uniformi affinché la geostuoia e la rete metallica possano aderire perfettamente al suolo. Il rivestimento viene in genere abbinato con una idrosemina a forte spessore realizzata in maniera da intasare completamente la rete tridimensionale.

**Figura 5.2.2:** Rivestimento in rete metallica a doppia torsione e geostuoia tridimensionale.



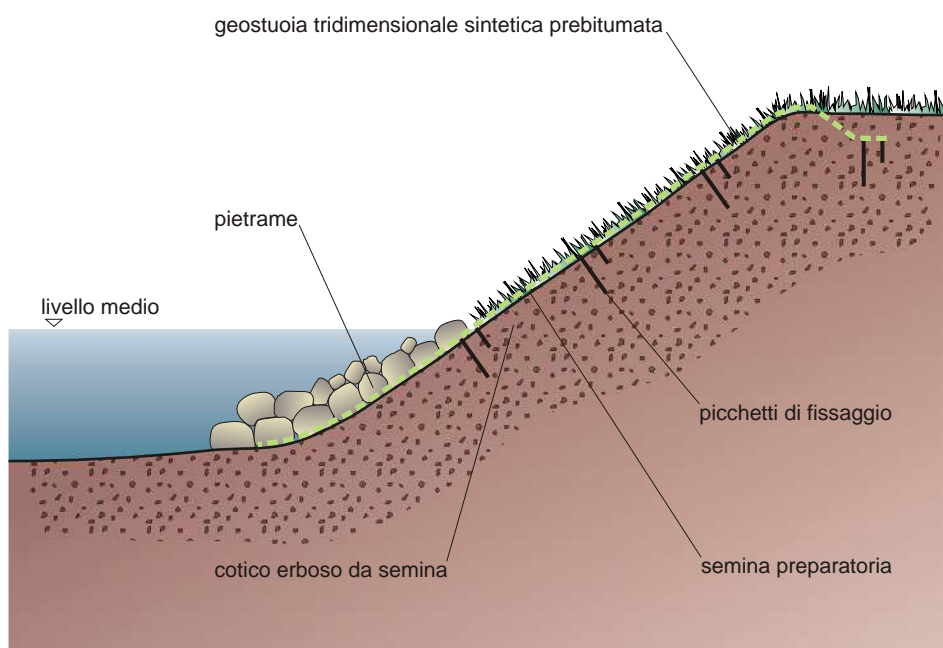


## Geostuoia sintetica tridimensionale prebitumata industrialmente a caldo

Il rivestimento spondale in stuoia tridimensionale è costituito da filamenti sintetici aggrovigliati in modo da trattenere le particelle di materiale terroso inerte. La stuoia viene prebitumata industrialmente a caldo e impiegata in prevalenza per il rivestimento di sponde a contatto con l'acqua.

L'opera si applica a superfici spondali in permanente contatto con l'acqua, quali sponde o argini di canali lagunari con problemi di erosione. Il materiale utilizzato ha effetto antierosivo immediato e permanente ma ha costi molto elevati ed è poco flessibile.

Anche per la stuoia tridimensionale occorre regolarizzare preventivamente le sponde attraverso l'allontanamento di apparati radicali e l'eliminazione di avvallamenti e piccoli dossi. E' necessario inoltre creare un solco di almeno mezzo metro di profondità a monte della sponda, all'interno del quale verrà posizionata un'estremità della stuoia che sarà poi fissata con delle staffe. Effettuata la semina mediante mezzo meccanico, si posiziona un'estremità della geostuoia all'interno del solco, fissandola con staffe e coprendo il solco con terreno. Successivamente, stesa la biostuoia e fissati i teli mediante picchetti, si ricoprono di terreno i bordi e si esegue una semina superficiale di rincalzo. Il piede della struttura viene in genere protetto tramite la posa di pietrame.



**Figura 5.2.3:** Geostuoia tridimensionale sintetica prebituminata industrialmente a caldo: si tratta di un intervento che si utilizza per il rivestimento di superfici spondali soggette a contatto permanente con l'acqua e per il rivestimento del fondo di canali.

### Generalità

**L**a maggior parte delle aree costiere umide si sviluppa in corrispondenza di settori dove i processi geomorfologici e sedimentari sono attivi e dove si registra la presenza di terreni incoerenti dalle caratteristiche geotecniche piuttosto scadenti. Nel caso di bacini lacustri la stabilità delle sponde deve essere spesso assicurata tramite opere di protezione e stabilizzazione, che possono essere realizzate mediante l'utilizzo di tecniche a basso impatto sull'ambiente naturale proprie dell'ingegneria naturalistica. Tra le tipologie più frequentemente adottate vi sono le difese con materiali vegetali morti o vivi. In particolare, gli interventi con specie vegetali vive costituite da piante di ambiente lagunare o paludoso, nel rispetto del sistema ecologico ospitante, risultano particolarmente efficaci. L'azione di trattenimento del suolo da parte degli apparati radicali, unitamente alla protezione superficiale conferita da fusto, rami e foglie delle specie vegetali, fanno sì che i rivestimenti di questo tipo abbiano un discreto successo nel controllo dei fenomeni erosivi. Alcune specie possono essere utilizzate anche nella zona intertidale per stabilizzare direttamente la linea di riva.

I materiali vivi possono essere messi a dimora con svariate tecniche tra cui:

- **Messa a dimora di piante in vaso o contenitore**
- **Messa a dimora di talee;**
- **Trapianto di rizomi e cespi;**
- **Fascinata spondale viva con culmi di canna;**
- **Fascinata sommersa;**
- **Copertura diffusa con culmi di canna.**

### Descrizione e caratteristiche

#### Messa a dimora di piante in vaso o contenitore

Si tratta della messa a dimora di arbusti autoctoni da vivaio, con certificazione di origine del seme, in ragione di 1 esemplare ogni 2-4 mq aventi altezza minima compresa tra 0,30 e 1,20 m, previa formazione di buca con mezzi manuali o meccanici. Una volta posata la pianta, si riempirà la buca con terreno, fino al colletto della pianta, compattandolo in modo che la pianta opponga resistenza all'estrazione. Successivamente, viene formata una piccola concavità intorno all'arbusto per una migliore captazione dell'acqua o un invito per l'allontanamento della stessa a seconda delle condizioni pedoclimatiche.

Su superfici di bassa pendenza tale tecnica può essere applicata anche da sola; su superfici più ripide può essere abbinata ad altri tipi di intervento per integrarne gli effetti stabilizzanti.

## Messa a dimora di talee

Consiste nell'infissione nel terreno o nelle fessure tra gli eventuali massi di rivestimenti spondali, di talee legnose di specie vegetali con buona capacità di propagazione vegetativa. E' classico l'impiego dei salici, ma anche di altre specie quali il ligustro e, nelle zone a clima temperato e caldo, anche l'oleandro e le tamerici, specie vegetali molto resistenti in condizioni di forte aridità ed elevata salinità del terreno.

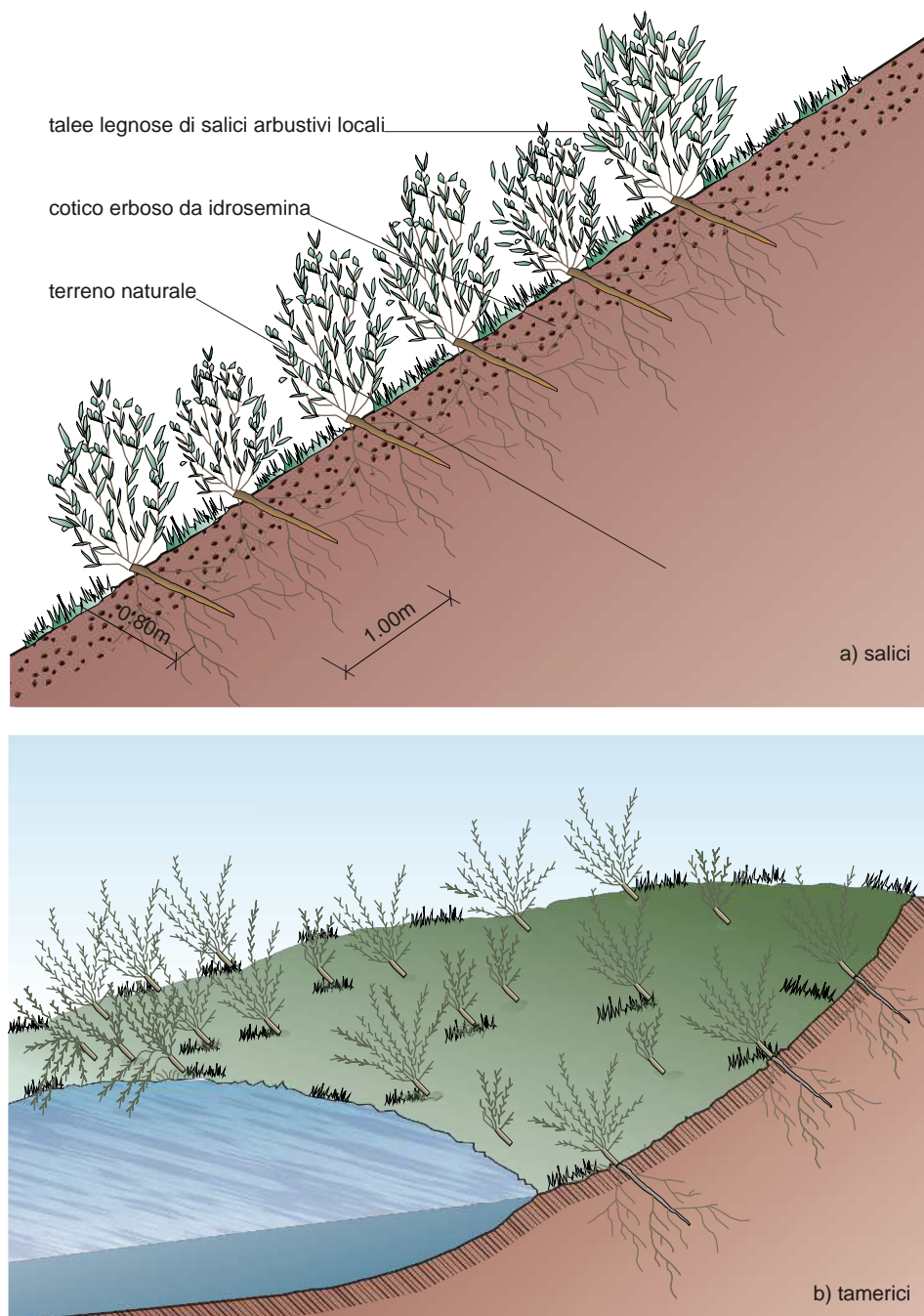
Le opere sono generalmente volte alla sistemazione di scarpate e di sponde fluviali e lacustri a bassa pendenza.

L'utilizzo di materiale vivo, ed in particolare, dove possibile, dei salici, oltre ad avere un basso costo, determina un effetto positivo di controllo del contenuto d'acqua del terreno, grazie all'azione di vero e proprio "pompaggio" che possono svolgere queste specie vegetali.

**Figura 5.3.1:** Messa a dimora di talee:

- a) salici,
- b) tamerici.

Messa a dimora di talee legnose di specie arbustive, con più anni di età. La messa a dimora viene fatta previo taglio a punta e con disposizione perpendicolare o leggermente inclinata rispetto al piano di scarpata.



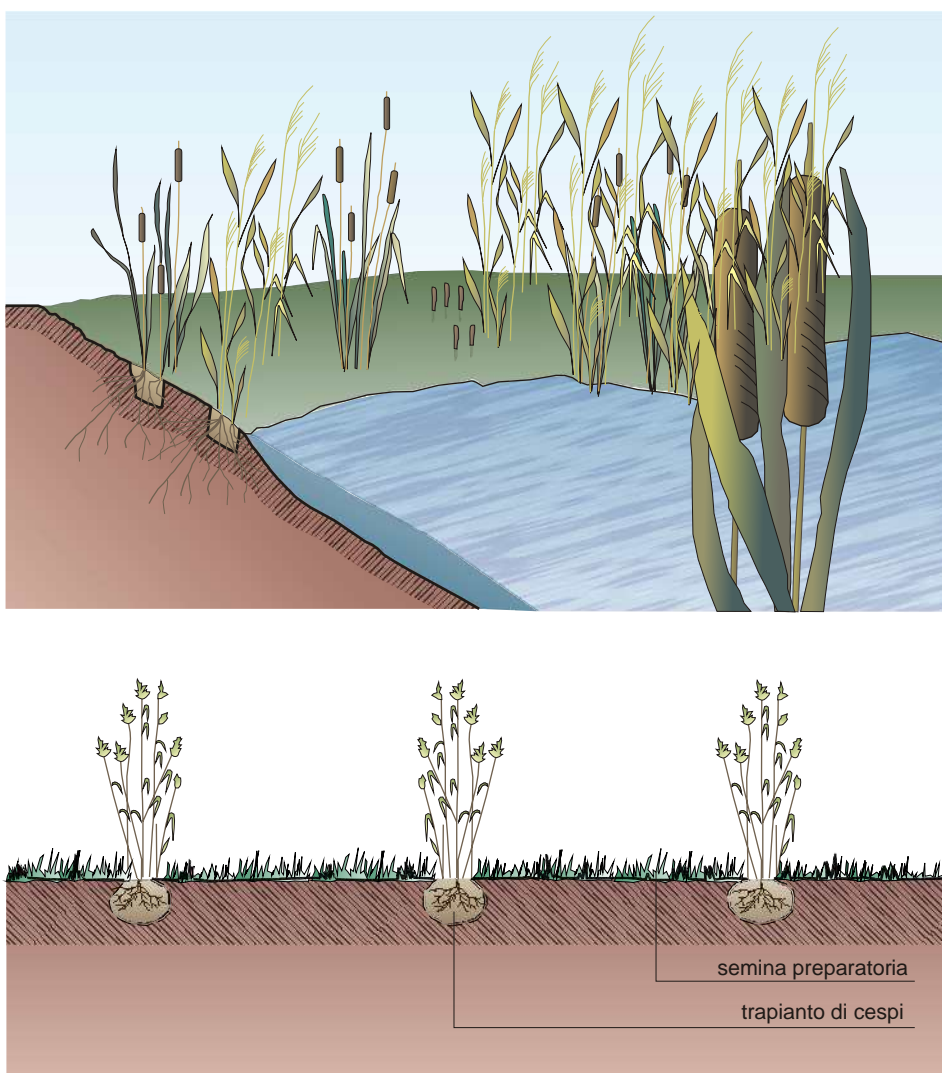


## Trapianto di rizomi e cespi

Questa tecnica viene utilizzata per la costituzione di manti vegetali con specie di difficile reperimento in commercio o di scarsa propagazione per seme, come *Phragmites Australis* o *Typha*, impiegate in zone palustri. In natura vengono prelevati rizomi e cespi in pezzi di alcuni centimetri, che successivamente vengono messi a dimora sul terreno e poi ricoperti con un leggero strato di terreno, per l'attecchimento.

L'intervento si adatta al caso di paludi costiere salmastre, ambienti idrofili e substrati scarsamente drenanti. L'obiettivo primario è quello di avere una rapida copertura del terreno, più efficace rispetto a quella ottenibile con la semplice semina.

L'impiego di rizomi, di pani di terra di canneto di dimensioni centimetriche o decimetriche, di cespi di graminacee, che sviluppano tutti più cauli contemporaneamente, favorisce una rapida crescita del manto vegetale.



**Figura 5.3.2:** Trapianto di rizomi e cespi. In natura vengono prelevati rizomi, stoloni e cespi di graminacee e altre specie idonee, in parti di circa 10-15 cm, che sono successivamente inseriti nel terreno per circa 4 cm, sminuzzati o interi e ricoperti con un leggero strato di terreno vegetale per evitare il disseccamento.

Il trapianto va eseguito all'inizio o al termine del periodo di riposo vegetativo, in ragione di 3-5 pezzi per mq. Tale tecnica va utilizzata per l'impianto di specie non esistenti in commercio e di difficile riproduzione per seme. La moltiplicazione può essere effettuata anche tramite vivaio e successivo trapianto, utilizzando contenitori a bivalve in cui vengono inseriti frammenti di cespi di graminacee selvatiche che vengono ritrapiantate dopo un ciclo di sviluppo nelle aree da colonizzare.

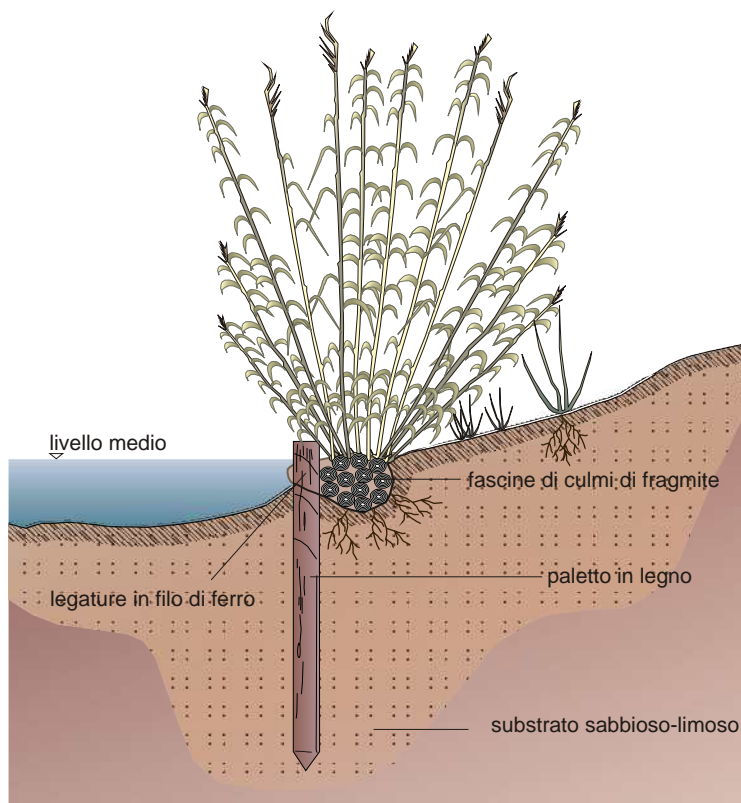
## Fascinata spondale viva con culmi di canna

E' costituita da fascinate di culmi di canna, disposti a file parallele e posate in solchi scavati nei terreni di sponda a bassa pendenza. L'intervento si applica in prossimità di sponde situate in zone lagunari, stagni costieri o corsi d'acqua, con bassissime velocità di corrente e trasporto solido di materiali con diametro inferiore a 1 cm. Lo scopo principale è il consolidamento del piede di sponda, unitamente alla costituzione della fascia di canneto spondale.

L'intervento è poco costoso e di rapido effetto, grazie alla formazione di un fitto reticolo di radici e di rizomi, che conferiscono una buona protezione superficiale del tratto spondale a contatto con l'acqua. Durante le fasi iniziali della realizzazione, i culmi di canna, legati e tenuti assieme dal filo di ferro, vengono disposti a formare delle fascine con un diametro di circa 10 cm. Successivamente le fascine vengono inserite per una profondità di uno o due terzi del proprio diametro all'interno di solchi ricavati lungo la linea di sponda, a partire dal livello medio dell'acqua e facendo in modo che le estremità delle fascine si compenetrino le une con le altre. Infine, le fascine vengono picchettate per essere fissate nel terreno.

**Figura 5.3.3:** Fascinata spondale viva con culmi di canna. Stabilizzazione di sponda artificiale a bassa pendenza su substrato limoso-sabbioso, in aree lagunari o soggette a moto ondoso di lieve entità. Le fascine di culmi di canna, di 80 - 120 cm di lunghezza, sono legate con filo di ferro e fissate al substrato con picchetti di legno o di ferro di 0,6 - 1 m, infossate nel limo per 1/3 - 2/3 del diametro, lungo la linea di battigia.

La messa in opera potrà avvenire preferibilmente quando i culmi avranno raggiunto la citata dimensione (generalmente tra marzo e fine maggio).

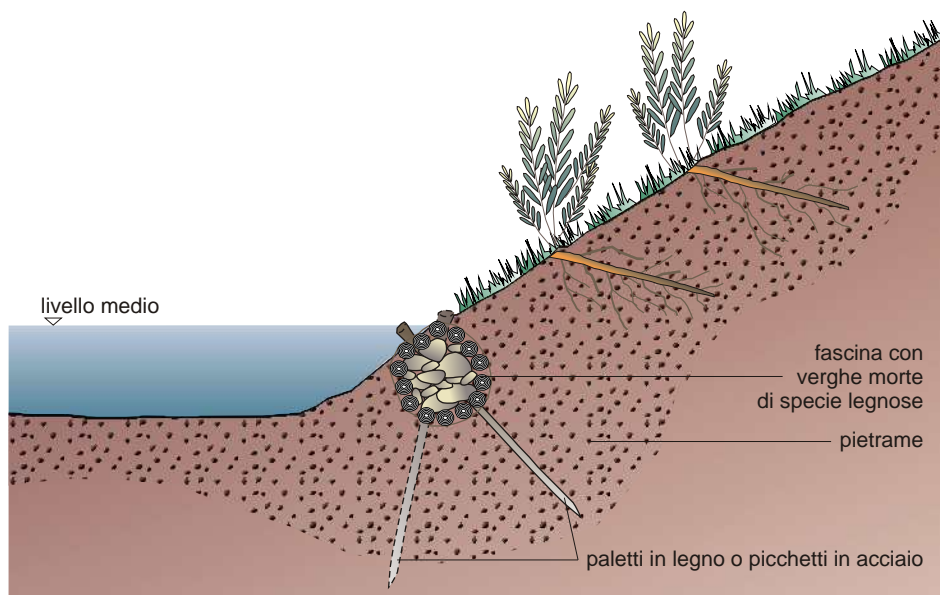


## Fascinata Sommersa

Si tratta di un intervento con materiale vegetale morto realizzato sotto la superficie dell'acqua, e consiste in un sistema di fascinate in legname morto di specie arbustive, caricato al centro con ghiaia o pietrisco.

Esso viene impiegato in corsi d'acqua o piccoli bacini lacustri con portate o livello medio relativamente costanti, con funzione di protezione della sponda nel tratto sommerso dalle acque. Viene solitamente abbinato a tecniche che prevedono l'utilizzo di materiale vivo, come strati di ramaglia e fascinate spondali vive nella parte al di sopra del livello medio dell'acqua. L'impiego di tale tecnica consente un'immediata protezione del piede della sponda.

Nella realizzazione dell'opera, come prima cosa, si assemblano le verghe legnose in modo tale che apici e basi risultino equamente distribuiti, a formare fascine di 30-60 cm di diametro e 3-4 m di lunghezza; al centro viene posto il pietrame e le fascine vengono legate con il filo di ferro ogni 30 cm circa. Dopo la posa delle fascine, con le estremità compenetranti, in un solco appositamente scavato al di sotto del livello medio dell'acqua, si fissano le fascine con paletti in legno o picchetti passanti attraverso la fascina stessa e posti ad una distanza di circa 1 m da questa, alternativamente a monte e a valle.



**Figura 5.3.4:** Fascinata sommersa. Protezione del piede della sponda mediante una fascinata costituita da legname morto di specie arbustive, caricate al centro con ghiaia o pietrisco. Viene realizzata sul posto e legata con filo di ferro, nastro metallico o tessuto sintetico, fissata con pali di legno o tondini metallici di lunghezza variabile a seconda del substrato. La tecnica, adatta per protezione di sponda nel tratto normalmente sommerso dal livello medio delle acque, va di solito abbinata con strati di ramaglia e fascine spondali vive nella parte a contatto e fuori dall'acqua.



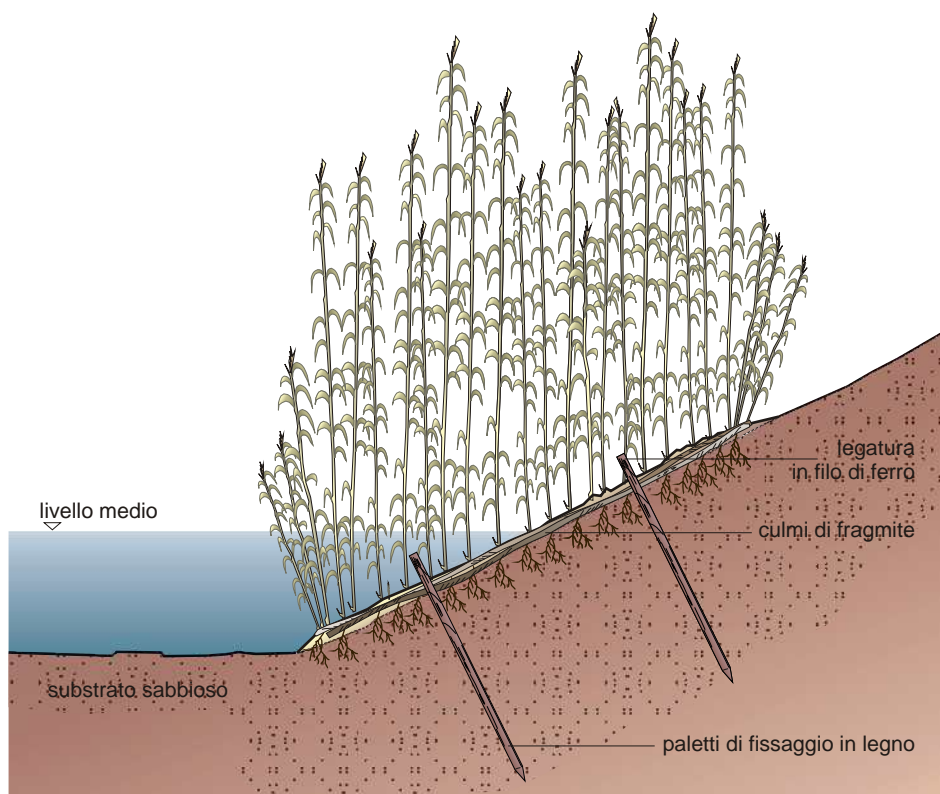
## Copertura diffusa con culmi di canna

Si tratta di un rivestimento di sponda mediante culmi vivi di canne palustri, che si utilizza per sponde lacustri o corsi d'acqua con bassissime velocità di corrente e trasporto solido. Una volta realizzata, l'opera consente di ottenere una rapida copertura e rinaturalizzazione della superficie della sponda.

I materiali impiegati per questo intervento sono costituiti da culmi di canne palustri, picchetti di legno di diametro 6-8 cm, lunghezza 80 cm, e filo di ferro del diametro di 2-3 mm, terreno per la copertura.

Per la realizzazione dell'opera, dopo aver effettuato il rimodellamento e la regolarizzazione della superficie di sponda, si infiggono i picchetti per una profondità di almeno 30 cm, con interasse variabile di 0,5-1 m, sia tra i picchetti che tra le file; successivamente vengono stesi i culmi in modo continuo e con la parte basale inserita in un solco posizionato sotto il livello medio dell'acqua, fino a rivestire completamente la superficie della sponda. Lo strato di culmi viene infine ancorato al terreno sottostante con filo di ferro fissato ai paletti e ricoperto con uno strato di terreno dello spessore di circa 1 cm.

Il vantaggio dell'opera è rappresentato da una efficacia immediata e dallo sviluppo di una elevata capacità di protezione nel giro di pochi mesi.



**Figura 5.3.5:** Copertura diffusa con culmi di canna. Si tratta di un rivestimento di sponda, precedentemente modellata, in condizioni di bassa pendenza e modesta velocità dell'acqua, con culmi di canna in numero da 30 a 60 per metro, di lunghezza da 80 a 170 cm, con la parte inferiore a contatto diretto con l'acqua (10-15 cm al di sotto del livello medio). Il fissaggio avviene mediante paletti e filo di ferro. La messa in opera potrà avvenire preferibilmente quando i giovani culmi avranno raggiunto le dimensioni necessarie (solitamente da marzo a fine maggio).

### Generalità

La protezione delle sponde lagunari soggette a fenomeni erosivi può essere efficacemente ottenuta anche attraverso la realizzazione di opere antierosive e stabilizzanti miste, costituite da materiali vivi combinati con materiali vegetali morti.

Le tipologie d'opera più comuni sono costituite da:

- **Palificata Spondale con Palo Verticale Frontale**
- **Rullo Spondale con Zolle di Canne**
- **Rullo Spondale in Fibra di Cocco**
- **Gabbionata in rete metallica zincata rinverdita**

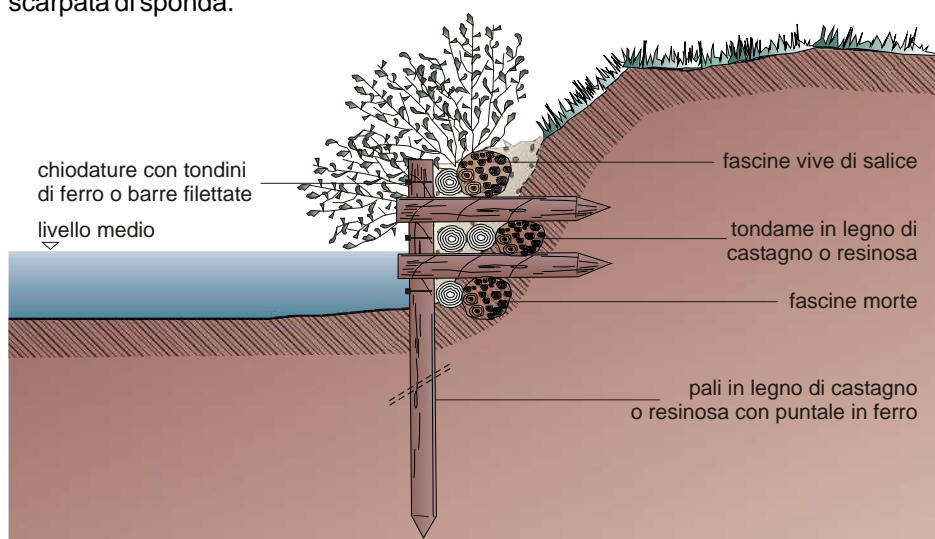
### Descrizione e caratteristiche

#### Palificata Spondale con Palo Verticale Frontale

Si tratta di una struttura in legname tondo, costituita da un'incastellatura di tronchi a formare camere nelle quali vengono inserite delle fascine vive. L'applicazione più comune è volta al consolidamento di sponde soggette ad erosione su substrato incoerente. Si utilizzano tronchi di castagno o di conifere, fissati l'uno all'altro con chiodi e barre filettate. Le fascine permettono lo sviluppo di una vegetazione arbustiva ripariale, che ha la doppia funzione di ripristino ambientale e di consolidamento del terreno per mezzo delle radici. Questa tipologia d'intervento consente la formazione di una struttura alternativa alle opere di sostegno tradizionali realizzando un'opera in grado di svolgere immediatamente un'azione consolidante, che si accresce nel tempo grazie allo sviluppo della vegetazione, che a lungo termine si sostituisce al legname soggetto a deterioramento.

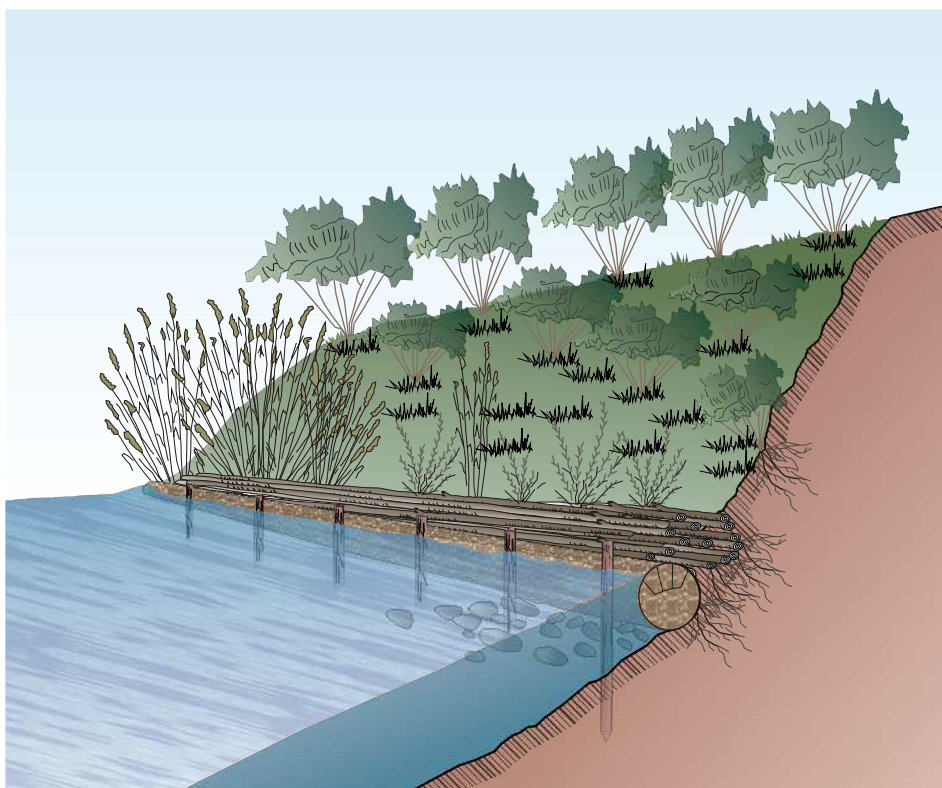
L'opera viene realizzata tramite l'infissione verticale dei pali, per almeno due terzi della loro lunghezza, in prossimità della sponda in erosione, seguendone lo sviluppo planimetrico originario. Parallelamente alla linea di sponda si fissa la prima serie di pali orizzontali, poi perpendicolarmente ad essa si posa e vi si inchioda sopra la prima serie di pali trasversi. Nella fase successiva si inseriscono fascine morte nelle camere al fronte della struttura, al di sotto del livello medio dell'acqua, che vengono poi riempite con inerte terroso. Dopo aver ripetuto la disposizione di pali orizzontali e trasversali e di materiale terroso con fascine vive per strati successivi, fino al raggiungimento dell'altezza di progetto, si riporta il materiale inerte fino alla completa copertura dell'opera e alla riprofilatura della scarpata di sponda.

**Figura 5.4.1:** Palificata spondale con palo verticale frontale: Questa tecnica di intervento prevede il consolidamento di sponde subverticali mediante tondami di castagno o di resinosa infissi verticalmente per almeno 2/3 e addossati alla sponda stessa, dietro i quali vengono collocati tronchi orizzontali paralleli alla sponda, alternati ad altri tronchi di almeno 1 metro di lunghezza inseriti nella sponda in senso trasversale. Gli interstizi tra i tondami longitudinali vengono riempiti con massi o con gabbioni cilindrici sino al livello di magra dell'acqua. Negli interstizi sovrastanti, vengono inserite fascine di tamerici (in acque salmastre) ricoperte di terreno per assicurarne la radicazione dei rami. Dalle fascine si sviluppa una vegetazione arbustiva ripariale con funzione di rinaturalizzazione e, nel tempo, anche statica.



## Rullo Spondale con Zolle di Canne

L'intervento con rullo spondale e zolle di canne viene effettuato su corsi d'acqua a bassa pendenza e in aree lagunari con ridotte escursioni del livello del battente, dove il trasporto solido sia prevalentemente costituito da limi in sospensione. Esso consente una protezione immediata della sponda, dove le canne del rullo garantiscono il consolidamento e la rapida rivegetazione del settore interessato, ed hanno anche una funzione depurativa delle acque. Può anche essere abbinato ad opere di consolidamento come palificate e fascinate. Per alloggiare il rullo occorre scavare un solco di 40 x 40 cm, quindi si posizionano i pali di legno verso la parte esterna, ad una distanza di un metro l'uno dall'altro. Successivamente si stende un telo di rete metallica preaccoppiata con geostuoia tridimensionale o un geotessile filtrante e si effettua il riempimento con materiale sabbioso limoso e con pani di canne. Il telo viene quindi chiuso superiormente con punti di ferro e raccordato con la sponda mediante l'impiego di fascine o ramaglie vive di tamerici. Ad operazione conclusa il rullo deve sporgere per 5-20 cm sul livello medio dell'acqua.



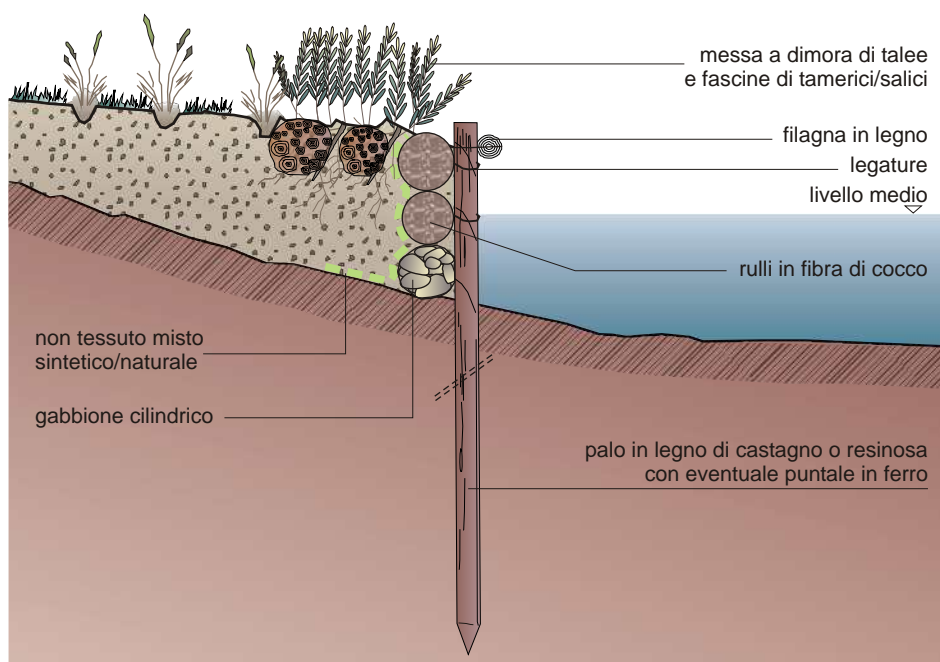
**Figura 5.4.2:** Rullo spondale con zolle di canna, in rete metallica o in georete sintetica. Viene utilizzato per il consolidamento al piede di sponde in erosione di canali, laghi e zone lagunari con limitate oscillazioni del livello dell'acqua, con trasporto solido ridotto a limi in sospensione. L'intervento consiste nella realizzazione di un rullo cilindrico in rete zincata plastificata o in georete sintetica, disposta a telo aperto di larghezza minima 120-160 cm, in un solco predisposto di minimo 40 x 40 cm, sostenuto da pali di legno verso l'esterno e sul fondo, opportunamente dimensionati. La rete viene rivestita internamente con una stuoia, in geotessuto filtrante sintetico o in fibra vegetale e viene poi riempita di toutvenant sabbioso ghiaioso per i 2/3 inferiori. Nel terzo superiore del rullo vengono collocati pani di canne ed altre specie igrofile; il tutto viene poi rinchiuso con filo di ferro. A lavoro ultimato il rullo dovrà sporgere per 5-10 cm sul livello medio dell'acqua. Il raccordo con la sponda viene realizzato con ramaglie o fascine di salici e tamerici. La lavorazione potrà avvenire durante il periodo di riposo vegetativo, possibilmente in primavera, prima della germogliazione.



## Rullo Spondale in Fibra di Cocco

Questo intervento è in parte analogo al precedente e si adatta anch'esso ad aree lagunari e canali in erosione, poiché offre una protezione antierosiva immediata ed un'azione filtrante (drenaggio) efficace per la ricostruzione delle sponde in materiale sciolto. La sua durata nel tempo è limitata in presenza di acque salmastre. In questo caso la resa può essere migliorata con l'utilizzo di reti sintetiche.

Nella tecnica costruttiva, dapprima vengono fissati i pali in file irregolari a distanza di circa mezzo metro e per una profondità di circa due terzi della lunghezza. La fondazione viene preparata mediante la posa in opera di un gabbione cilindrico in rete metallica riempito di ciottoli. Al di sopra della fondazione si posano i rulli preconfezionati in fibra di cocco, con modalità analoghe a quelle già viste nel paragrafo precedente, e successivamente si stende del feltro organico a tergo della struttura. Lo spazio retrostante la difesa spondale realizzata viene poi riempito di materiale di dragaggio, coperto superiormente con pani di canna e infine seminato. A operazione conclusa, il rullo deve sporgere di 5-10 cm sul livello medio dell'acqua. Se il riempimento a tergo viene effettuato con materiale di dragaggio, bisogna aspettare lo sgrondo completo prima di procedere ai movimenti di terra, messa a dimora delle piante e semina finale.



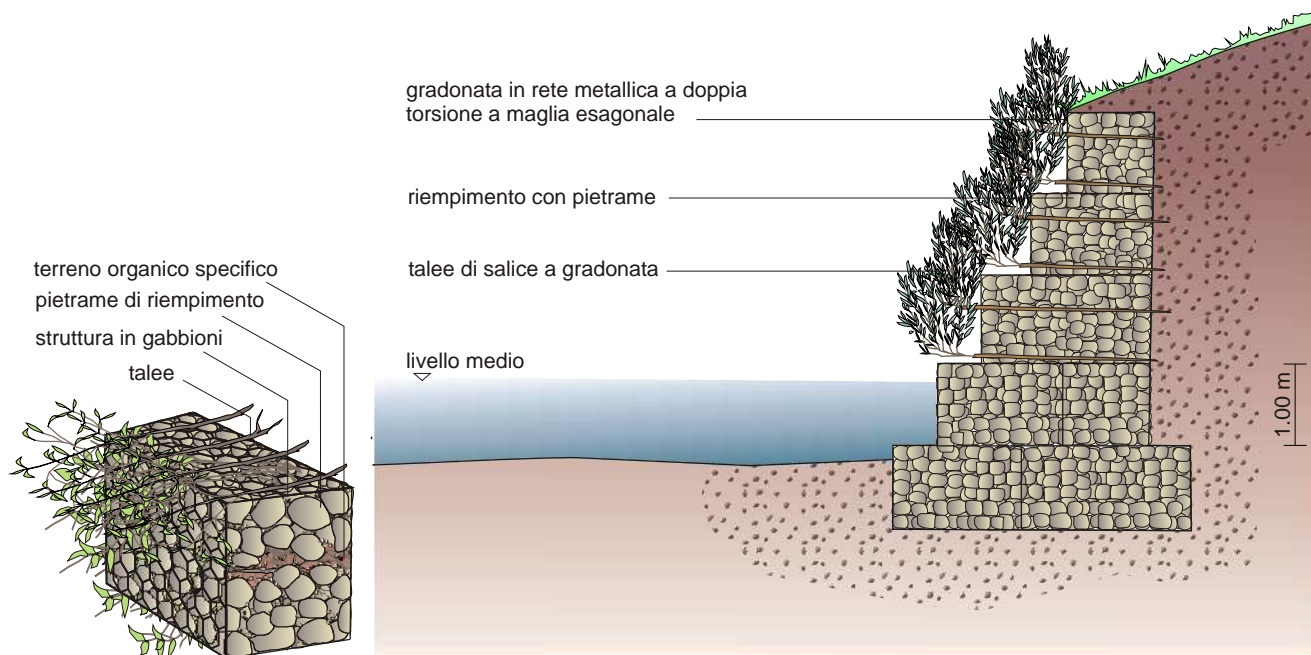
**Figura 5.4.3:** Rullo spondale in fibra di cocco: è costituito da una rete in fibra sintetica o biodegradabile in cocco di maglia massima 60 x 80 mm, riempita con fibra di cocco naturale. I rulli sono costituiti da moduli lunghi da 3 a 6 metri, fissati al substrato mediante pali di legno disposti su una fila esterna al rullo. A tergo dei rulli viene effettuata la messa in opera di fascine o ramaglie vive di salici o tamerici da sistemare a raccordo lato sponda. A operazione conclusa il rullo dovrà sporgere dall'acqua di 5 - 10 cm. Con il passare del tempo la funzione meccanica e drenante del rullo stesso viene sostituita dall'azione esercitata da parte delle specie piantate. La lavorazione potrà avvenire durante il periodo di riposo vegetativo.

## Descrizione e caratteristiche

### Gabbionata in rete metallica zincata rinverdita

Si tratta di opere di sostegno e/o rivestimento costituite da scatolari in rete metallica zincata plasticata a doppia torsione e maglia esagonale, riempiti in loco con pietrame di pezzatura minima di 15 cm. Nelle prime maglie del gabbione più alto vengono inserite talee di salice o tamericio, in modo irregolare o a file.

La gabbionata in rete metallica si usa come difesa spondale ed è una struttura flessibile e permeabile che permette la filtrazione dell'acqua da e verso le sponde. L'uso di pietrame locale per il riempimento ne garantisce anche un ottimo inserimento ambientale. Nell'arco di 1-2 anni le radici dei salici migliorano la stabilità della struttura stessa, che viene mascherata dallo sviluppo della vegetazione.



**Figura 5.4.4:** Gabbionata in rete metallica zincata rinverdita, a doppia torsione con maglie esagonali tessuta con trafilato d'acciaio. Gli scatolari metallici vengono assemblati e collegati tra loro utilizzando, sia per le cuciture che per i tiranti, un filo con le stesse caratteristiche di quello usato per la fabbricazione della rete. L'abbinamento con le piante prevede l'inserimento di talee di specie arbustive dotate di buona capacità di propagazione vegetativa, all'interno del gabbione in fase di costruzione. Le talee devono attraversare completamente il gabbione ed essere inserite nel terreno retrostante per una profondità che dia garanzia di attecchimento. Tale operazione viene in genere effettuata durante il periodo di riposo vegetativo.

## Generalità

Le oscillazioni di marea (o, più semplicemente, maree) sono rappresentate da variazioni periodiche del livello del mare, innescate dalle forze di attrazione esercitate da luna e sole sulle masse oceaniche, in relazione anche all'inerzia delle acque nel rispondere a tale sollecitazione e al condizionamento offerto dalla morfologia dei settori interessati. Nel Mediterraneo esse provocano, ogni 12 ore circa (quindi con due massimi e due minimi quotidiani), innalzamenti e abbassamenti della superficie marina con estremi compresi tra 15 e 100 centimetri. Le coste interessate da escursioni di marea significative sono localmente soggette a fenomeni di sommersione, i cui effetti si possono aggravare in presenza di concomitanti fattori locali, quali la subsidenza e l'eustatismo, o per la sovrapposizione con gli effetti di altri parametri meteorologici (vento e pressione atmosferica che generano lo storm surge) e altre oscillazioni di medio periodo del livello del mare.

Per quanto riguarda il territorio italiano, le escursioni di marea sono piuttosto limitate ma nella zona della laguna veneta, il contributo all'oscillazione del livello del mare, dovuto ai fattori meteorologici (specialmente il vento forte di scirocco), determina spesso condizioni di inagibilità di manufatti e abitazioni ("acqua alta").

La progettazione di opere marittime per la protezione dall'innalzamento del livello marino necessita di approfonditi studi che definiscano dettagliatamente tutte le caratteristiche della dinamica locale. Gli interventi sono finalizzati alla costruzione di dispositivi, fissi o mobili, per annullare, o quantomeno ridurre, gli effetti dei periodici fenomeni di innalzamento delle acque.

Le principali tipologie di intervento sono costituite da:

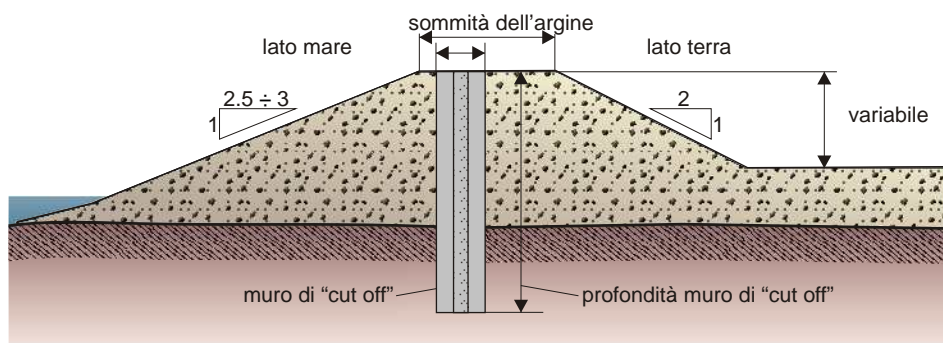
- Argini a mare
- Sistemi meccanici di paratoie mobili

## Argini a mare

## Descrizione e caratteristiche

Un argine a mare è una struttura di grande massa e dimensioni, costruita per il contenimento delle inondazioni marine. Gli argini sono terrapieni che vengono costruiti per innalzamenti successivi. Il materiale principale utilizzato per la costruzione degli argini è l'argilla che con la sua caratteristica di impermeabilità costituisce il nucleo del manufatto. Frequentemente, all'interno degli argini viene realizzato un muro di "cut-off", avente funzione di impermeabilizzazione e consolidamento della struttura. Il fronte esposto a mare va protetto contro le azioni del moto ondoso mentre sul lato terra per impedire il dilavamento possono essere impiegate le geogriglie.

**Figura 6.0.1:** Sezione di argine in terra con protezione "cut-off". Il muro di cut-off svolge un'azione di consolidamento della struttura interna e impedisce il fenomeno del sifonamento bloccando eventuali infiltrazioni di acqua tra i due lati dell'argine.





## Descrizione e caratteristiche

### Barriere radiali

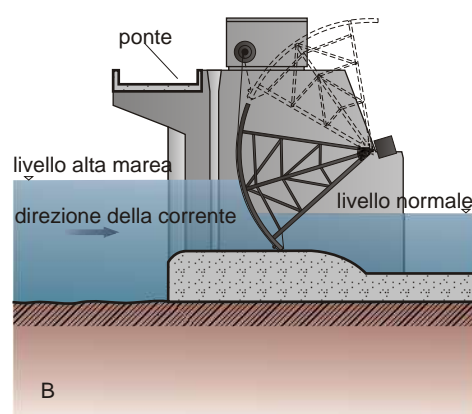
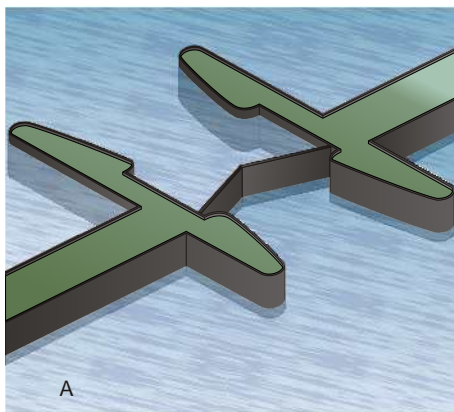
Sono costituite da sistemi di paratoie mobili la cui chiusura, in caso di alta marea, viene azionata mediante apparati elettromeccanici, per rotazione su un piano orizzontale, nel caso delle barriere radiali orizzontali, oppure su un piano verticale, nel caso delle barriere radiali verticali.

Le barriere radiali orizzontali sono attivate dalla chiusura, con moto rotatorio orizzontale, di due paratoie (o più sistemi di paratoie) che, in condizioni normali, sono alloggiate sulla banchina dentro un manufatto protetto.

Le barriere radiali verticali sono invece costituite da paratoie curve, in acciaio, montate su sistemi di perni ancorati a supporti fissi. Il flusso di acqua viene regolato abbassando o sollevando le paratoie.

**Figura 6.0.2:** Esempi di barriere radiali antimarea:

- A) Barriera a paratoie con chiusura orizzontale.
- B) Barriera a paratoie con chiusura verticale.



## Descrizione e caratteristiche

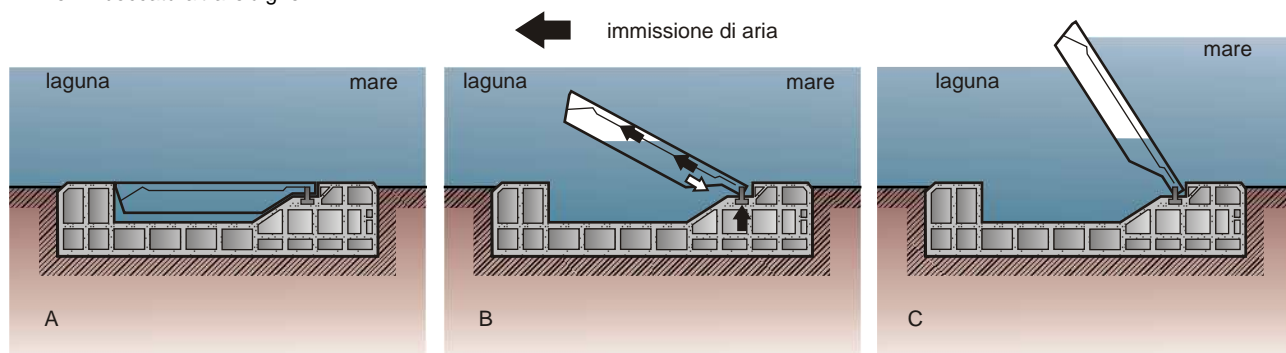
### Paratoie mobili: Sistema MOSE

Si tratta di un sistema integrato di opere di difesa, per la protezione di Venezia e delle aree lagunari maggiormente vulnerabili dai fenomeni di "acqua alta".

MOSE, MODulo Strumentale Elettromeccanico, è l'acronimo del prototipo che ha consentito di verificare il funzionamento del sistema e il comportamento di componenti e materiali in condizioni reali. La soluzione adottata prevede la chiusura temporanea delle bocche di porto lagunari attraverso una serie di paratoie mobili. Ciascuna paratoia è costituita da una struttura scatolare metallica vincolata attraverso cerniere al proprio alloggiamento. In condizioni normali di marea le paratoie sono piene d'acqua e restano adagiate nelle strutture di alloggiamento realizzate sul fondale. Quando sono previsti livelli del mare superiori alla quota prefissata esse vengono svuotate mediante immissione di aria compressa e sollevate con una rotazione attorno all'asse delle cerniere, fino ad emergere. In questo modo le paratoie isolano temporaneamente la laguna dal mare, fino a mantenere un dislivello massimo di 200 cm tra mare e laguna. Le bocche restano chiuse per la sola durata dell'acqua alta e per i tempi di manovra delle paratoie (in media 4 ore e mezza).

**Figura 6.0.3:** Fasi di esercizio del sistema MOSE:

- A) Vani idraulici in posizione bloccata lasciano il passaggio aperto.
- B) Posizione intermedia, in cui l'acqua presente all'interno delle paratoie, viene espulsa mediante l'immissione di aria compressa.
- C) Le paratoie sollevate impediscono l'entrata di acqua nell'imboccatura tra le dighe.



## Generalità

**S**toricamente il porto nasce come struttura adibita a fornire un ormeggio sicuro e un riparo protetto alle imbarcazioni nei confronti dei fattori meteomarinari.

I più importanti e famosi porti dell'antichità sono stati porti naturali, da quelli greci a quelli fenici, a quelli egiziani. Già in epoca romana, tuttavia, l'esigenza di attivare scali commerciali in aree non del tutto idonee, quali ad esempio la foce dei grandi fiumi, ha evidenziato la necessità di effettuare lavori di manutenzione ed ampliamento, che hanno portato di fatto ad una "artificializzazione" delle strutture. In questi casi solo la realizzazione di modifiche alla naturalità dei luoghi consentiva di incidere sui fenomeni locali e di conservare l'agibilità del porto nel tempo. Fu così che, in alternativa agli approdi naturali, quale era ad esempio il porto di Pozzuoli, si iniziarono a progettare anche opere innovative e di concezione più complessa come il porto-canale o i bacini portuali interni (ad esempio il porto di Traiano alla foce del Tevere), dove morfologia naturale e strutture artificiali si sovrapponevano e si integravano per migliorare fruibilità e sicurezza delle strutture.

E' stato solo in età moderna che, per le accresciute esigenze di utilizzo turistico, commerciale e militare, le modifiche apportate dall'uomo all'ambiente naturale si sono fatte sempre più marcate e ci si è spinti sino a progettare e realizzare porti interamente artificiali in aree costiere altrimenti non idonee allo scopo.

Benché una netta differenziazione tra le varie tipologie non sia, per quanto detto, possibile e non esistano di fatto strutture non modificate dall'azione dell'uomo, per fornire uno schema di classificazione di massima, i porti possono essere, ancora oggi, suddivisi in:

- **Porti naturali**
- **Porti artificiali**

Con tale terminologia si intende far riferimento alle caratteristiche originarie del sito, indipendentemente dalle modifiche che successivamente ne possono aver determinato la perdita di naturalità.

**Figura 7.0.1:** Ventotene (LT). Porto romano scavato nel tufo, sullo sfondo il nuovo porto turistico.



Le attuali strutture portuali sono di norma caratterizzate da un settore esterno di imbocco (o da un canale di accesso), dotato di eventuali opere di protezione, da un avamporto e da un porto interno.

La funzionalità dell'imbocco è vincolata da numerose condizioni, quali il clima meteomarinico del paraggio, le caratteristiche dei fondali e del trasporto litoraneo dei sedimenti, il tipo di traffico marittimo. Esso deve essere ubicato a una certa distanza dalla linea dei frangenti, per assicurare una navigazione il più possibile regolare. La collocazione dell'imboccatura deve tener conto del settore di traversia, cioè del settore da cui possono provenire le onde, primarie e secondarie, che si propagano verso il porto.

Dall'imboccatura si procede, lungo il canale di accesso, verso l'avamporto e, quindi, verso lo specchio d'acqua protetto (porto interno). Il canale d'accesso può essere anch'esso naturale o artificiale e deve essere progettato per poter assicurare la navigazione alle imbarcazioni di maggiori dimensioni previste. La sua ampiezza e la sua profondità sono condizionate non solo dalla grandezza e dalla manovrabilità delle navi, ma anche dalla loro velocità, dal pescaggio, dalla direzione ed intensità di onde, correnti e venti. L'avamporto è la zona preposta alle operazioni di arresto e manovra, che le imbarcazioni di una certa lunghezza svolgono prima di accedere al porto interno. Esso ha anche la funzione di bacino per lo smorzamento del moto ondoso e la riduzione degli interrimenti nell'area portuale. La grandezza, la configurazione e la disposizione del canale di accesso e dell'avamporto vengono definite con l'ausilio di modelli matematici idrodinamici e simulatori di manovra. Il porto interno infine è il luogo dove i natanti vengono ormeggiati e si effettuano le operazioni di carico/scarico di merci e persone. È anche il luogo dove le imbarcazioni possono essere costruite o ristrutturare all'interno di cantieri navali e bacini di carenaggio.



**Figura 7.0.2:** Porto-canale con diga foranea di protezione dell'imbocco, situato alla foce del fiume Pescara. La struttura di protezione, costruita a metà degli anni '90, impedisce la libera dispersione verso il largo delle acque dolci ed inquinate del fiume, che vengono così deviate verso il litorale a nord del porto, dove determinano problemi per la balneabilità delle spiagge. Sono in corso di studio alcune soluzioni alternative mirate alla mitigazione del problema dell'inquinamento. Nella stessa immagine è possibile osservare l'effetto di accumulo dei sedimenti determinato dal molo di destra del porto turistico (al centro), e dal molo di sinistra del porto-canale, dove viene segnalato il costante avanzamento della linea di riva accompagnato da una generale diminuzione della profondità del fondale. Foto, P. Orlandi.



In generale, è possibile affermare che le modifiche introdotte nell'ambiente costiero dalla presenza di un porto sono tanto più marcate quanto più è evidente la componente artificiale della struttura portuale stessa. Tali modifiche si riflettono essenzialmente su tre ordini di fattori: perdita di naturalità dei luoghi; variazione delle caratteristiche morfologiche del sito e del trasporto solido litoraneo; inquinamento delle acque.

Per quanto riguarda il deterioramento delle caratteristiche naturali, si deve rimarcare come, per una struttura portuale di moderna concezione, non esista la soluzione "ideale", ed una modifica dell'equilibrio preesistente risulti in qualche modo inevitabile. L'adozione di idonee scelte progettuali può comunque mitigare significativamente l'impatto ambientale e paesaggistico delle opere.

La costruzione delle strutture di servizio del porto, specialmente se effettuata per una grande estensione, induce un rilevante cambiamento nella struttura della costa, nella batimetria e nella morfologia del fondale, nelle modalità e nell'entità del trasposto solido litoraneo. Ciò può avere negative ripercussioni sia sulla struttura portuale stessa, che potrà essere interessata da fenomeni di interrimento nel tempo, sia sulle aree circostanti, che potranno essere soggette a fenomeni erosivi in zona sottoflutto, o da fenomeni di deposizione e innalzamento del fondale in quella sopraflutto. Anche i fenomeni di inquinamento sono inevitabili.

Nel caso di un porto alla foce di un grande fiume, ad esempio, il libero deflusso delle acque dolci, spesso inquinate, può essere impedito o reso difficoltoso in presenza di opere, quali dighe foranee.



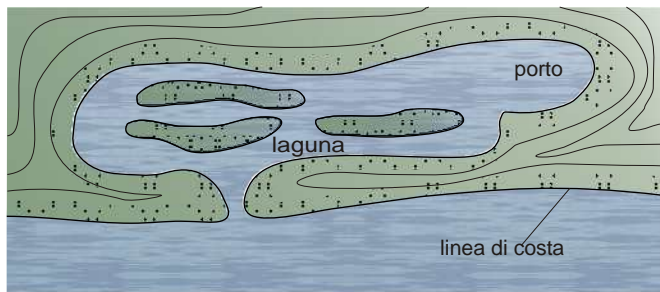
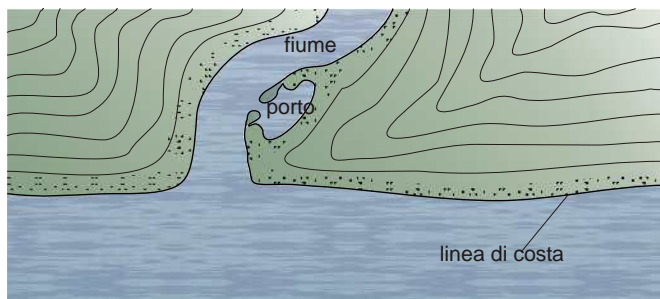
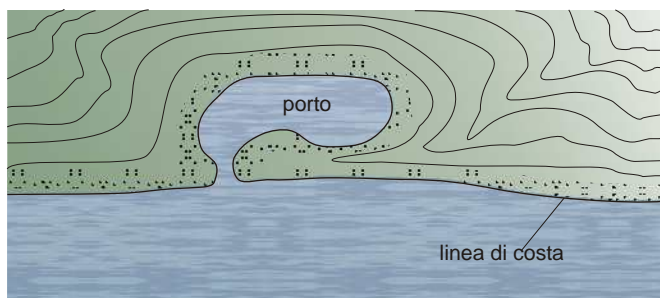
**Figura 7.0.3:** Ricostruzione planimetrica dell'area compresa tra le città di Ostia (a destra) e Porto (a sinistra), durante l'età imperiale dell'Antica Roma (da Dal Maso & Vighi, 1975). Nell'illustrazione sono visibili il tratto terminale del fiume Tevere, con l'ampio meandro di Ostia Antica, il canale artificiale di servizio del Porto di Traiano (o "Fossa Traiana", attualmente noto come "ramo di Fiumicino" del delta tiberino), e il più antico porto costiero di Claudio.

Il Porto di Traiano, di forma esagonale, venne costruito contemporaneamente al canale artificiale verso la fine del I sec. d. C., in posizione più interna e riparata rispetto al vecchio scalo, per ovviare ai problemi di interrimento dell'imbocco lungo costa, causato dalla deposizione dei sedimenti trasportati dalla corrente di deriva litoranea. A seguito del progressivo avanzamento della linea di costa, attualmente il Porto di Traiano si trova a ca. 2500 m dalla linea di riva. Nell'immagine sono anche visibili il ramo del Tevere di Fiumicino e, in tratteggio, il paleo-meandro di Ostia Antica, abbandonato dal corso d'acqua nel corso della disastrosa alluvione del 1557. Negli ultimi decenni tutto il litorale è stato interessato da un'intensa fase erosiva che ha determinato ingenti danni alle infrastrutture ed alle attività turistiche.

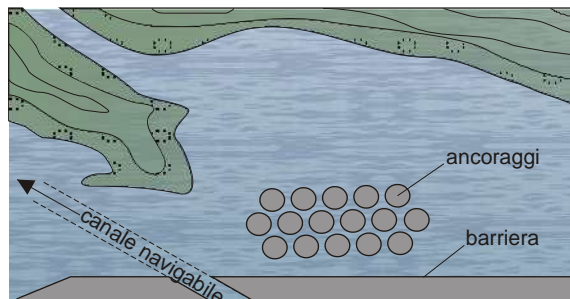
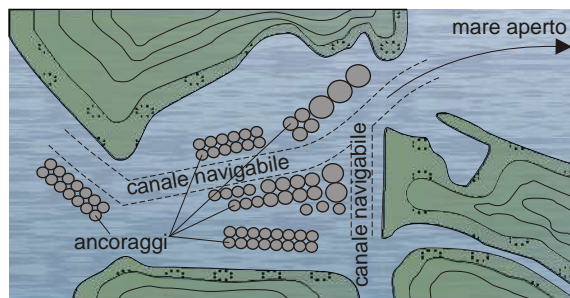
## PORTI NATURALI

In un porto di questo tipo viene sfruttata e valorizzata la naturale predisposizione morfologica del sito a offrire un approdo riparato. Nel caso più usuale i porti naturali si trovano in presenza di discontinuità morfologiche nella linea di costa, come insenature, calette, piccoli golfi, baie costiere o addirittura estuari fluviali, che possono essere sfruttati per fini commerciali e turistici senza la necessità di apportare rilevanti modifiche alle caratteristiche originarie. L'intervento antropico, in questi casi, si limita alla realizzazione di banchine o darsene, nel settore più interno, e di opere di protezione, quali dighe foranee e moli, in quello più esterno.

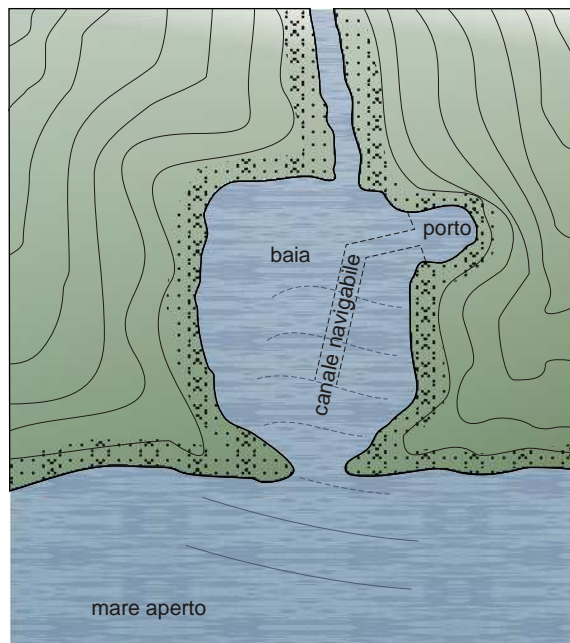
**Figura 7.0.4:** Differenti casi di porti naturali, realizzati lungo costa sfruttando le caratteristiche morfologiche del litorale.



**Figura 7.0.5:** Taranto, porto del mar Piccolo. Esempio di porto protetto con un unico canale di accesso ed un ampio bacino portuale al proprio interno.



**Figura 7.0.4:** Esempio di rada. Le rade possono coincidere con baie naturali o essere protette esternamente da dighe e nella loro parte interna sono attrezzate con dispositivi di ormeggio per il riparo di imbarcazioni.



**Figura 7.0.6:** Esempio di porto con imboccatura parzialmente protetta. Con tale configurazione, per consentire una navigazione in sicurezza anche nelle manovre di attracco e di partenza, occorre realizzare un canale marittimo ed una zona che offra riparo alle navi, all'interno dell'insenatura stessa.

# PORTI ARTIFICIALI

Si differenziano da quelli naturali per le modifiche apportate dalle attività antropiche ai siti originali o per la totale artificialità di tutte le strutture di servizio, necessarie a permettere la fruibilità dei siti e la funzionalità del porto stesso.

Non di rado si rende necessaria l'esecuzione di interventi di difesa esterna delle zone di imboccatura e dell'eventuale canale di accesso, che sono generalmente costituiti da dighe o moli.

È assolutamente sconsigliabile realizzare porti artificiali lungo tratti di costa bassa sabbiosa, il cui equilibrio, altrimenti, sarebbe immancabilmente alterato.

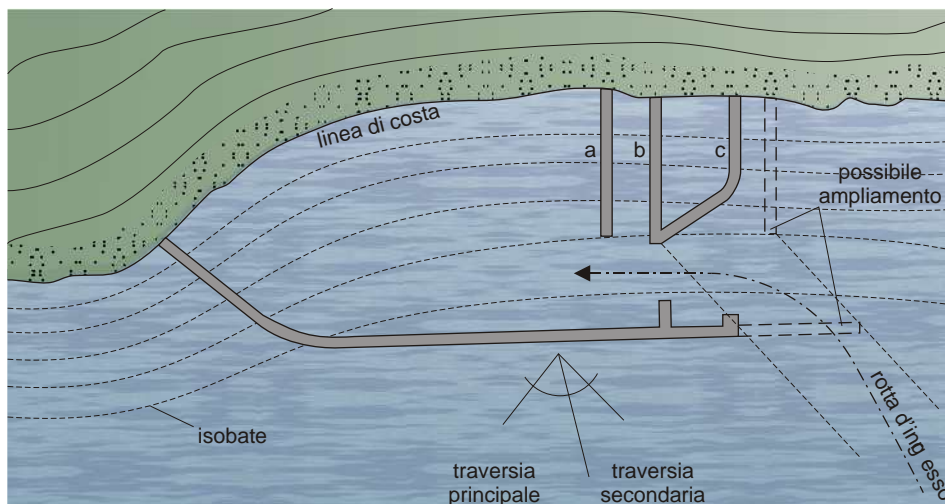
I porti artificiali possono essere classificati sulla base della principale opera o unità morfologica che caratterizza lo scalo, fornendo un primo inquadramento nel contesto locale "porto a bacino", "porto-isola", "porto-canale", "porto a marea", "porto a moli convergenti", "porto con diga foranea di protezione". La loro struttura interna risponde alle più svariate esigenze di utilizzo commerciale, turistico, militare e prevede un'articolazione in darsene, banchine, terrapieni, pontili, bacini ecc.

## Descrizione e caratteristiche

### Porto a bacino

Un porto di questo tipo è usualmente costituito da un bacino difeso da uno o due moli guardiani collegati alla costa: il molo sopraflutto si oppone alle onde dominanti, mentre quello sottoflutto serve a contrastare quelle secondarie. I moli vengono configurati in modo da avere una forma ed una dimensione tali da garantire condizioni di agitazione all'imbocco, compatibili con la sicurezza della navigazione, e all'interno con le operazioni di carico e scarico delle navi.

**Figura 7.0.7:** Esempio di porto a bacino.



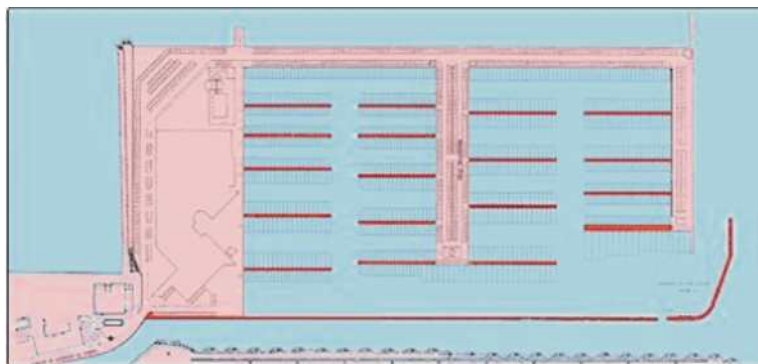
**Figura 7.0.8:** Costa Ligure. Porto di Arenzano.







**Figura 7.0.9:** Plastico del progetto del porto turistico in prossimità della foce del fiume Fiora (Montalto marina, Regione Lazio).



**Figura 7.0.10:** "Marina" di la Spezia. Il termine marina indica uno specchio d'acqua attrezzato per imbarcazioni da diporto con rifornimento di viveri e carburante, centro riparazioni, servizi igienici, servizio comunicazioni a terra. Il porto turistico di la Spezia è costruito su pali e palancole ed è protetto esternamente da una struttura parzialmente assorbente. Nel corso degli ultimi vent'anni, con l'incremento delle utenze diportistiche, si sono resi necessari ampliamenti e costruzioni di porti turistici che hanno spesso influenzato il regime dei litorali.

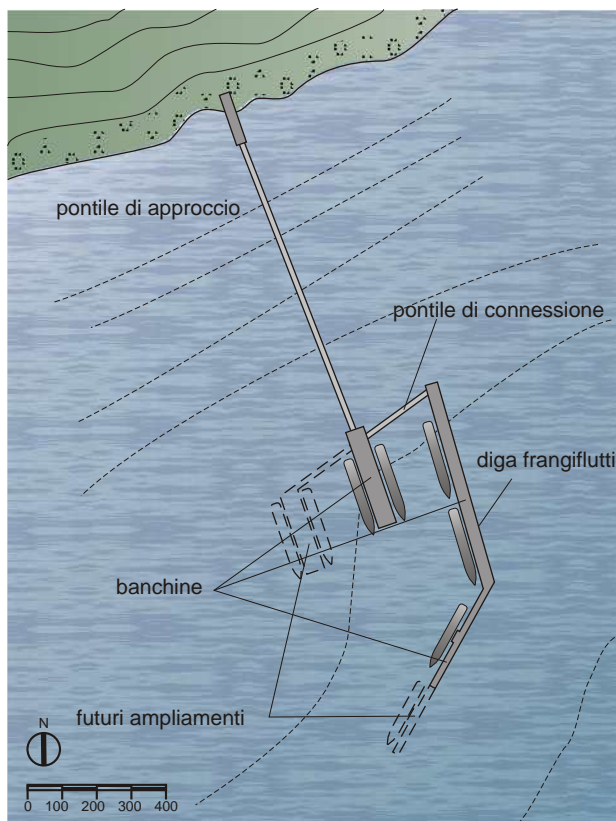
### Descrizione e caratteristiche

### Porto isola

Si tratta di un'opera costruita al largo della costa, collegata ad essa mediante un pontile di connessione e protetta da una diga frangiflutti. Il porto isola è una soluzione ingegneristica che consente di ridurre i rischi dell'interrimento, di favorire l'agibilità del porto anche in caso di fondali poco profondi sotto costa e di mantenere lontano dalla riva installazioni che possono risultare inquinanti o pericolose, gestendo in modo opportuno eventuali incidenti.

La posizione della diga foranea va attentamente studiata per garantire l'operatività degli accosti ed evitare che fenomeni di interazione con il pontile e correnti litoranee favoriscano un'eccessiva deposizione di sedimenti nelle zone di calma.

**Figura 7.0.11:** Porto-isola di Manfredonia (prov. FG, Regione Puglia).



### *Descrizione e caratteristiche*

#### **Porto canale**

Il porto-canale si delinea come un'evoluzione in senso artificiale degli scali naturali nati alla foce di un fiume o all'interno di specchi d'acqua lagunari.

Le sponde del canale sono protette da dighe, o moli, perpendicolari al litorale, che delimitano l'imboccatura: esse hanno la funzione di raggiungere profondità compatibili con il pescaggio del naviglio utente del porto e limitare l'interrimento dell'accesso dovuto al trasporto solido litoraneo.

Se necessario, vengono realizzati, a lato del canale centrale, piccoli bacini di riserva, chiamati "pialasse" o "piallazze", che servono ad evitarne l'interrimento.

Il sito deve essere caratterizzato da una adeguata profondità dell'alveo fluviale e da discrete escursioni di marea, che favoriscono il ricambio idrico e l'allontanamento dei sedimenti, soprattutto per fiumi con portate ridotte.

Per ridurre l'agitazione residua all'interno del canale, possono realizzarsi lungo le sponde piccole strutture di assorbimento e dissipazione, nonché bacini di smorzamento.

**Figura 7.0.12:** Porto di Gioia Tauro. Dove non esistono le condizioni naturali, il porto canale può essere completamente artificiale come accade a Gioia Tauro (RC) dove il porto è stato realizzato nel retrospiaggia con andamento parallelo alla costa. Foto Google Earth.



### *Descrizione e caratteristiche*

#### **Porto a marea con chiuse**

Le chiuse rappresentano la soluzione per ovviare al problema dell'agibilità degli scali portuali situati in zone con forti escursioni di marea, e prevedono la realizzazione di un sistema di sbarramenti mobili tra mare aperto e porto, che consentono il passaggio delle navi anche in presenza di variazioni significative del livello del mare.

### *Descrizione e caratteristiche*

## Porto con moli convergenti

In questo caso l'agibilità del porto viene garantita da due moli convergenti, che hanno l'effetto di attenuare il moto ondoso e di delimitare l'imboccatura.

Tale soluzione si usa quando la distribuzione del moto ondoso individua due direzioni prevalenti e consente una maggior facilità di manovra durante la rotta d'ingresso ed un rallentamento nei processi di interrimento del bacino interno. È opportuno che i moli siano tanto lunghi da raggiungere fondali aventi profondità sufficiente, e impedire alle correnti costiere di deporre sedimenti presso l'imboccatura o all'interno del porto stesso.

**Figura 7.0.13:** Porto a moli convergenti di Manfredonia . Foto Google Earth.



### *Descrizione e caratteristiche*

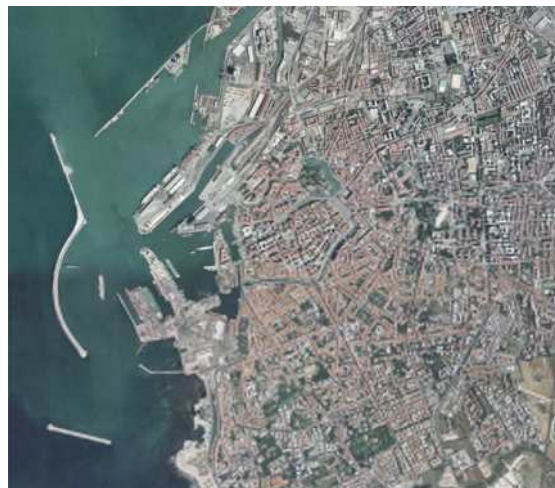
## Porto con diga foranea di protezione

Rappresenta una variante delle tipologie precedenti, con l'aggiunta di un'ulteriore protezione all'imboccatura del porto costituita da una diga approssimativamente parallela alla costa.

La particolare configurazione delle opere fa sì che l'unico canale di accesso abbia due imboccature, comporti difficoltà di manovra per navi grandi e possa essere interessato da locali fenomeni di interrimento.

**Figura 7.0.14:** Esempi di porti con diga foranea di protezione. A destra Livorno, a sinistra La Spezia. Foto Google Earth.

Se la diga foranea viene costruita di fronte all'accesso di un porto canale, si deve porre grande attenzione alle modifiche indotte dalla sua presenza sulla libera diffusione delle acque dolci del fiume.





### Generalità

**S**i tratta di strutture che devono esercitare un'azione di smorzamento o di ostacolo fisico alla propagazione delle onde (impedendone l'entrata nel porto), oppure modificare il trasporto solido litoraneo e ridurre indesiderati effetti di erosione o accumulo di sedimenti. Le principali opere utilizzate per la difesa dei porti sono costituite da dighe e moli. Si parla di diga quando la struttura è distaccata da terra, mentre si parla di molo quando la struttura è radicata a terra. Nel secondo caso l'opera, nel suo lato riparato, può avere anche una funzione di attracco per le imbarcazioni.

### Generalità

## Dighe e moli

La funzione principale delle dighe marittime è quella di proteggere l'ingresso al porto, o le aree di manovra delle navi, dal moto ondoso, con particolare riguardo alle situazioni di maggiore criticità operativa, come tempeste e forti mareggiate. Esse presentano una forma allungata in direzione sub-parallela alla costa, ed una sezione trapezoidale o rettangolare con altezza e dimensioni relazionate alle condizioni del moto ondoso. L'impatto estetico e ambientale delle dighe e dei moli sulle aree costiere è rilevante e può determinare la perdita di naturalità dei luoghi, la modifica della morfologia dei fondali, l'alterazione dei parametri caratteristici delle acque. Gli impatti estetici e ambientali possono essere mitigati attraverso l'utilizzo di materiali naturali (massi di cava), la minimizzazione degli scavi, dei rinterri e degli altri lavori necessari per la realizzazione delle opere, oppure, in alcuni casi, adottando correttivi che rendano le strutture permeabili. In base agli aspetti strutturali ed alle modalità realizzative e di funzionamento, dighe e moli si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

- a scogliera o a gettata
- a parete verticale o riflettenti

**Figura 7.1.1:** Porto di Palermo, foto fine ottocento. Molo radicato a scogliera.



**Figura 7.1.2:** Differenti tipologie di diga marittima. In alto, dighe a scogliera in massi naturali: porto di Andora (SV), a sinistra; porto di Sanremo (IM), a destra. Al centro, porto di Piombino (LI), diga a scogliera in massi tetrapodi (a sinistra); particolare della diga (a destra). In basso, dighe a parete verticale: a sinistra, porto di Vado Ligure (SV); a destra, particolare della testata della diga foranea del porto di Genova.



### *Descrizione e caratteristiche*

### **Dighe e moli a scogliera**

Le dighe a scogliera, o frangiflutti a scogliera, vengono utilizzate prevalentemente su fondali non molto profondi. Tali opere risultano particolarmente indicate per resistere alle intense sollecitazioni ondose che hanno luogo in zona frangente, che risulterebbero, al contrario, eccessivamente gravose per le opere a parete verticale. La dissipazione dell'energia dell'onda incidente e la riduzione dei fenomeni di riflessione vengono ottenuti principalmente ad opera delle asperità e dei vuoti esistenti fra masso e masso; vanno quindi assicurate le corrette condizioni di permeabilità e di stabilità della struttura, nonché il corretto concatenamento degli elementi che la compongono.

In una diga di questo tipo si possono distinguere:

- Un imbasamento o sottostruttura in pietrame, che ripartisce i carichi sul fondo, fornendo un appoggio stabile per tutta la struttura.
- Un nucleo interno, realizzato con materiale di cava tout-venant, protetto da massi disposti a strati successivi.
- Uno o più strati in blocchi naturali o artificiali, le cui dimensioni aumentano verso l'esterno, disposti secondo opportuna pendenza. Lo strato più esterno, lato mare, viene chiamato mantellata (rivestimento), ed è spesso costituito da elementi di forma geometrica particolare (es. tetrapodi) che realizzano il massimo concatenamento ed un'alta percentuale di vuoti.
- Uno o più strati-filtro, posizionati tra il nucleo e il rivestimento, la cui funzione è quella di impedire l'asportazione del materiale dal nucleo stesso. La porosità deve decrescere dall'esterno verso l'interno, per fornire maggior efficacia nell'azione di smorzamento dell'energia delle onde.
- Una protezione al piede, ad incrementare la stabilità dell'opera e ridurre le sollecitazioni.
- Un coronamento in calcestruzzo, comprendente l'eventuale muro, la cui finalità è quella di stabilizzare la sommità e ridurre la tracimazione delle onde più alte (muro paraonde).



**Figura 7.1.3:** Costruzione di un molo radicato con mantellata in massi naturali.

Se le opere sono isolate in mare, per la loro costruzione risulta indispensabile il ricorso ai mezzi marittimi (bette, pontoni, sbandate, draghe, rimorchiatori) con progressivo aumento dei costi dell'opera.

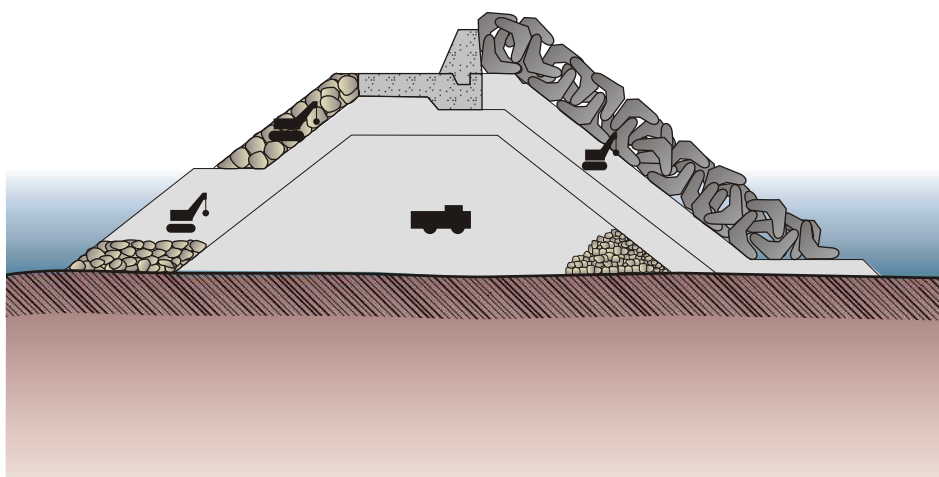
Si possono realizzare dighe con mantellata in massi naturali o in massi artificiali (Tetrapod, Quadripod, Stabit, Antifer Block, Tribar, Dolos, Cubi modificati, Massi speciali, ecc.).

I materiali naturali devono essere chimicamente inalterabili e meccanicamente resistenti, compatti e con un elevato peso specifico. Per tale impiego sono utilizzabili calcari, basalti, graniti e conglomerati cementati. In base al peso delle unità si distinguono quattro categorie:

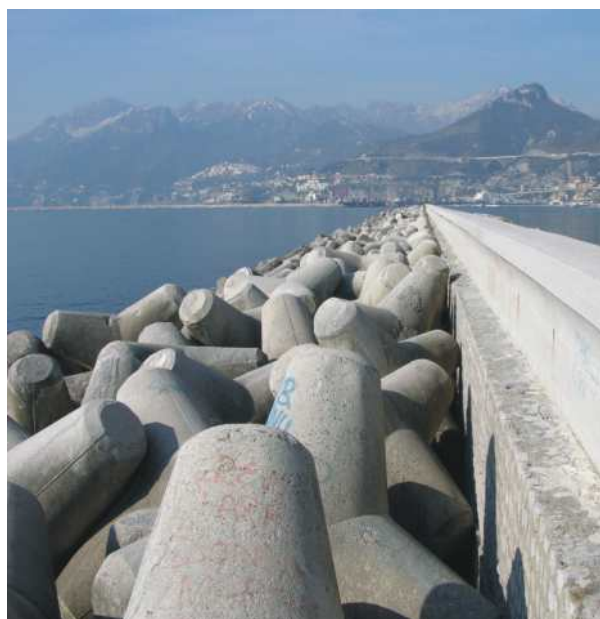
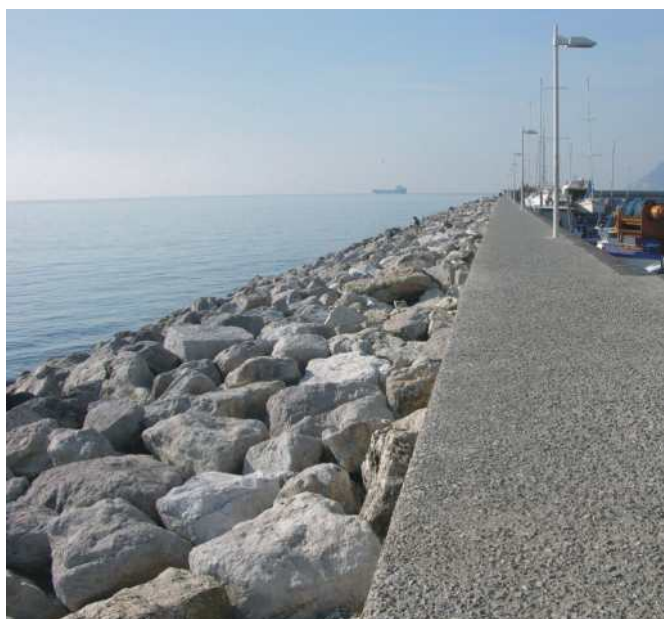
- categoria 1:  $50 \text{ kg} < P < 1000 \text{ kg}$
- categoria 2:  $1 \text{ t} < P < 3 \text{ t}$
- categoria 3:  $3 \text{ t} < P < 7 \text{ t}$
- categoria 4:  $P > 7 \text{ t}$

Le mantellate in massi artificiali sono caratterizzate da blocchi in calcestruzzo incastrati reciprocamente per formare una struttura omogenea e permeabile al moto ondoso. Variando dimensioni e forma degli elementi l'opera aumenta la propria capacità di resistenza al moto ondoso e si adatta alle diverse condizioni di esercizio.

**Figura 7.1.4:** Sezione esplicitiva di diga con mantellata di elementi artificiali.



**Figura 7.1.5:** Esempi di moli. A destra con mantellata artificiale in tetrapodi, si nota il muro paraonde sagomato verso il mare. A sinistra un molo con mantellata in massi naturali.





## Descrizione e caratteristiche

### Dighe e moli a parete verticale

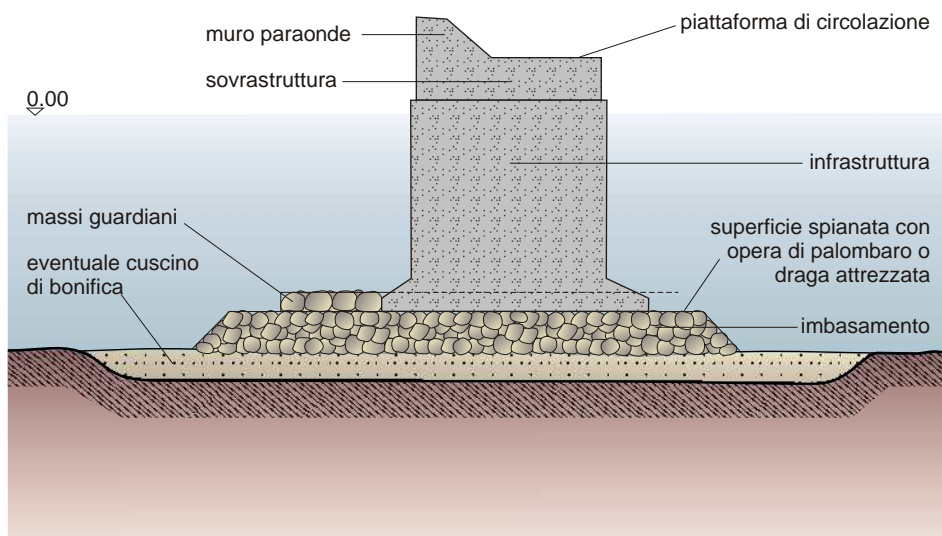
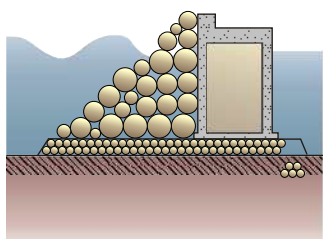
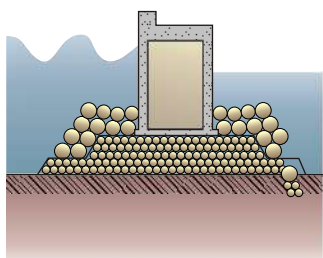
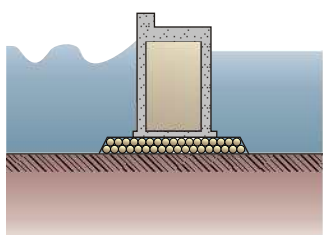
Tali strutture vengono in genere realizzate su fondali di profondità elevata, e dal lato interno sono sovente attrezzate per permettere l'ormeggio delle imbarcazioni. Dal lato del mare aperto, la struttura si oppone all'azione delle onde incidenti provocandone la riflessione verso il largo. Il comportamento perfettamente riflettente del muro è però assicurato solo quando è possibile escludere il frangimento dell'onda a ridosso o a breve distanza dalla parete.

Si tratta di opere costituite da pareti verticali o sagomate lato mare, appoggiate direttamente sul fondale tramite un imbasamento costituito da uno scanno di materiale lapideo.

Gli elementi fondamentali di una diga a parete verticale sono costituiti da:

- Uno scanno di imbasamento a scogliera.
- Un muro verticale o subverticale, che si eleva al disopra del livello medio del mare, costituito da elementi artificiali prefabbricati (omogenei, cellulari o ciclopici), sovrapposti e collegati fra loro in modo da formare un corpo unico, oppure da cassoni cellulari in conglomerato cementizio armato, riempiti con materiale inerte o calcestruzzo.
- Un coronamento, comprendente una piattaforma di transito con eventuale muro paraonde. L'opera viene completata con la realizzazione di massi guardiani, che hanno il compito di protezione al piede della parete verticale, lato mare. Talvolta, in condizioni di mare particolarmente gravose e in presenza di basso fondale, il paramento lato mare delle opere a parete verticale viene protetto con una struttura a gettata.

**Figura 7.1.6:** Schemi di dighe a parete verticale.



**Figura 7.1.7:** Cassoni in c.a. Pronti per essere rimorchiati verso il sito di costruzione del molo. Una volta sul luogo le strutture vengono affondate riempiendole con materiale inerte.



---

## Bibliografia

AA.VV. "A guide to coastal erosion management practices in Europe". Prepared by the National Institute of Coastal and marine Management of the Netherlands. Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3. Coastal erosion evaluation of the needs for action. Directorate General Environment, European Commission, EUROSION Programme, January 2004.

R.P.C. Ltd "Basalton concrete revetment columns". Brochure, [www.rpcltd.co.uk](http://www.rpcltd.co.uk), 2002.

AA.VV. "Coastal Engineering Manual". USACE, U.S. Army Corps Ed., 2001.

AA.VV. "Environmental engineering for coastal shore protection". Dept. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., 1989.

AA.VV. "Design of coastal revetments, seawalls and bulkheads". EM 1110-2-1614, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., June 1995.

AA.VV. "Environmental recovery and maintenance of eroding littorals with the use of marine sandy deposits". Progetto BEACHMED. Regione Lazio, Direzione regionale Ambiente e Protezione Civile - Area Difesa del Suolo; Osservatorio regionale dei litorali - Centro di monitoraggio. Regione Lazio, Roma, 2004.

AA.VV. "General criteria for waterfront construction". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of MIL-HDBK-1025/6, May 1988. UFC 4-151-10, September 2001.

AA.VV. "Giornata di Studio sulla Difesa delle Coste-27 ottobre 2000. Linee Guida per il Piano Generale di Difesa delle Coste". Assessorato per le Politiche dell'Ambiente. Dip. Opere Pubbliche e Servizi per il Territorio. Regione Lazio. Roma, 2000.

AA.VV. "Guide on sea and lake dikes". TAW, Technical Advisory Committee Flood Defences, The Netherlands, December, 1999.

AA.VV. "La rete mareografica italiana". I Ristampa, Pres. Cons. Ministri, Dip. per i Servizi Tecnici Nazionali, Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 2000.

AA.VV. "Low cost shore protection...A guide for engineers and contractors". U.S. Army Corps of Engineers, 1981.

AA.VV. "Manuale di ingegneria naturalistica Applicabile al settore idraulico". Reg. Lazio. Dipartimento Ambiente e Protezione Civile. Roma, 2002.

AA.VV. "Manuale di ingegneria naturalistica Applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose. Volume 2". Reg. Lazio. Dipartimento Ambiente e Protezione Civile. Roma, 2003.

AA.VV. "Manuale per la difesa del mare e della costa". Fondazione Giovanni Agnelli Ed. Milano, 1990.

AA.VV. "Military harbors and coastal facilities". US. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of NAVFAC Design Manual 26.1 26.2 26.3. UFC 4-150-06, December 2001.

AA.VV. "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici". AIPCN-PIANC, Associazione Internazionale di Navigazione, Sezione Italiana, febbraio, 2002.

AA.VV. "Recuperation environnementale et entretien des littoraux en erosion avec l'utilisation des depots sablonneux marins". Osservatorio sul Mare della Regione Lazio. Progetto BEACHMED. Prevenzione e Gestione dei Rischi Naturali. Regione Lazio. Roma, 2001.

AA.VV. "Salvaguardia di Venezia e della laguna Atlante delle opere". Ministero LL.PP., Magistrato alle Acque di Venezia. Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova, anno VIII, nn. 1/2., gennaio-giugno, Venezia, 2000.

---

AA.VV. "Seawalls, bulkheads and quaywalls". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of Design Manual 25.4, July 1981. MIL-HDBK 1025/4, September 1988.

AA.VV. "Traditional techniques for shoreline erosion control in reservoirs". U.S. Army Corps of Engineers, REMR Technical Note GT-SE-1.6, Suppl 5, 1992.

Accordi B., Lupia Palmieri E. "Il globo terrestre e la sua evoluzione". III Ed. Zanichelli, 1991.

Adamo P. "I porti". Università di Palermo, Corso di Tecnica dei Trasporti del Prof. Luigi La Franca, Anno Accademico 2003-2004, Palermo, 2003.

Allsop N.W.H. "Breakwaters, coastal structures and coastlines". Proceedings of the International Conference organized by the Institution of Civil Engineers, London, UK, 26-28 Sept., Thomas Telford, 2001.

American Association of Port Authorities "Port Design and Construction". Washington D.C., 1964 (2nd Ed. Published 1973 under title: "Port Planning, Design and Construction").

Aminti P., Pranzini E. "La difesa dei litorali in Italia". Edizioni delle Autonomie. Roma, 1993.

ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente - "Atlante delle opere di sistemazione dei versanti". Roma, 2001.

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici - "Atlante delle opere di sistemazione fluviale". Roma, 2004.

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici - "La formazione ambientale attraverso stages IV Raccolta delle tesi elaborate nelle sessioni 2003-2004". Roma, 2004.

ARMORTEC "Armorflex, A-Jacks, Armorloc". Brochure, Armortec Inc., 2004.

Bakker P., van den Belge A., Hakenberg R., Klabbers M., Muttray M., Reedijk B., Rovers I. "Development of concrete breakwater armour units". 1st Coastal, Estuary and Offshore Engineering Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada, June 2003.

Balani R., Sundar V. "Hydraulic performance of double screen breakwaters". Proceedings of 5th International Conference on Hydro-Science & ENGG, Warsaw University of Technology, Theme E, Paper NO. 58, Sept 18-21 2002.

Barnard T. "Coastal shoreline defense structures". Self-taught education unit. Center for Coastal Resources Management, Virginia Institute of Marine Science, Virginia, December 1999.

Berriolo G., Sirito G. "Spiagge e Porti turistici". Hoepli Ed. Milano, 1972.

Benassai E. "Vulnerabilità dell'ambiente costiero ed interventi di difesa dei litorali". Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale "Girolamo Ippolito", Napoli, 2003.

British Standard BS 6349 "Maritime Structures". Part 7, 1991.

Carter R. W. "Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines". Academic Press, London, 1988.

Castiglioni G.B. "Geomorfologia". UTET Ed. Torino, 1991.

Clauss G.F., Habel R. "Artificial reefs-Computation and validation with free water surface". Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering, Berlin University of Technology, Star-CD User Meeting, Berlin, 2000.

CNR-MURST "Atlante delle spiagge italiane". SelCa, Firenze, 1997.

Colombo T. "Manuale dell'Ingegnere". Vol. 2. Hoepli Ed. Milano, 1998.



---

Cortemiglia G.C., Lamberti A., Liberatore G., Lupia calmieri E., Stura S., Tomasicchio U. "Raccomandazioni tecniche per la protezione delle coste". CNR- Prog. Fin. Conservaz. Del Suolo, Sottoprogetto Dinamica dei Litorali, 156, pp.81.

Cowdell S., Allyn N. "Breakwater Design & Construction: A Case Study". Port Technology International - Edition 9: Section 6: Port Planning Construction & Maintenance, Canada, january, 2004.

Crossman M. "Low cost rock structures for beach control and coast protection - Practical design guidance". DEFRA, Department for Environment Food and Rural Affaire, Hr Wallingford, Environment Agency, may 2003.

Crouch R. "Probabilistic design tools for vertical breakwaters Structural aspects". MAST III PROVERBS project. Vol IIc, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, 140 pp., 1999.

Dean R.G. & Dalrymple R.A. "Water wave mechanics for engineers and scientists". World Scientific Press, Singapore, 353 pp., 1991.

De Falco G. & Piergallini G. "Mare, golfo, lagune studi e ricerche", Studi e Ricerche, 208 pp., 2003.

De Marinis M. "Porto-canale di Pescara: storia del porto di Pescara ed impatto ambientale della diga foranea sull'ecosistema circostante". Ass. Cult. Borgomarina, F.A.B. & A. Spina. Lavoro inedito, Pescara, 2001.

De Pippo T., Pennetta M., Terlizzi F., Vecchione C. "Ipotesi di intervento di ripascimento protetto lungo la spiaggia dei Maronti (Comune di Barano Isola d'Ischia- Napoli)". Geologia Tecnica & Ambientale, n. 1, gennaio/marzo 2000.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Dredging and dredged material disposal". EM 1110-2-5025; CECW-EH-D, Washington D.C., 1983.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of coastal groins and nearshore breakwaters". Engineering Manual NO.1110-2-1617, Washington D:C., 1992.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of coastal revetments, seawalls and bulkheads". Engineering Manual EM 1110-2-1614, Washington D.C., 1995.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of military ports". TM 5 850-1, Headquarters Department of the Army, Washington D.C., 15 february 1983.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Hydraulic design of navigation locks". CECW-EH-D, Engineer Manual EM 1110-2-1604, Washington D.C., june, 1995.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Hydraulic design of small boat harbors". EM 1110-2-1615, CECW-EH-D, Washington D.C., 25 september 1984.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Review of recent geotextile coastal erosion control technology". Technical Letter ETL 1110-2-353; CECW-PF, CECW-EH-D, Washington D.C., 31 december 1993.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Shore Protection Manual". Volumes I and II, U.S. Army Coastal Engineering Research Center. Books for business, New York Hong Kong, 1984.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Tidal hydraulics". CECW-EH-D, EM 1110-2-1607, Washington D.C., march, 1991.

Douglass S.L., Pickel B. H. "Headland beach construction on bay shorelines". Proceedings of 12th Ann. Nat. Conf. Beach Preservation Technology, Alabama, 1999.

Ferro V. "La sistemazione dei bacini idrografici". McGraw Hill, Milano, 2002.

FORTE S.L. "Arrecife Artificial BeachsaverForte". Brochure, FORTE Hormigones Tecnologicos S.L., 2000.

Gavin N. P., Colin D. C. Design and construction of rubble mound breakwaters". IPENZ Transactions, Vol. 25, No.1/CE, New Zealand, 1998.

Goda Y. "Random seas and design of maritime structures". University of Toko Press, Tokyo, 1985.

- 
- Gormitz & Levedeff "Global sea level changes during the past century". In: Warrick R.A., Barrow E.M., and Wigley M.L. (Eds.), 1987.
- Graw K.U., Knapp S., Sundar V., Sundaravadivelu R. "Dynamic pressures exerted on semicircular breakwaters". LACER NO.3, Leipzig (Germany), 1988.
- Hanson H., Kraus N.C. "Chronic Beach Erosion Adjacent to Inlets and Remediation by Composite (T-Head) Groins". ERDC/CHL CHETN-IV-36, U.S. Army Corps of Engineers, June 2001.
- Harris L. E. "Breakwater water attenuation". Brochure, Advanced Coastal Technology Inc., Tipton, NC, 2002.
- Harris L. E. "Submerged reef structures for habitat enhancement and shoreline erosion abatement". CETNIIIxx, Coastal Engineering Technical Note, September, 2001.
- Harris L.E., Mostkoff B.J., Zadikoff G. "Artificial reefs: from waste to resources". Oceans'96, Marine Technology Society, Washington D.C., 1996.
- Hiliau W., Philips D. "Artificial surfing reef construction". Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium, Raglan, New Zealand, 22-25 June, 2003.
- Holmes P. "Coastal and offshore structures". A course in coastal defense systems 1 Chapter 10. Professional Development Programme. Coastal Infrastructure Design, Construction and Maintenance. St. Lucia, West Indies, July 18-21, 2001.
- Hsu J.R.C., Silvester R., Xia Y.M. "Applications of headland control". J. waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, ED 395, ASCE, 115 (3), pp. 299-310, 1989.
- Ireeta T. W., Sørstrøm M., Sivertsen A., Steinnes Jensen M. H., Puybaret C., Forslund K. "A comparison of dredging and in situ capping". NTNU, TBA 4820, Professional Report in EiT; village 22 - A Clean and Rich Sea only a vision?, Team 2, Norwege, 2004.
- Jarlan G.L.E. "A perforated vertical wall breakwater". The Dock and Harbour Authority, vol.41, No.486, pp.394-398, April 1961.
- Jones C.P., Johnson L.T. "Coastal construction practices". Project No. A/MAP-1, Grant No. NA80AA-D-0038. Marine Advisory Bulletin MAP-23, Florida Sea Grant College Program, January, 1982.
- Liu P.L.-F. "Advances in coastal and ocean engineering". World Scientific Publishing Company, Ithaca, NY, 1995.
- MAFF "Flood and coastal defence project appraisal guidance strategic planning and appraisal". FCDPAG2 A procedural guide for operating authorities, April, 2001.
- Malkoski V. "Artificial reef project". Division of Marine Fisheries, Massachusetts, 2002.
- Mandaglio G. (a cura di) "Ambiente costiero e misure di salvaguardia". Falzea Editore, Reggio Calabria, 2005.
- Matteotti G. "Lineamenti di costruzioni marittime". S.G.Editoriali, Padova, 1994.
- Matteotti G., De Santis M., Marconi V. "Difese di spiaggia con strutture flessibili semipermeabili. Esame del loro comportamento su modello a fondo mobile". Istituto di Costruzioni Marittime e di Geotecnica, Università di Padova. Padova, 1979.
- Minikin R.R. "Winds, Waves and Maritime Structures". Griffin, London, 1963.
- Moffat & Nichol "Low cost shore protection : final report on shoreline erosion control demonstration program (section 54)", U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA, 1981.
- Mondini F. "La coltivazione di cave sottomarine di sabbia di ripascimento". Ricerca effettuata nell'ambito della Convenzione fra Regione Lazio e Dipartimento di Scienze della Terra-Univ. La Sapienza sul tema <Individuazione e caratterizzazione di depositi sabbiosi presenti sulla piattaforma continentale del Lazio e valutazione di un loro utilizzo ai fini di ripascimento dei litorali in erosione>. Roma, 1998.

- 
- Moreno L. J., Kraus N. C. "Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design". Proceedings of Coastal Sediments'99, ASCE, Vol. 1, New York, pp. 860-875, 1999.
- Noli A. "Calate portuali e terminali marittimi: criteri generali di pianificazione e di costruzione". Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Ed. ESA, 1988.
- NOMATEC "Electrochemical Reef CONstruction (ERCON)". Brochure, NOMATEC Project, 2002.
- Ogaya S., Ishii T., Kawamura R., Okamoto T., Yamada K. "New steel technologies essential for social infrastructure development". NKK Technical Review No. 88, Japan, 2003.
- Oumeraci H., Kortenhaus A., Allsop N.W.H., e Groot M.B., Crouch R.S., Vrijling J.K. „ Probabilistic design of caisson breakwaters and seawalls- Present status & perspectives". ICCE, 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney (Australia), july, 2000.
- Panizza M. "Geomorfologia". Pitagora Ed. Bologna, 1992.
- Perdock U.H. "Application of timber groynes in coastal engineering". M.SC. Thesis, Section of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of technology, The Netherlands, december 2002.
- Pilarczyk K.W. "Design of low-crested (submerged) structures an overview". 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Sri Lanka, Colombo, 2003.
- Pilarczyk K.W. "Design of revetments". Dutch Public Works Dpt. (RWS), Hydraulic Engineering Division, Delft, The Netherlands, 2001.
- Pilarczyk K.W. "Hydraulic and coastal structures in international perspective". Dutch Public Works Dpt., Road and Hydraulic Engineering Institute, Delft, The Netherlands, 2003.
- Pilarczyk K.W. "Intergrated approach and future needs in coastal engineering: general remarks". International Conference on Estuaries and Coasts. Hangzhou, China, November 9-11 2003.
- Ricci Lucchi F. "Sedimentologia". Parte II, CLUEB Ed., Bologna, 1980.
- Schiereck G. J. "Introduction to bed, bank and shore protection". Delft University Press, july, 2001.
- Seament Shoreline Systems Inc. "Breakwater boxes". Brochure, Seament Shoreline Systems Inc., 2004.
- Shankar N. J., Cheong H. F., Nallayarasu S. "Coastal protection by submerged plate breakwater". Dept. of Civil Engineering, vol. 11, no. 1, National University of Singapore, Singapore, 1996.
- Silvester R., Hsu J. R. C. "Coastal stabilization". Prentice Hall Ed., Englewood Cliffs, 1993.
- Silvester R., Hsu J. "Coastal stabilization, innovative concepts". Prentice Hall Ed.. New Jersey, 1997.
- Simm J., Cruickshank I. "Construction Risk in Coastal Engineering". T. Telford Ed., UK, 1998.
- Skinner P., Bankston D., Reichel C., Baker G. "Using levees for flood protection". Louisiana State University Agricultural Center, Pub. 2744 (10M), july 1999.
- Szedlmayer S. T. "Artificial reefs: design, placement and permitting". ANR-828 MASGP-94-010, Auburn University, Marine Extension & Research Center; Sea Grant Extension, 1994.
- Tomasicchio U. "Manuale di Ingegneria Portuale e Marittima". Bios Ed. Cosenza, 1998.
- Tomasicchio U. ed Altri "Istruzioni tecniche per la progettazione di opere di difesa della costa". Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1991.
- Tomasicchio U. "Istruzioni tecniche per la progettazione e la esecuzione di opere di protezione delle coste in erosione". Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1991.



---

U.S. Army Corps of Engineers "Port Construction and Repair". FM 5-480, Headquarters, Department of the Army, Washington D.C., 12 december 1990.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Availability of Concrete Armor Units Forms". CETN III-19, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, september 1994.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Bulkheads Their Applications and Limitations". CETN III-7, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Groin system transitions". CETN III-12, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, june, 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Groins Their Applications and Limitations". CETN III-10, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Revetments Their Applications and Limitations". CETN III-9, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Riprap Revetment Design". CETN III-1, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, june 1985.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Seawalls Their Applications and Limitations". CETN III-8, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Use of Gabions in the Coastal Environment". CETN III-31, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, december 1986.

U.S. Department of the Army "Port construction and rehabilitation". Technical Manual TM 5-360, Washington D.C., September 1964.

Wolcott Sample J. "An evolving method of coastal erosion control". Advanced Coastal Technology Inc., Geotechnical Fabrics Report, march 2002.

Yunovich M., Mierzwa A.J. "Waterways and Ports". Article, [www.corrosionimpact.com](http://www.corrosionimpact.com), 2002.

# Appendice

## PRESIDENZA DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI

### ISTRUZIONI TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE E LA ESECUZIONE DI OPERE DI PROTEZIONE DELLE COSTE

Le presenti istruzioni sono state proposte in una prima formulazione dalla commissione di studio nominata con provvedimento della Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 23/03/1990 e confermata con decreto del Ministero dei LL.PP. n. 652 del 05/02/1991. Qui si riportano i nomi dei partecipanti:

U. Tomasicchio: presidente, F. Adamo, E. Benassai, A. Brambati, R. Dal Cin, M. Cipriani, A. Lamberti, G. Liberatore, G. Matteotti, A. Ragone, S. Stura, G. Scarsi, L. Natale: membri, F. S. Campanale: membro segretario.

La suddetta proposta è stata successivamente modificata in base ai suggerimenti scaturiti dalla discussione nelle riunioni della Commissione relatrice e in aula. La discussione in Assemblea Generale è iniziata il 19 aprile 1991 per concludersi il 28 giu-gno dello stesso anno. I

#### NDICE

#### 1. INTRODUZIONE

- 1.1. Problematiche e obiettivi
- 1.2. Oggetto delle istruzioni
- 1.3. Requisiti generali per la progettazione e l'esecuzione
- 1.4. Problemi di inserimento ambientale
- 1.4.1 Vincoli territoriali

#### 2. RILIEVI ED INDAGINI PRELIMINARI ALLA PROGETTAZIONE

- 2.1. Unità fisiografica
  - 2.1.1 Definizione di unità fisiografica
  - 2.1.2 Identificazione in base alla morfologia della linea di riva
  - 2.1.3 Identificazione in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche
  - 2.1.4 Identificazione in base al regime delle onde e delle correnti
- 2.2. Rilievo dell'assetto attuale e della tendenza evolutiva
  - 2.2.1 Inquadramento del paraggio e definizione del settore di traversia
  - 2.2.2 Linea di riva
  - 2.2.3 Topografia della spiaggia emersa
  - 2.2.4 Topografia della spiaggia sommersa
  - 2.2.5 Sedimenti
  - 2.2.6 Subsidenza ed eustatismo
  - 2.2.7 Maree astronomiche e meteorologiche
  - 2.2.8 Regime dei venti
  - 2.2.9 Regime del moto ondoso
  - 2.2.10 Regime delle correnti
  - 2.2.11 Variazioni stagionali ed eventi eccezionali
  - 2.2.12 Caratteri socio economici dell'area costiera e valutazioni delle infrastrutture
- 2.3. Analisi dei processi costieri
  - 2.3.1 Trasporto litoraneo
  - 2.3.2 Apporti fluviali
  - 2.3.3 Azione eolica
  - 2.3.4 Altri apporti ed asporti
  - 2.3.5 Bilancio dei sedimenti
- 2.4. Monitoraggio delle coste

#### 3. LE OPERE DI DIFESA

- 3.1. Difesa aderenti
  - 3.1.1 Funzioni e limiti
  - 3.1.2 Indicazioni per il progetto
- 3.2. Pennelli
  - 3.2.1 Funzioni e limiti
  - 3.2.2 Indicazioni per il progetto
- 3.3. Frangiflutti distanziati
  - 3.3.1 Funzioni e limiti
  - 3.3.2 Indicazioni per il progetto
- 3.4. Ripascimenti e spiagge artificiali
  - 3.4.1 Funzioni e limiti
  - 3.4.2 Indicazioni per il progetto
- 3.5. Opere per la protezione di porti e canali di accesso
  - 3.5.1 Funzioni e limiti
  - 3.5.2 Indicazioni per il progetto
- 3.6. Dune, argini a mare e foci fluviali
- 3.7. Indicazioni per la scelta del tipo di opere
- 3.8. Il monitoraggio di controllo delle opere

#### 4. ELABORATI DI PROGETTO

- 4.1. Elaborati descrittivi
- 4.2. Elaborati di verifica
- 4.3. Prove su modello
  - 4.3.1 Modelli fisici
    - 4.3.1.1 Modelli di propagazione ondosa
    - 4.3.1.2 Modelli di integrazione con strutture composte di gradi elementi
    - 4.3.1.3 Modelli di spiaggia
  - 4.3.2 Modelli matematici o numerici
    - 4.3.2.1 Modelli della propagazione ondosa
    - 4.3.2.2 Modelli di trasporto dei sedimenti ed evoluzione morfologica della spiaggia

---

## 1. INTRODUZIONE

L'erosione costiera è il risultato del complesso dei processi per cui è rimosso più materiale di spiaggia di quanto ne è depositato. L'erosione è prodotta dall'acqua, dal vento, dalla gravità o da agenti biologici e, in particolare, da interferenze antropiche. Le onde e le maree sono gli agenti più frequenti dell'erosione.

Larga parte del litorale italiano è soggetta a erosione. Il problema è critico lungo alcuni tratti. I costi sociali ed economici dell'erosione sono maggiori nelle zone più densamente popolate, su cui insistono infrastrutture urbanistiche, residenziali, industriali e turistiche di alto valore economico. Spesso le erosioni minacciano città o aree abitate.

Dune sovrautilizzate e non sufficientemente fissate da copertura vegetale sono soggette a migrazione e erosione da vento; falesie possono franare dopo essere state scalzate dalle onde.

Le tempeste coincidenti con l'alta marea producono gli effetti più immediati e pericolosi.

### 1.1. Problematiche e obiettivi

L'erosione naturale è più pronunciata su litorali esposti, caratterizzati da depositi non consolidati, scarsi apporti di sedimenti, da acque profonde vicino a riva, da forti correnti e da intense e frequenti perturbazioni. L'attività dell'uomo può accentuare questi problemi in molti modi. Probabilmente il modo principale è la sottrazione di materiale dagli alvei dei fiumi e dagli arenili e la costruzione di strutture che impediscono l'apporto di sabbia alle spiagge.

Queste comprendono opere di ritenuta sui fiumi, pennelli e moli sulla costa, difese di promontori, che un tempo fornivano sedimenti, e sistemazioni a difesa dei suoli in collina e montagna.

Lo smantellamento della costa da parte del mare è un fatto naturale, a cui naturalmente si oppongono gli apporti fluviali ridistribuiti dall'onda lungo costa. L'erosione è segno di una rottura di questo equilibrio e rende necessario un intervento quando minaccia strutture o beni od opere di difesa degli stessi.

L'intervento di difesa deve rispondere alla richiesta di stabilità e di sicurezza al costo ottimale derivante dalla frequenza ed intensità dell'evento che si vuole affrontare e degli effetti sulle aree adiacenti e in generale dell'impatto ambientale. Quest'ultimo dovrà tener conto sia degli aspetti estetici, sia di quelli ecologici e socioeconomici.

Al fine di non alternare gli equilibri preesistenti, dovranno preferirsi le opere che producono il minimo disturbo alla dinamica costiera, all'utilizzazione futura del territorio e all'aspetto estetico del litorale.

### 1.2. Oggetto delle istruzioni

Le presenti istruzioni attengono alle opere di ingegneria delle coste destinate alla risoluzione di problemi, quali la stabilizzazione della linea di riva, la protezione dell'area retrostante, la stabilizzazione di passi marittimi (canali di accesso ai porti) e, più in generale, alle opere che interagiscono con il litorale anche senza finalità protettive. Si fa astrazione dai problemi portuali veri e propri.

Ogni problema reale deve essere compreso nella sua dinamica e deve trovare soluzione, eventualmente articolata, scegliendo fra le tecniche di intervento sul litorale al momento disponibili.

Vengono discusse pertanto le indagini che vanno intraprese al fine di comprendere la dinamica del litorale oggetto del problema e le principali soluzioni strutturali.

### 1.3. Requisiti generali per la progettazione e l'esecuzione.

Il progetto deve comprendere tutti i disegni ed elaborati necessari ad individuare l'opera di cui si prevede l'esecuzione e la sua collocazione nel paraggio circostante, il computo metrico ed estimativo, ed una o più relazioni dalle quali risultino:

- le fonti da cui sono stati desunti i dati impiegati;
- le indagini e i rilievi effettuati nel corso della progettazione;
- le motivazioni che hanno portato alla scelta dell'opera rispetto ad altre alternative;
- la valutazione della risposta dell'opera alle finalità proposte;
- lo studio dell'impatto dell'opera sulla morfologia costiera;
- la valutazione preventiva dei benefici ritraibili dall'opera stessa;
- i calcoli per la verifica della stabilità dell'opera e delle sue parti, con motivata scelta dei parametri di sollecitazione;
- il calcolo dell'energia ondosa trasmessa al di là dell'opera, nonché di quella dissipata sull'opera stessa.

Dovranno essere esposti nella relazione i risultati dei calcoli, delle indagini e degli studi intrapresi ed indicazioni sufficienti a ricostruire la metodica impiegata; i dati e gli elaborati intermedi dovranno essere esibiti ove richiesto.

Le sollecitazioni considerate nei calcoli di stabilità probabile della loro applicazione nel corso della vita presunta per l'opera stessa.

Dovrà essere valutata la possibilità del manifestarsi di erosioni della fondazione della struttura, naturali o indotte dall'opera stessa.

La valutazione del comportamento dell'opera dovrà essere effettuata sia in condizione di sollecitazioni estreme che nelle condizioni più frequenti o prevalenti.

La valutazione dei benefici e dei danni prodotti dall'opera dovrà essere effettuata tenendo conto della utilizzazione attuale del litorale interessato e di quella futura.

I progetti di opere, per le quali sussista dubbio nei riguardi della risposta funzionale, dovranno essere articolati per stralci esecutivi, e la risposta valutazione nel tempo a seguito di ogni stralcio; in sede di esecuzione di queste opere, dovranno essere previsti rilievi, che accertino la rispondenza dell'opera alle previsioni progettuali.

L'idoneità della soluzione progettuale deve comunque essere motivata nella relazione; similmente l'analisi costi-benefici andrà in ogni caso impostata attraverso la valutazione di: costo vivo di realizzazione e manutenzione dell'opera, costi indiretti per prevedibili danni ai litorali adiacenti, benefici diretti ai beni difesi e alle aree limitrofe.

La somma dei costi evidenziati dalla suddetta analisi definisce l'importanza (o rilievo) dell'opera, in proporzione alla quale dovranno risultare sufficientemente approfondite le indagini alla base del progetto.

Nella valutazione dell'importanza dell'opera, al fine di ottenere una voce confrontabile con la "stima dei lavori", si dovrà attualizzare ogni voce di costo al momento della esecuzione (o del suo inizio per opere di lunga realizzazione), utilizzando le valutazioni in atto tale momento ed un congruo interesse annuo.



#### 1.4. Problemi di inserimento ambientale

Il raggiungimento di un razionale assetto urbanistico del territorio litoraneo risulta quanto mai problematico in Italia per gli enormi vincoli che l'urbanizzazione esistente impone.

Tuttavia se ne ravvisa la necessità, e il solo strumento che consente una utilizzazione ragionevole delle risorse è la formulazione di piani a diversi livelli, al fine di evitare lo spreco di interventi contraddittori.

Possono distinguersi, nell'ambito della pianificazione, i seguenti momenti: pianificazione dell'assetto fisico del territorio, pianificazione dell'assetto urbanistico, pianificazione degli interventi.

I tre momenti possono di fatto non susseguirsi, ma compenetrarsi nel tempo e negli elaborati.

La pianificazione dell'assetto fisico del litorale si proietta su un intervallo di tempo piuttosto lungo (50 - 100 anni). Essa dovrà individuare le linee generali di evoluzione del litorale, gli obiettivi che sono perseguibili a questa scala dei tempi, le condizioni fisiche essenziali al raggiungimento dei suddetti obiettivi.

Con riguardo al solo aspetto idrogeomorfico essa dovrà, ad esempio, prevedere la quantità e la granulometria degli apporti fluviali che si ritengono essenziali alla sopravvivenza del litorale, individuare a grandi linee le cave di prestito degli inerti necessari, definire l'ampiezza della fascia costiera, a cui si applica una normativa urbanistica particolare tenuto conto degli specifici fenomeni che in essa si attuano (erosione, subsidenza, frane a seguito dell'erosione, ingressione marina per alta marea).

Dovranno essere previste valli da pesca, stagni e zone umide in genere, in misura tale da garantire, attraverso una normale riproduzione della fauna ittica, l'equilibrio ecologico del mare antistante. Dovranno essere rispettati limiti ai carichi inquinanti e nutrienti versati in mare, previsti dalle legislazioni vigenti, in modo da assicurare un'adeguata qualità delle acque.

Nella fascia costiera dovranno essere individuate le zone a cui possono esternarsi gli effetti dei fenomeni di erosione, subsidenza, ecc. e l'intensità, che in esse possono raggiungere nell'arco di tempo a cui si applica la pianificazione.

A titolo di esempio, dovranno essere previste le ampiezze di oscillazione, a seguito delle alterne vicende climatiche, di spiagge in media stabili e l'evoluzione della linea di riva prevista per il periodo di piano.

La pianificazione urbanistica si applicherà ad un intervallo di tempo assai più breve (20 - 30 anni).

Sulla scorta delle esperienze attuali, possono darsi alcune generiche indicazioni.

La pianificazione dovrà privilegiare, in genere, lo sviluppo di infrastrutture urbanistiche estese in profondità (perpendicolarmente alla riva) rispetto alla costituzione di un insediamento a schiera (lungo riva), che vincolerebbe estesissimi tratti del litorale.

Le vie principali di comunicazione dovranno essere previste ad alcuni chilometri dalla costa.

Lungo riva dovrà comunque essere prevista una fascia non edificabile di rispetto, in cui potranno essere realizzati, in regime di concessione o simile, solo servizi per la pesca, la navigazione minore, il turismo balneare ecc. aventi tipologia costruttiva conforme alla precarietà del sito.

La sua ampiezza andrà determinata in relazione alla situazione dinamica del paraggio.

Dovranno essere individuate le aree in cui, in condizioni di eccezionale alta marea, saranno possibili invasioni marine oltre la suddetta fascia di rispetto.

Infine, i piani di intervento dovranno prevedere il complesso organico delle difese da attuare, valutando gli apporti fluviali e i trasporti litoranei dei sedimenti, individuando i tratti in cui le difese potranno sottrarre sedimenti al trasporto lungo riva, quelli in cui le difese non dovranno alternare i trasporti, i tratti in cui si evidenziano tendenze erosive generalizzate.

Dovranno essere identificanti orientativamente i quantitativi dei materiali richiesti e le cave di prestito a terra o a mare o lungo costa e più in generale le risorse, che possono rendersi necessarie a seguito degli interventi proposti.

Dovrà risultare anche un costo di massima della difesa ed un costo specifico (rapportato all'unità del bene difeso) per ogni tipo di difesa. Ciò al fine, tra gli altri, di identificare il costo o gli oneri che si debbono attribuire al superamento di vincoli (non essenziali) di gestione della costa come l'introduzione di una singolarità (ad es. un porto) nell'equilibrio fisiologico della costa o la coltivazione di cave.

L'amministrazione competente fissa i criteri generali di piano, li propone agli enti locali, affinché essi si dotino di un piano riflettente le condizioni locali, e valuta le conformità dei suddetti piani.

##### 1.4.1 Vincoli territoriali

La fascia di rispetto, il divieto di nuove costruzioni costituiscono vincoli all'uso arbitrario del territorio.

Questi vincoli sono strumenti del piano idro-geo-marino e debbono essere da questo motivati.

In via transitoria, nel periodo di formulazione ed approvazione del piano, potranno essere imposti vincoli di salvaguardia preventiva al fine di evitare la corsa all'accaparramento del bene che si vede compromesso, o la costruzione di situazioni di fatto che possono rendere più onerosa o impossibile la attuazione del piano.

I vincoli possono essere di carattere specificatamente idro-geo-marino, quando hanno per fine la conservazione o difesa del territorio nei suoi aspetti fisici; fra questi vincoli:

- la fascia di rispetto avente per fine la conservazione della spiaggia naturale;
- la limitazione delle estrazioni di acqua o di altri fluidi dal sottosuolo, per limitare la subsidenza;
- le limitazioni alle estrazioni di inerti dagli alvei, al fine di evitare la erosione degli alvei stessi e la riduzione degli apporti al mare;
- le limitazioni ai carichi inquinanti o nutrienti delle acque di scarico e degli scarichi in genere.

Altri vincoli, che il piano potrà recepire dagli strumenti urbanistici o promuovere, sono quelli che si propongono di correggere tendenze ad un disorganico sviluppo degli insediamenti abitativi o produttivi; ad esempio:

- il vincolo a non realizzare nuove costruzioni in aree congestionate (a concentrazione superiore alla ottima o prevista);
- le limitazioni all'edificabilità (rapporto volumi/superfici, altezza);
- le limitazioni all'uso agricolo del suolo.

Ancora ulteriori vincoli potranno derivare dalle leggi di tutela i carattere ambientale, culturale e panoramico paesaggistico, che si propongono di conservare un bene dall'elevato valore intrinseco:

- parchi e riserve;
- edifici o aree di valore storico e architettonico; o dettate dalle esigenze della difesa militare;
- la fascia dei 300 metri dalla battigia, anche per le coste alte, e dei 150 metri dalle foci dei corsi d'acqua pubblici.

Si vuole qui ricordare l'utile contributo che le praterie di Posidonia forniscono alla stabilizzazione e all'innalzamento del fondale, opponendosi così ai processi erosivi.

Le praterie a Posidonia sono molto diffuse sui fondali italiani.

Tuttavia gli squilibri ambientali provocati dall'inquinamento, dalle discariche e dalle opere a mare tendono a far scomparire irreversibilmente le praterie, privando le spiagge di una protezione naturale in genere assai efficace.

Nei programmi di protezione delle coste si dovrà tener conto di quanto sopra, eliminando o attenuando tutti quei fattori che possano portare alla distribuzione irreparabile di questo importante elemento di stabilità e salvaguardia del litorale.

Tutti questi, ed altri probabilmente, sono strumenti che possono e debbono essere impiegati, purché ne risulti chiara la motivazione e la necessità.

---

## 2. RILIEVI ED INDAGINI

In questo capitolo si fornisce un quadro delle analisi da considerare prima di dare corso alla progettazione esecutiva di interventi sul litorale. Il livello di approfondimento delle indagini dovrà essere commisurato all'importanza dell'intervento stesso.

Fra di esse dovranno essere di volta in volta effettuate quelle che hanno effettiva rilevanza nel quadro generale del problema in esame.

### 2.1 Unità fisiografica

Le zone costiere, anche quando rappresentano unità geologiche uniformi in quanto conseguente ad un unico insieme di fenomeni morfostrutturali legati alla genesi dello zoccolo continentale (piattaforma e scarpata) a cui appartengono, sono caratterizzate, da un punto di vista della dinamica del litorale, da un'associazione di tratti distinti più o meno ampi chiamati unità fisiografiche.

#### 2.1.1 Definizione di unità fisiografica

Una unità fisiografica è caratterizzata dal fatto che i materiali che formano o contribuiscono a fornire la costa presentano movimenti confinati all'interno dell'unità stessa o scambi con l'esterno in misura non influenzata da quanto accade al litorale.

Il significato ingegneristico deriva dal corollario che gli effetti di un'opera costruita sul litorale non si estendono, a breve termine, al di fuori della unità fisiografica di cui essa viene a far parte.

Se ci si limita a considerare la più piccola area che, comprendendo l'opera, abbia la proprietà di cui sopra, l'unità fisiografica viene a coincidere con l'area di influenza degli interventi in essa attuati.

I limiti dell'area possono non risultare fissi nel tempo a seguito di eventi, naturali o artificiali, che modificando la costa, ne alterino la dinamica; ad esempio, forti erosioni o la costruzione di moli.

L'unità fisiografica rappresenta anche l'area alla quale ha significato estendere i rilievi inerenti al movimento delle sabbie. Dovranno inoltre essere indagati gli scambi fra essa e l'ambiente esterno.

L'identificazione dell'area può essere fatta sulla base delle cause dei movimenti: vento, onde, correnti, azione dell'uomo; oppure sulla base degli effetti dei movimenti: erosioni e depositi.

L'identificazione richiede un'individuazione seppure sommaria degli agenti dinamici (prevalenti), a cui sono connessi i movimenti, e una indicazione se questi sono influenzanti dall'evoluzione del litorale. Può ritenersi, in genere, che gli apporti fluviali e la sottrazione di materiali fini verso il largo non siano influenzati dalla suddetta evoluzione.

Se per litorale si intende la spiaggia emersa e sommersa per un'estensione tale da contenere i movimenti trasversali, l'unità fisiografica è costituita in genere dal tratto di litorale compreso fra due sezioni, entro cui il trasporto longitudinale netto è nullo.

Foci di fiumi o torrenti non interrompono l'unità fisiografica, anche se il verso del trasporto litoraneo è discorde sui due lati, in quanto modifiche anche piccole su un lato della foce inducono una diversa ripartizione degli apporti fluviali e pertanto esercitano influenza anche sul lato opposto.

Ai fini dello studio del comportamento idraulico di un litorale, possono considerarsi unità fisiografiche anche quelle individuabili su brevi intervalli di tempo, ad esempio una mareggiata o una stagione; ma l'uso corrente del termine in ambito progettuale si riferisce ad intervalli di tempo comparabili con la vita delle opere, mentre in ambito geomorfologico di riferisce ad intervalli molto più lunghi.

Al crescere dell'intervallo temporale di osservazione, unità fisiografiche distinte possono fondersi, perché ad esempio si realizza una mareggiata di particolare violenza, che comporta per i sedimenti movimenti prima non realizzati.

I limiti di unità fisiografiche di vasta scala sono determinati dai moti di deriva o trasporti netti quando questi sono significanti, avendo i moti alterni effetto solo a scala inferiore.

#### 2.1.2 Identificazione dell'unità fisiografica in base alla morfologia della linea di riva

Essa si effettua in genere su base cartografica o su rilievi aerofotogrammetrici, in quanto la linea di riva è in essi facilmente identificabile.

Tale identificazione si fonda sulla osservazione di alcune forme indicanti il verso del trasporto litoraneo, di cui le principali sono:

- accumuli-erosioni a seguito della costruzione di opere intercettanti il trasporto litoraneo;
- dissimmetrie nelle spiagge concorrenti ad un capo roccioso;
- deviazione delle foci fluviali nel verso della deriva litoranea;
- forme caratteristiche delle due estremità dell'asse del trasporto;
- cuspidi focali o falesie nelle zone di divergenza dei trasporti litoranei;
- cordoni uncinati (flèches) o spiagge concave, in cui ha termine o converge il trasporto litoraneo;
- erosioni o protendimenti indicativi rispettivamente di divergenza o convergenza dei trasporti litoranei, ove si intenda per divergenza il crescere del trasporto nel verso del trasporto stesso.

#### 2.1.3 Identificazione in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche

Essa viene eseguita attraverso il prelievo di campioni del fondo mobile sui quali si effettuano analisi composizionali e tessiturali.

I campioni dovranno essere prelevati fra il materiale mobile o residente in punti diversi e ben identificati. È opportuno che il punto di prelievo venga ubicato con sufficiente precisione, particolarmente in rapporto alle forme caratteristiche della spiaggia (berma, battigia, truogoli, barre, .....), fornendo una planimetria con indicazioni dei suddetti punti e forme. I prelievi di materiale mobile dovranno essere eseguiti nei primi (3-5) cm dalla superficie del fondale o della spiaggia.

Il prelievo di campioni potrà permettere di indagare sulla evoluzione temporale della sedimentazione e di caratterizzare i sedimenti che verranno rilasciati in caso di erosione.

La composizione petrografia dei sedimenti, comparata con quella delle possibili fonti, potrà individuare fra queste quella da cui effettivamente il sedimento deriva ed evidenziare pertanto gli spostamenti subiti.

Al trasporto è associata una usura e selezione dei grani e dei ciottoli, che ne altera lungo l'asse di trasporto dimensioni e forma.

L'usura agisce frantumando meccanicamente o disaggregando le rocce e particolarmente la parte più esposta di queste, mentre la selezione è associata al variare della capacità di trasporto al variare delle dimensioni dei sedimenti.

la selezione è trasversale e longitudinale; quella trasversale, che in genere avviene con spostamenti di massa reversibili e piccoli o nulli, tende a portare ogni particella ad una profondità in cui essa si trova in equilibrio statistico; quella longitudinale è invece associata sempre ad un consistente trasporto di massa, ed, essendo la capacità di trasporto in proporzione inversa alla dimensione dei sedimenti, la selezione avviene nel senso che i sedimenti più fini sono soggetti ad un maggiore spostamento rispetto ai più grossolani, venendo erosi più facilmente e depositati più lentamente.

---

La selezione trasversale avviene concentrando in genere verso riva i sedimenti più grossolani e portando al largo i più fini, ma, per il variare dell'agitazione ondosa e per i cicli deposizionali associati alle barre, non sono infrequenti inversioni locali rispetto alla suddetta tendenza. Per i grandi spostamenti longitudinali in assenza di apporti distribuiti lungo l'asse, la direzione del trasporto è caratterizzata dal diminuire delle dimensioni dei componenti dei sedimenti e dal crescere della loro rotondità. Le zone in erosione manifestano una più accentuata variazione trasversale nelle dimensioni dei sedimenti. I materiali pesanti si comportano come la frazione più grossolana dei sedimenti, forse accentuando per il maggior peso specifico la selezione per trasporto.

#### 2.1.4 Identificazione in base al regime delle onde e delle correnti

Questa linea di ricerca tende a caratterizzare i regimi delle onde e delle correnti efficaci per il trasporto costiero. Vanno in particolare esaminate le correnti lungo riva, secondariamente le correnti di ritorno e il getto di risalita.

Tale regime può essere valutato:

- 1.sulla base di rilevamenti dello stato del mare, fornendo ove possibile, unitamente ai dati rilevati, anche le descrizioni della strumentazione utilizzata, con relativa calibrazione, e della tecnica di elaborazione; quando si utilizzano dati rilevati da ondometri non direzionali, andrà descritto il metodo seguito per attribuire la direzione di provenienza alle onde rilevate;
- 2.sulla base di dati meteorologici elaborati secondo valide metodologie (il progetto dovrebbe contenere, unitamente alle conclusioni raggiunte, i dati utilizzati per l'elaborazione e le quote caratteristiche delle stazioni di misura);
- 3.sulla base di sistematici rilevamenti delle velocità delle correnti, utilizzando appositi indicatori o traccianti, di cui è opportuno venga data precisa indicazione metodologica e di levata dei dati;
- 4.sulla base di individuazioni e rilevamenti sul fondale di morfotipi e di strutture connesse con il regime correntizio.

Il regime ondoso e correntizio dovrà essere convertito in trasporti litoranei associati secondo metodologie valide, di cui si ritiene vadano fornite note esplicative.

Dal regime dei trasporti potrà calcolarsi il trasporto netto. Valendosi limitare al solo verso del trasporto netto, si potrà valutare un valore medio dell'agente del trasporto esaminato, opportunamente pesato per tener conto della sensibilità del trasporto all'agente stesso.

#### 2.2. Rilievo dell'assetto attuale e della tendenza evolutiva

Le indagini di cui al paragrafo 2.1 permettono di evidenziare su di un litorale i limiti di un'unità fisiografica e di stabilirne le linee essenziali di tendenza evolutiva.

Sulla base dell'evoluzione del litorale dedotta a partire da una indagine storica associata all'interpretazione degli effetti provocati da eventi o interventi operati sul litorale stesso, dovrà formularsi una previsione sull'evoluzione futura della spiaggia. A tal fine andranno svolte specifiche indagini sulla linea di riva, sulla topografia della spiaggia emersa e sommersa, nonché sui sedimenti di cui è costituita, così come di seguito descritte.

##### 2.2.1 Inquadramento del paraggio e definizione del settore di traversia

Rappresenta il primo passo dell'indagine volta ad individuare la presenza di tendenze evolutive di un tratto di litorale ed è mirata alla raccolta delle informazioni di base necessarie all'analisi.

A tale scopo, sembra indispensabile la raccolta di una grande e diversificata mole di dati, estesa ad un numero di anni sufficientemente lungo, riguardanti i parametri ambientali e fisici (regime dei venti, regime del moto ondoso, apporti solidi fluviali, evoluzione storica della linea di costa), e le eventuali interferenze con il regime litoraneo (opere fluviali, opere di difesa costiera, porti).

Al fine di individuare il clima ondoso del paraggio è necessaria, preliminarmente, la determinazione del "settore di traversia" e delle "aree di formazione delle onde" (fetches) ricadenti nel suddetto settore.

##### 2.2.2 Linea di riva

Lo studio per l'individuazione delle linee di riva dovrà prendere in considerazione i rilievi cartografici ed aerofotografici esistenti ed eventualmente completarli con un'indagine di campagna.

L'indagine inizierà con la sistemazione od individuazione di opportuni caposaldi (quotati) lungo il litorale, di cui andranno fornite le monografie, in modo che essi possano essere utilizzati nel tempo per effettuare rilevamenti periodici della linea di riva.

Le relative rappresentazioni cartografiche, per poter essere paragonate tra loro, vanno riferite al medio mare.

##### 2.2.3 Topografia della spiaggia emersa

La topografia della spiaggia emersa rappresenta un altro dato fondamentale per lo studio della tendenza evolutiva in atto e può essere individuato o con il metodo della levata topografica o fotografica (con tracciamento di isoipse ad equidistanza non superiore a 50 cm) o con il metodo del rilevamento dei profili trasversali alla linea di riva ad interasse idoneo a fornire una corretta rappresentazione del profilo.

Per studi di vasta scala l'interasse potrà scegliersi dell'ordine del chilometro, mentre per studi più localizzati esso andrà congruamente ridotto.

Il tracciamento dei profili è opportuno che parta da un caposaldo quotato, di cui va fornita la relativa monografia per consentire la possibilità di ripetizione e di raffronto.

Si raccomanda che sul profilo, realizzato trasversalmente alla linea di riva a partire dal caposaldo, venga riportata anche la sua direzione azimutale, e siano evidenziate tutte le irregolarità o rotture di pendenza significative.

Al rilievo topografico, eseguito col metodo delle isoipse o con quello delle sezioni trasversali alla linea di riva, è spesso opportuno correlare le caratteristiche tessiturali dei sedimenti secondo le indicazioni riportate al paragrafo 2.2.5.

Il limite superiore della spiaggia emersa è fissato ordinariamente dalla massima estensione dell'azione dell'onda.



#### 2.2.4 Topografia della spiaggia sommersa

Fra gli obiettivi dell'indagine topobatimetrica è essenziale quello di reperire informazioni sulla evoluzione della morfologia costiera, sia nello spazio che nel tempo, di evidenziare le eventuali modificazioni indotte dalle opere e di fornire i dati necessari all'impiego dei modelli matematici.

L'indagine, come è noto, consiste nel rilievo topografico della spiaggia emersa e sommersa (spiaggia attiva) mediante l'esecuzione di una serie di rilevamenti a maglia, con allineamenti trasversali e paralleli alla linea di riva.

Il passo della maglia verrà scelto di dimensioni piuttosto ampie, lì dove le integrazioni delle onde con i fondali sono minori, mentre verrà infittito nella zona in cui i fondali sono più bassi e dove sono presenti particolari situazioni evolutive.

La topografia della spiaggia sommersa andrà rilevata per sezioni trasversali alla linea di riva possibilmente con uno scandaglio di accertata attendibilità.

Le sezioni andranno opportunamente raccordate da alcuni profili di controllo condotti parallelamente alla riva.

Dovrà essere sempre ed esplicitamente indicato il riferimento altimetrico assunto per la valutazione delle profondità.

Quando le profondità siano misurate rispetto al livello medio mare, dovrà essere indicata la procedura seguita per la correzione di marea.

Per consentire la ripetibilità delle rilevazioni, le coordinate dei punti di scandaglio devono essere riferite a caposaldi fissi; andrà descritto anche il tracciamento dei dati batimetrici, di cui vanno fornite dietro richiesta le strisciate originali.

I profili della spiaggia sommersa andranno correlati con le caratteristiche tessiturali dei sedimenti secondo le indicazioni svolte ai paragrafi 2.2.5 e 2.3.4.

#### 2.2.5 Sedimenti

I sedimenti che costituiscono la spiaggia emersa e sommersa vanno studiati nelle loro caratteristiche tessiturali cioè dipendenti dalla dinamica litoranea.

I campioni dei sedimenti, posizionati come indicato al paragrafo 2.1.3, andranno prelevati preferibilmente in corrispondenza di variazioni morfologiche o tessiturali così da risultare rappresentativi della zona campionata.

È consigliabile che le analisi granulometriche portino ad individuare i limiti dimensionali stabiliti da Wentworth.

Le dimensioni potranno essere espresse in mm, oppure, più opportunamente in  $\phi$  (dove  $\phi = -\log$  in base 2 del diametro espresso in mm.).

Gli intervalli delle classi dimensionali non dovranno superare 1  $\phi$  se il sedimento è ghiaioso o sabbioso, 1/2  $\phi$  se fangoso.

Le analisi granulometriche potranno essere fatte con strumentazioni diverse, purché di accertata attendibilità, in relazione al tipo di sedimento:

-ghiaie (setacci, calibro, sistemi fotografici, ecc.);

-sabbie (setacci, bilancia di sedimentazione, sedimentometri laser);

-fanghi (sedimentometri a raggi laser o pipetta, coulter counter, ecc.).

si dovrà naturalmente tener presente che i dati ottenuti con strumenti diversi non sono sempre direttamente confrontabili tra loro.

È opportuno che le analisi vengano condotte in modo da ricavare tutti quegli indici e parametri granulometrici, in primo luogo il diametro medio, che forniscono elementi per determinare la dinamica ed il bilancio dei sedimenti.

Si consiglia di fornire, almeno per le sabbie, oltre alla curva granulometria, i diametri corrispondenti alle seguenti percentuali: 5, 16, 25, 50, 75, 84, 95.

Insieme ai dati granulometri, vanno determinati anche il peso specifico medio e la velocità di sedimentazione.

Altre indagini tessiturali, come la morfometria dei ciottoli, posso dare interessanti indicazioni sulla dinamica costiera.

Assai utili per il bilancio dei sedimenti sono anche le indagini sul consumo per abrasione dei grani sabbiosi e dei ciottoli. I risultati di tali analisi possono essere correlati con la granulometria, la composizione del sedimento, le onde e la morfologia della battigia e della spiaggia sommersa.

Sulla base dei risultati ottenuti è opportuno vengano forniti gli elaborati cartografici atti a rappresentare le caratteristiche tessiturali dei sedimenti del fondo mobile, ed in modo particolare la loro granulometria, l'andamento dei parametri e degli indici sedimentologici, la distribuzione delle frazioni bioclastiche, limosa e argillosa.

Dovranno essere accuratamente descritte in allegato o rinviate ad una bibliografia descrittiva le tecniche analitiche e i metodi di elaborazione impiegati.

#### 2.2.6 Subsidenza ed eustatismo

Significativa, ai fini della programmazione delle opere di difesa costiera, è la valutazione della tendenza evolutiva del territorio da proteggere entro i limiti delle possibili modificazioni positive o negative delle quote del livello del mare o del terreno.

Le modificazioni delle quote del mare sono legate al fenomeno dell'eustatismo (fenomeno generalmente a lunga scala temporale) e a fenomeni consegnati a maree astronomiche e meteorologiche (fenomeni generalmente a breve scala temporale).

Le modificazioni delle quote del terreno sono legate ai fenomeni di subsidenza naturale, di subsidenza antropica e di bradisismo (fenomeni sia a lunga che a breve scala temporale).

Per acquisire dati e notizie, si può procedere nel modo seguente:

1. Valutare la possibilità che esista una sensibile subsidenza in base ai seguenti elementi:

a) natura spiccatamente alluvionale della costa in esame;

b) presenza di forme cuspidate o lobate di origine deltizia;

c) esistenza di opere di bonifica idraulica lungo la costa o nell'immediato entroterra;

d) esistenza di sensibili ed estesi emungimenti idrici dalle falde sotterranee, anche per estrazioni di idrocarburi a terra o nella piattaforma marina antistante;

e) area ad alto rischio sismico.

Gli elementi elencati possono essere appurati mediante informazioni assunte sul luogo o desumibili da documentazione cartografia.

2. Verificare l'ipotesi di subsidenza, acquisendo dati quantitativi:

a) di stazioni mareografiche ubicate nell'area o molto vicine ad essa;

b) di livellazioni altimetriche e batimetriche di precisione ripetute sui medesimi caposaldi, eseguite con metodi per quanto possibili omogenei e "appoggiate" a caposaldi di riferimento, per i quali esiste un buon grado di certezza che siano stabili;

c) dalla letteratura specialistica sull'area.

In aree subsidenti, le strutture di progetto devono avere caratteristiche tali da consentire la sopra-elevazione o l'innalzamento o la "ricarica" dopo un certo numero di anni.

## 2.2.7 Maree astronomiche e meteorologiche

Le maree rappresentano oscillazioni del livello marino con periodi approssimativamente compresi tra un'ora e un anno.

Esse si distinguono in maree astronomiche, dovute all'attrazione gravitazionale degli astri (luna e sole) e maree meteorologiche, dovute a disuniformità della pressione atmosferica e all'azione del vento.

Il sollevamento del pelo libero medio, che si ha nella zona dei frangenti, di cui si tratta al paragrafo 2.3 (innalzamento da onda), costituisce un fenomeno localizzato alla stretta fascia litoranea e non si fa qui riferimento ad esso parlando di maree.

Nei mari italiani le maree non costituiscono in genere un fenomeno dinamico rilevante, se si eccettua l'Adriatico settentrionale, dove le maree sono esaltate dalla geometria del particolare bacino marino.

La prevalente importanza ingegneristica delle maree consiste, comunque, nelle variazioni indotte sulla elevazione del pelo libero medio rispetto ai fondali e alle opere civili.

La marea è rilevata mediante mareografi; il tracciato è analizzato in modo da separare le maree astronomiche, aventi periodicità ben definite e note a priori attraverso le analisi astronomiche, dalle maree meteorologiche che non hanno questa proprietà.

La marea astronomica, una volta che l'ampiezza e il ritardo rispetto alla causa perturbatrice delle diverse componenti di essa siano determinati mediante analisi armonica, può essere prevista per il futuro con grande esattezza.

Si potrà fare riferimento alla ricca bibliografia sull'argomento e alle previsioni di marea per le principali località costiere edite annualmente dal Servizio Idrografico della Marina.

La marea meteorologica si ottiene sperimentalmente per differenza fra la marea reale e la marea astronomica, dedotta la tendenza eventuale a lunghissimo termine che è dovuta a subsidenza e/o eustatismo.

Essa si compone di variazioni stagionali ed eventi di più breve durata, che si manifestano in stretta relazione con le perturbazioni meteorologiche.

La previsione o ricostruzione della marea meteorologica può essere fatta in base alla dinamica di generazione e costituisce un problema di rilevante complessità.

Quando nel paraggio in esame non sia presente un mareografo, si dovrà a seconda della precisione richiesta nella determinazione dei livelli, o:

i. installare un'asta mareografica e collegarla al livello medio mare tramite una livellazione (di precisione) fino al più vicino punto geodetico, o collegarla tramite il confronto dei livelli medi osservati per un medesimo intervallo di tempo sufficientemente lungo (30 gg. o più al crescere della distanza) sull'asta in oggetto e ai mareografi più vicini, oppure

ii. interpolare fra le misure dei mareografi più vicini (tendono conto che la marea è un'onda che trasla lungo costa); questa seconda procedura non pare consigliabile se il ritardo fra i mareografi supera 2-3 ore.

L'analisi della marea nel paraggio dovrà comunque arrivare a determinare il livello medio mare e il livello medio delle alte maree e basse maree. Per strutture più importanti e per opere che non debbano essere tracimate, si dovrà determinare il livello massimo raggiunto con un tempo di ritorno comparabile con la vita presunta della struttura, sulla base di una serie storica di lunghezza non molto inferiore.

Per opere in Alto Adriatico, il fenomeno della "acqua alta", che può superare ivi i due metri, dovrà essere esaminato con particolare attenzione.

## 2.2.8 Regime dei venti

L'importanza del vento per quanto riguarda il regime dei litorali è dovuta sia ai suoi effetti diretti che a quelli indiretti.

Gli effetti diretti consistono principalmente nella deflazione, cioè nel sollevamento ed asportazione delle sabbie che costituiscono le spiagge emerse, mentre gli effetti indiretti sono quelli della generazione del moto ondoso, di correnti di deriva e dell'innalzamento del livello marino per effetto di venti che spirano da mare aperto.

Il regime dei venti in una data località costiera può essere definito mediante distribuzioni di frequenza per settori direzionali e campi di velocità, con riferimento a periodi di osservazione possibilmente pluriennali (20 anni).

Possono essere utili anche rappresentazioni mediante diagrammi polari di distribuzione della frequenza, del vento filato (velocità per frequenza) o della prevalenza (velocità elevata al quadrato per frequenza).

Come dati di base per la definizione del regime del vento vanno assunti quelli forniti da stazioni anemografiche presenti nella zona in esame o in zone limitrofe, previo l'accertamento della significatività delle misure in base all'ubicazione degli anemometri.

Per la ricostruzione del moto ondoso mediante metodi indiretti è necessaria invece una caratterizzazione mediante successioni temporali di velocità e direzione del vento.

Per quanto riguarda i dati di vento necessari per la valutazione indiretta delle caratteristiche del moto ondoso, è da tener presente che i valori richiesti sono quelli del vento sul mare e non quelli rilevati a terra; quando non si disponga di dati di vento registrati direttamente sul mare (anemografi installati in piattaforme artificiali, isole, navi) sarà opportuno procedere alla correzione dei valori misurati a terra mediante opportuni fattori correttivi.

Nell'utilizzazione degli stessi dati, va tenuta presente sia la quota di rilevamento della velocità orizzontale del vento, (in quanto tali dati devono essere ragguagliati alla quota anemometrica standard), sia la differenza di temperatura tra acqua di mare e vento (in quanto tale differenza può condizionare il trasferimento di energia tra vento e mare).

## 2.2.9 Regime del moto ondoso

L'esposizione al moto ondoso assume un ruolo certamente primario sulla dinamica dei sedimenti costieri e, quindi, sulla evoluzione di un litorale.

L'azione delle onde, infatti, si esplica nella capacità di sollevare, selezionare, trasportare e disperdere i sedimenti di fondo.

Per poter individuare e quantificare la dinamica dei processi fisici in gioco risulta, quindi, essenziale ricostruire il clima ondoso del paraggio.

Il regime del moto ondoso può essere definito mediante distribuzione di frequenza per settori direzionali e campi di altezza d'onda e periodo.

Come valori caratteristici delle altezze e dei periodi si possono prendere quelli corrispondenti o all'onda media o a quella significativa, la cui altezza è pari all'altezza media del terzo delle onde più alte e il cui periodo è il periodo medio di tali onde.

Nelle determinazioni dei valori suddetti dalle registrazioni è frequente il ricorso al metodo cosiddetto "dell'attraversamento dello zero", consistente nel considerare come onda quanto compreso fra due attraversamenti di zero nello stesso verso, essendo "zero" il livello medio della registrazione.

Per quanto riguarda singoli eventi di particolare interesse, una caratterizzazione più completa può essere ottenuta mediante rappresentazione spettrale.

I dati di base per la definizione del regime del moto ondoso possono essere ottenuti da rilievi diretti, o in assenza, mediante osservazioni visive o stime indirette che forniscono i dati significativi sui flutti, partendo dagli eventi meteorologici.

Il ricorso a queste ultime è spesso inevitabile per avere informazioni sulla direzione di provenienza del moto ondoso, nonché informazioni a lungo termine sugli eventi estremi, poiché gli strumenti di uso corrente non rilevano generalmente la direzione di provenienza delle onde e la durata dell'intervallo di tempo coperto dalle registrazioni è attualmente troppo breve, in genere, per fornire informazioni statistiche attendibili.

Facendo uso di valutazioni indirette in casi in cui siano disponibili anche misure dirette, sia pure per intervalli di tempo limitati, si dovrà verificare la congruenza delle due fonti di informazione e calibrare opportunamente il procedimento di ricostruzione indiretto adottato.

---

Per quanto riguarda le valutazioni indirette del moto ondoso, esse possono essere effettuate sulla base della conoscenza del vento spirante sul mare adottando metodi previsionali di uso corrente, come il metodo di Sverdrup, Munk e Bretschneider o altri proposti in tempi più recenti (vedi ad esempio SPM 1984).

Si ricorda che indagini relative agli eventi estremi assumono in genere scarsa rilevanza per il dimensionamento di opere su bassi fondali come le opere di difesa costiera, quando l'onda si presenta frangente con frequenza sensibile.

In ogni caso, la conoscenza del clima ondoso sulle basse profondità riferito ai diversi livelli medi del mare riveste una fondamentale importanza nello studio della dinamica litoranea.

Sia le valutazioni indirette che, in generale, le misure dirette forniscono le caratteristiche del moto ondoso al largo.

Per la valutazione delle condizioni di incidenza nelle zone di interesse, è necessario trasportare i dati stessi sotto costa mediante analisi dei fenomeni associati alla propagazione del moto ondoso in acque basse (shoaling, rifrazione, fenomeni dissipativi, frangimento), per individuare il clima ondoso anche in tali situazioni.

#### 2.2.10 Regime delle correnti

Le correnti possono essere schematicamente suddivise in:

- correnti da moto ondoso
- correnti di marea
- correnti generate dal vento
- correnti di densità.

Queste ultime sono raramente significative nel Mediterraneo per ciò che riguarda le opere costiere.

Le correnti di marea hanno importanza nei paraggi interessati da forti escursioni di marea e, anche per modeste escursioni, quando l'effetto dell'onda di lungo periodo è accentuata da particolari condizioni geometriche dei fondali e delle coste.

Ciò si verifica nel caso di fondali a dolcissima acclività, nel caso di particolari topografie del fondo e, più frequentemente, nel caso di bocche di accesso a lagune o a specchi portuali interni di considerevole estensione.

Le velocità delle correnti di marea variano con continuità durante i cicli di marea; esse possono presentare valori opposti durante la giornata.

Ad esse sono generalmente associate velocità residue conseguenti agli spostamenti orizzontali netti delle masse d'acqua alla fine dei predetti cicli.

Tali velocità residue sono in generale modeste, ciò non toglie che esse possano essere importanti, data la loro persistenza, nello studio relativo alla dispersione a mare di inquinanti e nutrienti, specialmente su bassi fondali o in prossimità delle coste dove esse possono risultare esaltate.

Le correnti da vento sono generate dalle tensioni tangenziali esercitate dal vento sugli strati superficiali del mare; il movimento di massa si propaga agli strati sottostanti principalmente per effetto di mescolamento turbolento.

Nel mare aperto il ritorno di massa può realizzarsi negli strati più profondi; sulle basse profondità possono invece instaurarsi trascinamenti globali di massa con conseguenti innalzamenti del livello medio nella zona sottocosta e flussi di ritorno localizzati.

Per tale motivo, le correnti da vento devono essere accuratamente studiate soprattutto nei bracci di mare chiusi, dove l'innalzamento del livello medio e il conseguente abbassamento nella zona prossima all'imboccatura possono significativamente influenzare l'evoluzione del moto ondoso e determinare l'instaurazione di oscillazioni stazionarie longitudinali.

Le correnti da moto ondoso sono decisamente le più importanti per quanto riguarda il regime dei litorali.

Esse interessano sia la zona dei frangenti sia la fascia esterna.

In considerazione dell'importanza che le correnti da moto ondoso rivestono nella dinamica della spiaggia e sul trasporto dei sedimenti, è necessario che il relativo regime venga accuratamente studiato ed individuato per acquisire gli elementi indispensabili per la progettazione di opere costiere.

La misura diretta delle correnti da moto ondoso è operazione che presenta non poche difficoltà.

In linea delle correnti messo in evidenza dalla torbidità, da oggetti galleggianti di massima si individua preliminarmente, mediante osservazione da punti possibilmente panoramici, il generale sistema direzionale appositamente lanciati, dalla configurazione delle linee di frangimento e da altre caratteristiche morfologiche della linea di riva.

Successivamente, determinate le posizioni più interessanti, si effettuano vere e proprie misure di corrente, mediante correntometri per la zona esterna alla fascia dei frangenti, o mediante lancio di un congruo numero di galleggianti o traccianti per la zona interna.

#### 2.2.11 Variazioni stagionali ed eventi eccezionali

Tutti i fenomeni meteorologici e di conseguenza il moto ondoso e le evoluzioni di spiaggia evidenziano delle periodicità stagionali.

Nell'effettuare confronti fra situazioni rilevate in tempi diversi non si potrà in genere, a meno che l'intervallo di tempo fra di essi superi circa 20 anni, prescindere da queste fluttuazioni.

Quando esistano rilievi sufficiente sarà sufficiente confrontare rilievi fatti a distanza di anni interi; in caso contrario, sarà necessario individuare la componente ciclica stagionale, e separare nel confronto la differenza dovuta alla ciclicità dalla tendenza evolutiva.

Ancora, alcuni eventi di eccezionale intensità possono produrre effetti, che non vengono riassorbiti prima di uno o due anni.

Potranno definirsi eccezionali gli eventi che abbiano un tempo di ritorno di 5 anni o più.

In ogni caso i rilievi dovranno essere messi in correlazione con il ciclo stagionale e con gli eventi di intensità particolare (tempo di ritorno superiore a 1 anno).

#### 2.2.12 Caratteri socio economici dell'area costiera e valutazioni delle infrastrutture

Appare necessario che qualunque piano di interventi a difesa della costa venga concepito e progettato tenendo in considerazione un complesso di fattori inerenti le attività umane che hanno luogo sul territorio costiero; fattori che qui brevemente vengono indicati come "socioeconomici", tra i quali vanno soprattutto considerati l'uso, presente e previsto, del territorio interessato dagli interventi ed il valore economico di delle infrastrutture che a quell'uso sono necessariamente connesse.

Nel caso di interventi singoli, che non si inseriscono in un piano o in un progetto di più vaste dimensioni che li giustifichi, vanno comunque considerati i fattori sopraindicati, potendosi limitare però l'analisi a quanto necessario per determinare, con approssimazione proporzionata alla importanza dell'intervento, il valore dei beni che possono essere interessati dall'intervento stesso.

Fra le infrastrutture più frequenti, possono essere identificati i seguenti tipi:

- linee di difesa della costa dalla erosione, dalla azione diretta delle onde e dalla ingressione marina;
- spiagge ad uso turistico balneare;
- infrastrutture per la pesca, la navigazione minore e da diporto.

La valutazione dell'uso futuro dovrà essere fatta prendendo in considerazione: i piani urbanistici esistenti, le tendenze rilevabili ed i livelli di saturazione prevedibili.



Si osserva che i piani urbanistici rappresentano elaborati progettuali delineanti norme sull'uso del territorio predisposte ad una certa data; la presenza di questi, anche recenti, non dispensa dal rilievo dell'uso effettivo valore economico degli oggetti (beni immobili infrastrutture, ecc) potrà essere stimato:

1) sulla base del costo di costruzione rivalutato, per beni pubblici di costruzione recente (in via di ammortamento).

2) sulla base del valore commerciale, quale rilevabile per es. dalla registrazione di compravendite, o sulla base del reddito catastale, per i beni privati.

3) sulla base del reddito netto annuo delle attività che questi (edifici, aree, infrastrutture) contribuiscono a produrre, per quegli oggetti a cui non possono essere applicati i procedimenti precedenti e per quella parte del reddito che ad essi può pensarsi ascritta.

Esistono, inoltre, valori non traducibili con alcuna oggettività in termini economici, che converrà evidenziare, senza fornirne il corrispettivo.

Mentre il reddito derivante dalle attività, che hanno luogo sulla spiaggia, può essere totalmente ascritto alla spiaggia stessa, restano forti dubbi sulla quota parte del reddito, ad essa ascrivibile, derivante dalla attività alberghiera e commerciale dell'area costiera.

Per spiagge di località balneari, in mancanza di una determinazione diretta, che pare altresì opportuna in casi di importanza più che modesta, potrà assumersi orientativamente in 1/3 la frazione suddetta.

Una spiaggia protettiva ha la duplice funzione di spiaggia e di linea di difesa, e pertanto dovranno sommarsi le due valutazioni.

L'arretramento della riva non comporta necessariamente la perdita della spiaggia come forma, perdita che invece si produce generalmente quando si costruisca su una spiaggia in erosione una difesa radente; in tal caso al valore della difesa andrà sottratto in misura adeguata il valore della spiaggia.

Similmente, per i porti ad uso turistico, potrà aggiungersi, ai redditi derivanti dalle attività portuali, una parte (1/3 circa) della frazione del reddito turistico ascrivibile agli utenti del porto (utenti porto/presenze alberghiere nello stesso periodo di tempo).

Con reddito si è sempre inteso il reddito netto; esso potrà essere determinato dall'apporto monetario lordo del turismo, più facilmente determinabile (somma per le diverse categorie identificabili dei prodotti presenze per spesa giornaliera media procapite), attraverso un coefficiente di redditività determinato per campione.

Nel caso di porti impiegati anche per la pesca e la navigazione minore, dovrà essere valutato anche il reddito derivante da questa attività.

Pare infine opportuno che i beni ed i valori non monetizzabili vengano elencati espressamente in aggiunta a quelli monetizzabili per:

- facilitare la valutazione della convenienza a realizzare l'intervento,

- evidenziare il formarsi nel tempo, attraverso la capitalizzazione delle somme spese per la difesa di questi beni o valori, di una valutazione degli stessi, che li sottragga in qualche misura agli umori del momento.

Nei casi di opere di difesa, spiagge e porti, dovrà inoltre indicarsi il valore specifico assunto per la infrastruttura, essendo questo il rapporto fra il valore e la lunghezza della difesa, la superficie della spiaggia e del porto.

Infine, anche se non è in genere facile quantificarne le conseguenze, dovrà essere posta attenzione agli effetti che l'aspetto estetico dell'ambiente marino e la qualità delle acque possono avere sul turismo e le altre attività dell'area costiera.

### 2.3. Analisi dei processi costieri

Il tipo di problema costiero che si deve esaminare condiziona la scelta del tipo di indagine, scelta dei dati già disponibili, od eventualmente reperibili, adatti ad essere utilizzati.

È necessario inquadrare lo studio del problema in una visione ampia che consideri gli aspetti principali che intervengono alla scala spaziale delle unità fisiografiche, i quali, da un lato possono condizionare la risoluzione del problema stesso, dall'altro possono essere a loro volta influenzati dall'intervento locale che si intende effettuare.

L'indagine deve iniziare con l'interpretazione della dinamica della linea di riva dalla quale ricavare, a diverse scale temporali, gli avanzamenti o arretramenti della predetta linea (con corrispondenti processi erosivi o accrescitivi) e la direzione del trasporto litoraneo netto.

Particolarmente utile a questo scopo è l'esame comparativo di rilievi cartografici e di fotografie aeree, eseguiti in tempi successivi; tale esame può fornire infatti informazioni sia sull'evoluzione globale della linea di riva sia sui processi erosivi o accrescitivi locali dovuti alle opere litoranee via via realizzate.

L'indagine deve quindi proseguire analizzando i dati che possono condurre ad una valutazione quantitativa delle "voci" (attive e passive) del bilancio dei sedimenti, riferite ad un volume di controllo opportunamente individuato nella zona litoranea considerata.

Qui di seguito si ricordano le voci che generalmente intervengono nel bilancio:

- asporti ed apporti dovuti al trasporto litoraneo longitudinale e a quello trasversale;

- apporti fluviali;

- azione eolica;

- altri apporti ed asporti specifici

#### 2.3.1 Trasporto litoraneo

Il trasporto litoraneo longitudinale e trasversale è conseguenza dell'azione del moto ondoso ed è in gran parte localizzato nella zona dei frangenti.

Esso è principalmente correlato agli attacchi obliqui del moto ondoso rispetto alle batimetriche sottocosta, ma può aversi anche per attacchi frontali quando le altezze d'onda lungo i fronti risultano modulate.

La valutazione quantitativa del trasporto longitudinale, sia al fondo (generalmente il più importante) sia in sospensione, può essere effettuato a partire da modelli teorici ed empirici riportati nella letteratura specializzata sull'argomento e in manuali di largo impiego.

Tali modelli richiedono, per la loro pratica utilizzazione, la conoscenza del clima ondoso locale e, in generale, delle caratteristiche sedimentologiche del materiale di fondo.

Per assicurare la loro adattabilità alla situazione locale sotto osservazione, può talora essere necessario ricorrere a tarature dirette, monitoraggio d'opere opportunamente predisposte allo scopo.

La valutazione quantitativa del predetto trasporto può essere effettuato anche a partire da stima numerica su zone limitrofe e trasferite alla zona in esame dopo averle esaminate e quindi adeguate alla luce di eventuali situazioni specifiche locali.

L'adeguamento richiede una sicura sensibilità ingegneristica nel valutare come tali situazioni locali possano modificare l'entità del trasporto.

Il profilo trasversale della fascia di spiaggia attiva si differenzia nel tempo in relazione alle modifiche stagionali del clima ondoso locale; esso può essere individuato in base a relazioni di uso ormai comune.

Il trasporto trasversale, sia al fondo sia in sospensione, oltre ad essere dovuto all'azione diretta del moto ondoso (trasporto "onshore-offshore"), può anche essere conseguenza della presenza di correnti di solcatura ("rip currents", correnti a getto verso il largo) alimentate dal trasporto longitudinale.

La valutazione quantitativa del trasporto trasversale netto risulta di difficile precisazione diretta.

Tale valutazione può essere effettuata per via indiretta, quando sia nota la distribuzione longitudinale del trasporto solido litoraneo, il comportamento nel tempo della linea di battigia e gli eventuali apporti e asporti.

### 2.3.2 Apporti fluviali

Gli apporti fluviali costituiscono la voce attiva generalmente più importante nei bilanci sedimentari di tratti di costa estesi. La frazione più grossolana (sabbie e ciottoli) si deposita nell'area di foce ed alimenta il trasporto litoraneo.

La frazione fine (limi e argille) si disperde al largo, depositandosi di regola sulla piattaforma continentale, e, pur essendo in genere la frazione preponderante nel totale dei sedimenti trasportati, ha sulla spiaggia effetto di non grande importanza e, soprattutto, molto ritardato e dilazionato nel tempo.

Il trasporto di sabbia e ciottoli avviene in genere come trasporto al fondo dei corsi d'acqua, in stretta correlazione con le condizioni idrauliche. Il trasporto di limi e argille avviene prevalentemente sotto forma di torbide; l'entità del trasporto è determinata dagli apporti da monte e non dallo stato idrometrico locale.

Le torbide si muovono con velocità media poco inferiore all'acqua, mentre forme di deposito o erosione del fondo si muovono (verso valle in alvei fluviali) con velocità di alcuni ordini di grandezza più piccola (da 10 elevato alla 3ª a 10 elevato alla 5ª in genere).

La misura del trasporto viene fatta generalmente mediante il prelievo di campioni con trappole, campionatori e bottiglie.

Mancando una precisa normativa, la modalità seguita per le misure e la elaborazione, i campionatori impiegati e i coefficienti di taratura assunti per questi dovranno essere espressamente descritti nella relazione.

L'entità del trasporto così determinato e le sue caratteristiche tessiturali dovranno essere messe in correlazione con le condizioni idrometriche e la portata.

Essendo il trasporto rapidamente crescente con la portata liquida, le misure dovranno essere eseguite in corrispondenza di stati d'acqua rappresentativi del regime idrologico con particolare attenzione agli eventi di piena.

Ove siano disponibili invasi lungo il corso in esame e previa valutazione dell'efficienza di trappola dell'invaso stesso, potranno ricavarsi stime generalmente attendibili del trasporto medio attraverso la misura dei volumi depositati nel lasso di tempo compreso fra due rilievi del fondo dell'invaso stesso.

Stime dei trasporti medi e della ripartizione granulometrica possono essere eseguite sulla base della conoscenza dei suoli costituenti il bacino e dell'uso a cui vengono sottoposti.

Altre stime possono essere desunte dall'analisi quantitativa dei reticoli idrografici (densità di drenaggio, pendenze, erodibilità dei versanti ecc...).

Tali stime dovranno essere confortate dal confronto con quelle ricavate con altri metodi.

Stime del trasporto di fondo possono farsi, sulla base della conoscenza del regime idrologico, dei caratteri morfometrici dell'asta in esame (pendenza, larghezza, ecc...) e dei caratteri tessiturali e sedimentologici dei sedimenti costituenti il letto, con l'impiego di formule semiempiriche per il trasporto solido di fondo descritte nei manuali; la stima è più attendibile se è disponibile una scala di deflusso.

Poiché l'entità del trasporto di fondo e le caratteristiche dell'alveo variano lungo l'asta fluviale, le misure ad esso relative dovranno essere eseguite non lontano dalla foce.

### 2.3.3 Azione eolica

La deflazione comporta la sottrazione di sabbie che possono essere trasportate verso il largo o nell'entroterra, la selezione granulometrica delle stesse (dato che vengono più facilmente asportate le frazioni più fini) e la formazione di dune (condizionata alla disponibilità di sabbie in quantità sufficiente e di idonee barriere, naturali o artificiali, che consentano l'intrappolamento delle sabbie in movimento)

Effetti indiretti dovuti all'azione del vento consistono invece, come si è visto in precedenza, oltre che nella generazione del moto ondoso, nella generazione di correnti superficiali (correnti di deriva) e nell'innalzamento del livello marino prodotto dai venti che spirano da mare aperto.

Alle correnti superficiali generate dal vento, ed aventi direzione in genere concorde con quest'ultimo, corrispondono nelle zone costiere correnti di ritorno sul fondo aventi verso opposto, dando luogo a sistemi di circolazione, che hanno qualche influenza nel trasporto di sedimenti nella zona litoranea.

### 2.3.4 Altri apporti ed asporti

Possono essere determinati da:

- versamenti artificiali e discariche;
- frane o erosioni del retrospiaggia (dune e falesie) e dai fondali rocciosi;
- produzione bioclastica (es. coralli, alcuni tipi di alghe ecc).

Tra gli asporti da considerare sono:

- il dragaggio e prelievi dalla spiaggia;
- il trasporto verso specchi d'acqua interni, porti o lagune;
- la rimozione di materiali a seguito di costruzioni civili;
- il trasporto nell'entroterra provocato dai bagnanti.

L'insabbiamento dei porti è valutabile attraverso i quantitativi dragati; non costituirebbe una perdita per il litorale a lungo termine se la risulta del dragaggio fosse restituita al litorale.

### 2.3.5 Bilancio dei sedimenti

Il bilancio dei sedimenti applicato ad una zona di litorale fornisce utili indicazioni sullo stato e sul prevedibile futuro del litorale stesso, ponendo soprattutto in evidenza l'importanza relativa delle voci di bilancio attive e passive. Quest'ultimo aspetto costituisce l'elemento più significativo del computo, in quanto dà al progettista di opere costiere una più approfondita sensibilità circa l'importanza della voce sulla quale le opere in progetto potranno incidere. Talvolta, un accurato bilancio, associato a misure di variazione areale della spiaggia sommersa ed emersa, può essere utilizzato al fine di valutare per differenza la voce o l'insieme di voci non altrimenti quantificabili.

Le voci attive e passive (apporti ed asporti) del bilancio sono già state singolarmente descritte nei punti che precedono. Vale qui la pena di riassumerle in un unico elenco.

Tra gli apporti da terra compaiono i materiali forniti dai corsi d'acqua e dall'erosione delle falesie e delle dune del retrospiaggia, le sabbie che entrano nel volume di controllo rispetto al quale si valuta il bilancio o per l'azione del vento e i versamenti artificiali.

Tra gli apporti da mare i materiali convogliati verso riva dalle correnti trasversali, e gli apporti bioclastici.

Tra gli asporti verso terra si dovranno considerare lo stoccaggio più o meno reversibile del materiale che fuoriesce dal volume di controllo per effetto dei venti di mare, le sabbie che formano le dune di retrospiaggia, quelle che le onde di tempesta spingono in condizioni di alta marea oltre linee di possibile ritorno o in specchi acquei interni e i materiali definitivamente persi prelevati da cave sul litorale.

Tra gli asporti verso mare: il trasporto dei sedimenti, particolarmente i più fini che si perdono al largo in correnti di ritorno o in solcature sottomarine (canyons), le perdite di materiale bioclastico, le perdite per soluzione di sedimenti.

---

Tra gli asporti verso specchi acquei interni: il materiale che entra attraverso le bocche portuali e lagunari e le sabbie che il mare trasporta tracimando sulle dune litoranee.

Tra gli asporti ed apporti debbono ascriversi infine, ma non ultimi per importanza, i trasporti longitudinali attraverso le sezioni estreme del volume di controllo.

Particolare cura dovrà essere posta nella scelta del volume di controllo, la cui estensione dipenderà dal tipo di studio che si deve condurre; una intera unità fisiografica per indagini di carattere generale, il tratto di spiaggia oggetto dell'intervento e le aree limitrofe per singole opere.

I progetti di opere a mare vanno comunque corredati da un accurato bilancio dei sedimenti relativi al volume di controllo che comprende le opere in progetto, e possibilmente da quello dei volumi di controllo delle spiagge adiacenti, il cui bilancio può essere in qualche modo influenzato dalle opere stesse.

#### 2.4. Monitoraggio delle coste

Per una efficace politica di protezione costiera, indispensabile che i litorali siano oggetto di monitoraggio sistematico, che consenta di tenere sotto controllo il loro comportamento nel tempo.

Il monitoraggio potrà consistere in rilievi idoneamente sistematici del tipo suddescritto.

Nel sottolineare e ribadire l'importanza del monitoraggio agli effetti della conoscenza della tendenza evolutiva della spiaggia, occorre aggiungere che anche l'osservazione schematica della linea di riva fatta con semplici metodi topografici da terra e con riprese fotografiche consente informazioni utili e spesso sufficienti per lo scopo.

#### 3. LE OPERE DI DIFESA

E' possibile distinguere le opere di difesa d'una costa in naturali o artificiali. Fra le prime vanno ricordate le spiagge e le dune.

Possiamo poi classificare le seconde in opere la cui principale funzione è quella di impedire l'azione erosiva dell'onda mediante il rivestimento e di sostenere il terreno a tergo (difese aderenti come muri di sponda, paratie a mare, rivestimenti), e opere di rifornimento artificiale di sabbia alla spiaggia per controbilanciare le perdite causate dai processi naturali o da interventi dell'uomo.

Le barriere frangiflutti foranee, comunemente indicate con il termine di difese parallele distaccate, e i pennelli, se usati per sottrarre materiale litoraneo al trasporto lungo riva, possono considerarsi rientranti in questa seconda categoria. I frangiflutti, quali opere che riducono l'azione dell'onda sulla riva, rientrano anche nella prima categoria.

Un intervento di difesa limitato ad un breve tratto di una riva in erosione si rivela quasi sempre antieconomico. Peraltro, non va dimenticato che una protezione, così limitata, potrà aggravare i fenomeni erosivi in atto o addirittura innescarne di nuovi sulle rive adiacenti non protette, il cui bilancio di apporti e asporti di sedimenti dovrà registrare in negativo il mancato arrivo del materiale non più eroso nel tratto protetto e quindi sottratto alla naturale dinamica del trasporto lungo riva.

Una tale considerazione, che un progettista non dovrà mai trascurare, suggerisce di coordinare ogni intervento di protezione di un'area costiera in un programma, che valuti i processi erosivi e le reciproche influenze su tutta l'intera unità fisiografica. Un tal modo di operare si rivelerà, a lungo e termine, molto più efficace ed economico.

##### 3.1. Difesa aderenti

Strutture aderenti di vario tipo vengono impiegate a difesa di una riva non adeguatamente protetta da una spiaggia naturale.

Comunemente, si chiama paratia una parete verticale di tipo leggero (quali le palancole in calcestruzzo, ferro, legno), che costituisce una soluzione di breve durata. E' infatti da notare che una tale opera non può considerarsi una protezione anche e, della spiaggia antistante, il cui processo erosivo, se esistente, continuerà e, anzi, potrà essere incrementato dall'azione di escavamento dell'onda al piede della struttura e della maggior agitazione prodotta dall'onda riflessa.

La paratia non ha in genere capacità strutturale di resistere all'azione diretta delle onde, a meno che la sua struttura non venga rinforzata e trasformata in un muro di sponda di dimensioni adeguate.

I muri di sponda hanno la parete a mare verticale, curva o a gradoni e possono essere armati con mantellate di scogli naturali o massi artificiali ad alta scabrezza per ridurre la risalita dell'onda.

I rivestimenti sono costituiti da semplice opera di protezione superficiale della scarpata della spiaggia, senza una precisa funzione statica di sostegno del terreno a tergo.

##### 3.1.1 Funzioni e limiti

Le paratie, quali opere di breve durata, la cui costruzione si presenta spesso economica e veloce, potranno essere realizzate come opere provvisorie e provvisionali. In alcuni casi, esse vengono utilizzate come primo stadio della costruzione di un muro di sponda.

I muri di sponda, che proteggono e sostengono il terreno retrostante, provocano come le paratie l'approfondimento locale dei fondali. Infatti, l'azione delle onde, che frangono o si riflettono sulla parete, rimuove rapidamente la sabbia o altro materiale e, rodibile al piede della parete, modificando la situazione statica del muro, che può diventare instabile.

L'azione di approfondimento dei fondali al piede della struttura è minore se la parete è a scarpata invece che verticale.

Le difese in massi (scogliere radenti) danno in genere luogo ad un approfondimento dei fondali al piede ancora più limitato, in quanto, essendo permeabili, permettono alla massa d'acqua frangente di penetrare al loro interno, dissipando una rilevante aliquota dell'energia in moti turbolenti. Queste opere, inoltre, possono essere considerate di tipo flessibile o elastico, nel senso che sono possibili anche sensibili spostamenti relativi dei massi che le compongono, senza che venga compromessa la loro stabilità, al contrario dei muri di sponda, rivestimenti, paratie ecc., che si comportano invece come rigidi ed impermeabili.

Le strutture aderenti possono essere utilizzate quali opere di protezione di una riva di cui si vuole interrompere l'arretramento, nei casi in cui manca un apporto di materiale litoraneo e la spiaggia protettiva è minima o inesistente, oppure nei casi in cui si voglia escludere la formazione di una spiaggia.

Un esempio del primo caso è rappresentato da un promontorio in erosione, uno del secondo da un lungomare cittadino.

Un chiaro limite delle strutture aderenti è quello di proteggere solo il territorio ad esse retrostante e non anche le aree adiacenti sopra o sottoflutto.

Inoltre, come s'è visto, mentre l'azione di approfondimento dei fondali al piede della struttura può intensificare la tendenza all'asportazione del materiale dalla spiaggia antistante, provocandone l'arretramento, l'interruzione dell'erosione del terreno retrostante sottrarrà del materiale alle spiagge adiacenti.



### 3.1.2 Indicazioni per il progetto

Quest'ultima considerazione fa risaltare l'utilità di alcune indagini preliminari, che faranno parte del progetto.

Fra queste, quelle circa l'evoluzione della linea di riva, la direzione del trasporto netto lungo riva, la valutazione della quantità di materiale di spiaggia sottratto al rifornimento delle spiagge adiacenti.

Il progetto conterrà, inoltre, insieme al calcolo statico della struttura e al calcolo della altezza di risalita dell'onda e della tracimazione su di essa, una ragionevole motivazione della scelta fatta.

La seguente discussione potrà servire come orientamento di larga massima per detta scelta.

Fattori di progettazione delle strutture aderenti sono: la scelta di una adeguata forma delle strutture, la sua ubicazione in relazione alla linea di riva, la lunghezza, l'altezza, la stabilità del terreno e il livello del mare. I tipi di profili in uso sono i più vari: verticali o quasi verticali, a scarpata, a curva convessa, a curva concava, a gradoni ad ognuno di essi potrà associarsi una certa funzione.

Una parete verticale, per esempio, ben si presta all'uso come banchina, posto di ormeggio o di attracco. Viceversa, una parete a curva concava, con la sommità sporgente all'esterno, è più efficace di una verticale contro la tracimazione.

Una simile struttura può quindi risultare una buona soluzione per una strada litoranea o una passeggiata a mare.

Anche efficaci nel ridurre la risalita dell'onda e la tracimazione, nonché nel dissipare l'energia dell'onda, sono le pareti e i rivestimenti inclinati ad alta scabrezza.

D'altro verso, l'uso di pareti verticali o quasi verticali, in genere esalta il pericolo di scalzamento per effetto dell'erosione al piede. Se il materiale del fondo è erodibile, sarà necessario prevedere una adeguata protezione al piede. Un rimedio può essere quello di realizzare un taglione o disporre, a protezione del fondo, del pietrame o un materasso contenente pietrame o altra simile protezione. Il pietrame dovrà avere dimensione tale da evitare lo spostamento, e la distribuzione granulometrica tale da funzionare da filtro per prevenire l'asportazione del materiale di fondazione ed il conseguente cedimento, per assestamento, del pietrame.

Il pericolo di scalzamento è generalmente inferiore per le strutture con pareti a scarpata, specie se la pendenza è bassa.

Nel caso di una scogliera, che in genere si abbasserà, slittando, per riempire l'affossamento creato dall'onda al piede fino a raggiungere una nuova posizione stabile, il cedimento risultante può essere compensato, sovraproporzionando la sezione trasversale o ponendo pietrame in eccesso, che possa andare a colmare la fossa. A titolo orientativo, converrà ricordare che la prevedibile profondità della fossa, sotto il fondo naturale, all'incirca dell'ordine dell'altezza della massima onda compatibile con il fondale originario.

Se una simile struttura è realizzata a gradoni, potrà ottenersi un facile accesso alla spiaggia.

Agli estremi delle strutture aderenti occorrerà sempre prevedere opportuni muri d'ala di raccordo per prevenirne aggiramento ai fianchi o comunque la progressiva avaria.

Converrà ricordare, infine, che, nel valutare il costo dell'opera; non potrà trascurarsi la stima del prevedibile danno alle rive adiacenti.

### 3.2. Pennelli

Sono strutture trasversali che in generale si estendono dal retrospiaggia (a partire da un punto sufficientemente radicato a terra perché il pennello non venga aggirato dal getto di risalita) alla prima linea dei frangenti di normale mareggiata (oltre la quale il trasporto litoraneo è insignificante). Sono stati costruiti pennelli di varia forma, in massi naturali o artificiali, in calcestruzzo o ferro o legno, fissi o modificabili.

I pennelli possono essere isolati o far parte di un "sistema di pennelli".

#### 3.2.1 Funzioni e limiti

L'effetto di un pennello è quello di intercettare una parte o la totalità del trasporto lungo riva e formare un cumulo sul lato sopraflutto. Con riferimento al profilo altimetrico e planimetrico di detto cumulo e alla percentuale di trasporto litoraneo trattenuto, i pennelli vengono classificati alti o bassi, lunghi o corti, permeabili o impermeabili.

Nel caso di pennelli "alti", l'altezza del cumulo aumenta progressivamente finché la sua pendenza trasversale è compatibile con la stabilità della frazione più grossa dei granuli dei sedimenti. Raggiunta tale situazione, tutto il trasporto solido oltrepassa il pennello e, se il pennello è ben proporzionato, raggiunge l'area sottoflutto. Un pennello "basso" può invece consentire al materiale di scavalcare la sua sommità durante le mareggiate più forti e alimentare le aree sottoflutto. In ogni caso, l'altezza del tratto a terra di un pennello alto è quella della massima onda che risale la spiaggia durante le mareggiate; l'altezza del tratto a terra di un pennello basso è almeno pari a quella della berma della spiaggia che si intende realizzare.

L'altezza del tratto di pennello a mare rispetto alla futura spiaggia può essere congruamente minore, e ciò per motivi economici e per esigenze balneari ed estetiche.

La lunghezza di un pennello va determinata in base all'allineamento che si vuole attribuire alla futura spiaggia, tenuto presente che la linea di riva tenderà a disporsi perpendicolare alla risultante annua dell'attacco ondoso.

La lunghezza dipende inoltre dall'estensione della zona dei frangenti e dal fatto che si voglia intercettare la totalità o solo una parte del trasporto litoraneo.

Pennelli permeabili possono essere costruiti quando non si debba trattenere tutto il materiale in transito sia per quanto riguarda l'erosione della spiaggia sottoflutto, sia nel caso in cui si possano verificare frequenti e significative inversioni della corrente lungo riva. La stessa soluzione attenua anche, in parte, il poco gradevole andamento a dente di sega della spiaggia. Va tenuto però presente che i pennelli permeabili possono essere resi impermeabili da alghe o materiali che intasano i vuoti.

Come precedentemente detto i pennelli possono essere singoli o far parte di un sistema. Pennelli singoli vengono utilizzati per aumentare localmente la larghezza della spiaggia sopraflutto, per la difesa di imboccature portuali o lagunari, per delimitare le estremità di difese radenti o di ripascimenti artificiali, per realizzare la chiusura di una nuova unità fisiografica o migliorare la definizione di una esistente, per individuare con maggior precisione, dal punto di vista della perdita longitudinale dei sedimenti, una spiaggia a tasca, ecc. Un sistema di pennelli è solitamente adottato quando si intende costruire o proteggere una striscia di spiaggia estesa, sia che si intenda formarla con il naturale trasporto litoraneo, sia che si preveda di realizzarla con versamento artificiale. In quest'ultimo caso i sistemi di pennelli diventano un'opera complementare per diminuire i versamenti o ridurre la frequenza; la loro economicità dovrà essere cautamente valutata e confrontata con la soluzione di solo ripascimento e ricostruzione della spiaggia.

I pennelli singoli o i sistemi di pennelli vengono adottati come opere di difesa quando la spiaggia in considerazione è interessata da predominante trasporto longitudinale e quando le forze attive sono esuberanti per la effettiva quantità di materiale in transito. La loro adozione è più consueta, ai fini della protezione del litorale, quando le forze che generano il trasporto sono spiccatamente più intense in una direzione (in tal caso saranno più probabili forti erosioni lungo il lato sottoflutto). Nel caso invece di paraggi, in cui il trasporto ha frequenti inversioni, una spiaggia potrà formarsi anche sui lato sottoflutto, nella zona riparata dal pennello stesso. In tal caso il pennello, pur non avendo funzione di ricostruzione della spiaggia, può ridurre l'entità degli spostamenti della linea di riva.

### 3.2.2 Indicazioni progettuali

Prima di procedere alla progettazione di un pennello o di un sistema di pennelli è indispensabile individuare le caratteristiche qualitative e quantitative della dinamica trasversale e longitudinale della spiaggia esistente e della spiaggia futura e determinare in particolare la distribuzione spaziale del transito dei sedimenti. Su tali caratteristiche infatti il pennello può avere intensi effetti in quanto esso altera la circolazione correntizia con la possibilità di formazione di nuove correnti di ritorno aderenti al pennello stesso. Nello studio si dovrà tenere conto dell'escursione di marea e di sopralzi d'onda che possono significativamente influire sulla dinamica litoranea.

A tale proposito è molto importante l'esperienza che deriva dall'osservazione del comportamento di opere a mare esistenti sulla spiaggia stessa o su spiagge in analoghe situazioni. Qualora non sia possibile fruire di tale esperienza, si suggerisce di far precedere alla progettazione definitiva l'esecuzione di opere parziali aventi scopo di indagine, sfruttando una delle caratteristiche peculiari del pennello, particolarmente utile anche durante il normale funzionamento, che particolarmente utile anche durante il normale funzionamento, che è quella di poter essere modificato con l'evolversi della spiaggia.

Se il pennello non è ben proporzionato, ad esempio un pennello impermeabile, alto e troppo lungo, il materiale che lo oltrepassa può andare perso sia per la profondità del mare in cui si viene a trovare, sia per la menzionata corrente di ritorno che spesso si realizza in corrispondenza del pennello stesso.

Nel caso di un sistema di pennelli, la lunghezza e la spaziatura tra i pennelli devono essere determinate in funzione dell'allineamento di spiaggia che si vuole realizzare e della portata solida in transito. Si dovrà in ogni modo fare sì che il filetto di sabbia che abbandona la testata del pennello sopraflutto possa essere catturato dalla spiaggia o dal pennello sottoflutto con sufficiente margine di sicurezza. In linea generale la spaziatura fra pennelli è due o tre volte la lunghezza dei pennelli stessi.

È praticamente inevitabile, salvo interventi particolari, che la spiaggia sottoflutto venga danneggiata dalla riduzione del trasporto solido che la alimentava. L'erosione di tale spiaggia, se questa esiste ed ha importanza turistica o come elemento di protezione del litorale, può essere evitata, provvedendo al riempimento artificiale degli spazi tra pennello e pennello per consentire il transito della deriva naturale.

Nella realizzazione di un pennello singolo, una volta che ne sia stata stabilita la lunghezza in sede progettuale, è consigliabile costruire in una fase un pennello di lunghezza (o anche altezza) apprezzabilmente minore, per poter constatare gli effetti da esso provocati sul litorale sia sopraflutto che sottoflutto, in modo da poter decidere, a seconda di tale effetti, se è opportuno prolungare o meno il pennello stesso.

In sostanza, si consiglia di realizzare il pennello in fasi successive, in maniera che esso possa avere una lunghezza definitiva ritenuta idonea dall'esame sperimentale del suo comportamento, lunghezza che potrà quindi risultare sia maggiore che minore rispetto a quella prevista originariamente in progetto.

Dovendo realizzare un sistema di pennelli in presenza di forte deriva litoranea, nella sequenza temporale di costruzione si proceda in verso opposto alla deriva stessa, in perfetta analogia con quanto è pratica corrente nell'imbrigliare torrenti montani.

Inoltre, anche in questo caso, è senz'altro consigliabile procedere nella realizzazione per fasi, costruendo inizialmente dei pennelli di lunghezza (o anche altezza) minore e procedere successivamente nell'esecuzione, dopo aver seguito sperimentalmente i loro effetti, in modo da giungere ad una lunghezza (o altezza) definitiva ottimale dei vari pennelli.

### 3.3. Frangiflutti distaccati

Una barriera frangiflutti distanziati è una struttura costruita ad una certa distanza dalla battigia per proteggere un'area costiera dalla azione diretta delle onde. Può servire come ausilio alla navigazione, come struttura di difesa di una spiaggia, come trappola per il trasporto litoraneo. Generalmente la struttura è realizzata in scogliera di pietrame.

Quando vengono impiegate per proteggere la costa, esse sono generalmente realizzate in forma di gruppo di elementi di lunghezza modesta, separati da varchi aventi lo scopo di consentire lo scambio di acque, l'ingresso dei sedimenti o il transito di piccoli natanti.

A seconda della quota a cui è posta la sommità dei frangiflutti, essi potranno dirsi emergenti o sommersi, anche se frangiflutti abitualmente emergenti, in condizioni di alta marea, possono funzionare con forte tracimazione e saltuariamente anche sommersi.

In relazione agli scopi sopra accennati, i varchi costituiscono una necessità per un sistema di barriere emergenti, mentre al crescere della tracimazione-sommergenza essi non sono necessari e possono divenire dannosi per le violente correnti che attraverso di essi ritornano al mare.

Barriere sommerse sono impiegate spesso come opere di contenimento e sostegno di spiagge artificiali o ripascimenti. Quando la sommergenza è forte questo effetto di contenimento è prevalente rispetto all'azione frangiflutti.

#### 3.3.1 Funzioni e limiti

I frangiflutti dissipano l'energia dell'onda frangente su di essi creando sul lato terra una zona di bassa agitazione o d'"ombra".

Il materiale trasportato lungo riva dalla azione combinata dell'onda e delle correnti viene depositato in detta zona protetta.

La dissipazione dell'energia dell'onda avviene lontano dalla riva e dai beni che si vogliono difendere.

Un frangiflutti isolato ed emergente genera una zona di "calma" che è delimitata dalle zone di diffrazione aventi origine nelle due testate; tale zona di calma ha forma triangolare circa equilatera in condizioni di incidenza frontale; il lato che si appoggia al frangiflutti è più corto di questo di 1 - 2 lunghezze d'onda.

Le sabbie, che, mosse lungo la riva, si depositano dietro la barriera, formano dapprima un bassofondo, che poi evolve in una estroffessione della linea di riva fino a raggiungere eventualmente il frangiflutti formando così un tombolo, se la distanza del frangiflutti dalla battigia primitiva è circa pari alla sua lunghezza. Nel caso in cui la distanza sia molto minore o molto maggiore, si formano nell'ordine due tomboli o nessuno. La saldatura del tombolo al frangiflutti è ostacolata se la tracimazione dell'onda è frequente.

Quando si realizza un sistema di frangiflutti, la formazione del deposito è rapida sul lato sopraflutto alimentato dal trasporto litoraneo. A tergo delle seguenti barriere e fino a che il riempimento delle precedenti non è tale, da permettere al trasporto litoraneo di sorpassare le barriere, il riempimento è molto più lento, in quanto avviene per trasporto trasversale alla spiaggia come adeguamento del profilo alla minor altezza di onda che interessa l'area protetta.

La formazione del tombolo dietro il frangiflutti ha l'effetto di impedire il transito lungo riva delle correnti litoranee e rende la barriera funzionalmente simile ad un pennello.

In presenza di una forte deriva litoranea, il deposito a tergo della barriera induce un avanzamento della riva sopraflutto, che nel tempo si estende a grande distanza; a questo fa riscontro un'erosione comparabile sul lato sottoflutto.

In assenza di trasporto netto derivante da un equilibrio fra i trasporti nei due versi, il riempimento avverrà a partire da entrambe le estremità; il materiale depositato non viene rimosso in eguale misura da un'ondazione generante trasporto in verso opposto, in quanto il deposito è protetto dalle barriere stesse.

Un sistema di barriere produce in genere una sottrazione di sedimenti alle rive adiacenti, come ogni opera che produce ripascimenti di spiaggia alimentandosi dei trasporti litoranei.

Un sistema di barriere può catturare anche materiali che, muovendosi trasversalmente alla riva, entrano attraverso i varchi o sopra la barriera, e può risultare efficace anche in assenza di trasporto litoraneo.

Un sistema, che si estenda al tratto compreso fra due sezioni in cui il trasporto litoraneo sia sicuramente nullo, non potrà sottrarre sabbie alle aree adiacenti.

Quando il frangiflutti è sommerso, l'attenuazione dell'onda è solo parziale, ma, non essendo necessaria la presenza dei varchi, non sempre ciò comporta una maggior energia incidente sulla riva, rispetto ad una barriera emergente; per contro l'attenuazione dell'onda è proporzionalmente maggiore sulle onde più alte.

Ad equilibrio raggiunto, a ridosso dei frangiflutti il profilo trasversale della spiaggia risulterà più ripido a seguito della minore ripidità delle onde, mentre davanti ad essi è presente una fossa associata alla riflessione prodotta dal paramento esterno.

I volumi depositabili (depositati dopo un certo tempo se d1 sponlDli, potranno essere determinati attraverso le valutazioni della diffrazione dell'onda attraverso i varchi e dei profili trasversali di equilibrio, risultando le isobate all'equilibrio circa parallele ai fronti d'onda.

Un sistema di frangiflutti surdimensionato come opera di difesa (varchi insufficienti ecc.) produce la sedimentazione anche di materiali molto fini e degrada la qualità delle acque negli alveoli che si formano in corrispondenza dei varchi.

Un frangiflutti foraneo adeguato può essere impiegato come trappola da sabbie, ad esempio sul lato sopraflutto di una imboccatura; se abbinato ad una draga che può trovar riparo a ridosso dello stesso, può costituire un efficace sistema di bypassing delle sabbie verso la spiaggia sottoflutto.

L'acqua che tracima sulla barriera ritorna al largo per la via di minor resistenza; per un sistema di barriere poco emergenti si concentrano nei varchi delle forti correnti (del tutto analoghe alle correnti di ritorno) che possono essere pericolose per i bagnanti inesperti, oltre a costituire un mezzo molto attivo di trasporto dei sedimenti verso il largo.

Su fondali cospicui ed in paraggi molto esposti, potranno ottenersi economie anche significative realizzando barriere sommerse, che hanno rispetto alle emergenti minore sezione e sviluppo della mantellata, essendo inoltre questa meno esposta all'impatto diretto dei frangenti.

In mari eutrofici o ricchi di alghe potrà risultare opportuna la piccola riduzione che le barriere sommerse esercitano sulle onde minori, al fine di evitare il formarsi di depositi non sempre igienici.

Similmente il congiungersi al tombolo delle barriere emergenti pare un fenomeno non favorevole, poiché in tal caso si viene a generare un alveolo quasi chiuso, distaccato dalle correnti longitudinali ed avente modeste capacità di scambio con l'esterno soprattutto per le onde minori non tracimanti, così da costituire una situazione igienicamente pericolosa.

L'attenuazione dell'onda e le tracimazioni, e quindi l'efficienza del sistema difensivo da essi costituito, dipendono sensibilmente dalla quota sul mare del coronamento. Il sistema di difesa, in particolare se costituito da barriere sommerse, non è pertanto consigliabile in paraggi a forte escursione di marea.

I frangiflutti paralleli possono risultare un sistema di difesa antieconomico su spiagge ripide, ove, per disporle ad una certa distanza da riva diviene necessario costruirli su fondali eccessivi.

Il sistema non si presta a seguire nel tempo le variazioni della linea di riva e necessita quindi di una meditata progettazione.

Può risultare sgradevole esteticamente e disagiata per i bagnanti, specialmente se realizzato con barriere emergenti e in grossi massi di calcestruzzo.

### 3.3.2 Indicazioni per il progetto

Dovranno essere condotte preliminari indagini sull'escursione dei livelli di marea sul regime ondoso e correntizio e sul regime dei trasporti litoranei: in particolare necessita conoscere il trasporto litoraneo netto e lordo e come questo risulti distribuito sulla spiaggia sommersa. Infine dovrà essere valutata la capacità portante e la resistenza all'erosione del fondale su cui si imbase la struttura.

I principali parametri che debbono essere determinati sono quota del coronamento e fondale (distanza da riva) su cui realizzare l'opera. Essi determinano: l'attenuazione dell'onda e la tracimazione, la frazione del trasporto totale litoraneo che può essere trattenuto, la sezione e quindi il costo dell'opera.

La distanza da riva determina anche il volume delle sabbie che può essere trattenuto ed eventualmente sottratto alle aree adiacenti.

La lunghezza di ogni elemento è in generale proporzionata alla distanza da riva; ai fini dell'attenuazione dell'onda è preferibile che essa non sia troppo piccola perché le testate, oltre ad essere in proporzione più costose, per effetto della diffrazione riducono l'efficacia dell'elemento rapportata alla lunghezza dello stesso.

La lunghezza percentuale dei varchi (rapporto tra lo sviluppo dei varchi e quello complessivo della difesa) controlla la frazione dell'energia che raggiunge in media la riva.

La pendenza del paramento verso largo e la sua scabrezza determinano la riflettanza della struttura e la profondità della fossa che si forma al piede.

La larghezza della berma è determinata prevalentemente dalla stabilità statica della mantellata per scogliere emergenti; per barriere sommerse, al crescere della larghezza di berma, aumenta l'attenuazione dell'onda e la selettività di tale attenuazione, anche se ai soli fini di aumentare l'attenuazione risulta in genere più conveniente sollevare la berma anziché allargarla.

Come per le difese aderenti, si verificano spesso degli assestamenti della struttura che derivano dallo scalzamento del piede verso il largo e dalla compenetrazione fra il frangiflutti e la sabbia sottostante. E' opportuno, in questi casi, prevedere un telo di geotessile o altro filtro fra i due ammassi a granulometria molto diversa e un rivestimento del fondo in prossimità del piede delle scarpate.

All'usura del pietrame possono essere dovuti solo assestamenti che avvengono in tempi molto lunghi.

Frangiflutti di grandi dimensioni possono dare luogo ad instabilità statica della fondazione, se essa è costituita o sovrasta strati argillosi.

Nel caso di assestamenti avvenuti o previsti per il frangiflutti, al fine di ripristinarne la efficienza originaria, si dovrà fare il ricarico della mantellata, che costituisce un intervento di costo a volte comparabile con quello della struttura.

In sede di progettazione, si potranno prevedere gli assestamenti e realizzare la struttura più alta, o con sezione maggiorata.

In sede di esecuzione, si potrà esporre il nucleo sovradimensionato; ad alcune mareggiate che ne causino l'assestamento, e solo in un secondo tempo realizzare la mantellata.

In sede di manutenzione, si potrà invece valutare la opportunità di ridurre la sezione dei varchi con una barriera sommersa, in alternativa al ricarico della struttura esistente.

In assenza di un mare dominante fortemente obliquo, converrà disporre le barriere allineate, altrimenti orientate come i fronti d'onda del mare dominante.

Si assiste spesso ad una progettazione in serie dei frangiflutti (da non confondersi con progettazione di una serie). Ciò non sembra vantaggioso né all'economia della costruzione, che non sfrutta la peculiarità dei luoghi, né al progresso delle conoscenze. Si ritiene opportuno che si ritorni a progettare, cioè a scegliere meditatamente tecnologie realizzative, materiali e dimensioni del manufatto, in modo che risponda ai requisiti funzionali con sicurezza e basso costo.

Infine, dovendo realizzare una successione di barriere in presenza di deriva litoranea, si costruisca per prima quella sottoflutto (sottoflutto alla quale dovrà trovarsi un tratto di litorale che non soffra la mancanza d'apporti) e poi via via le altre contro deriva; viceversa si otterrà solo di spostare sottoflutto, esaltandola, quell'erosione che naturalmente si forma sottoflutto alla prima barriera.

In assenza di deriva litoranea, le stesse considerazioni portano a consigliare la costruzione intercalata degli elementi.

Nel primo caso, in particolare, la strategia corretta è esattamente contraria a quella derivante dall'ascolto passivo delle lamentele di chi subisce il danno; ovvero l'intervento non va fatto seguendo le pressioni dei danneggiati, ma prevenendole.



### 3.4. Ripascimenti e spiagge artificiali

Il ripascimento artificiale di una spiaggia consiste nell'alimentazione della stessa mediante idoneo materiale di riporto, estratto da cave di prestito a terra o in mare.

Le spiagge possono dissipare efficacemente l'energia dell'onda e pertanto sono classificate fra le strutture di difesa della costa.

Le spiagge sono parte del sistema naturale delle coste e il loro effetto di dissipazione dell'onda si ha generalmente in modo graduale, cosicché esse vengono classificate quali strutture di difesa morbida.

E poiché la maggioranza dei problemi di erosione si ha quando vi è una deficienza nel rifornimento naturale di sabbia, il versamento di materiale di prestito sulla spiaggia va considerato come una misura di stabilizzazione della spiaggia e quindi di difesa della costa.

Scopo dell'intervento, oltre quello di stabilizzare una spiaggia in erosione, può essere anche quello di ampliarla ovvero di realizzare una nuova spiaggia.

#### 3.4.1 Funzioni e limiti

Funzione del ripascimento artificiale e quella di agire sul bilancio dei sedimenti di un dato tratto di litorale, rendendolo positivo o nullo, a seconda che l'obiettivo sia quello all'ampliamento ovvero della stabilizzazione della spiaggia.

Il ripascimento potrà essere effettuato in un'unica soluzione e/o mediante alimentazione periodica con quantità da stabilirsi in base al deficit dei sedimenti lungo il tratto costiero in esame ed alle caratteristiche sia dei sedimenti originari che di quelli costituenti le cave di prestito.

I provvedimenti di ripascimento artificiale, quando possono essere applicati, costituiscono il miglior sistema per ovviare ai problemi di erosione dei litorali, presentando il notevole vantaggio di non provocare, a differenza degli altri tipi di difesa, sfavorevoli ripercussioni sul regime dei litorali adiacenti che, anzi, non possono che essere favoriti da un incremento degli apporti di sedimenti.

È consigliabile studiare la fattibilità di distribuire meccanicamente o idraulicamente la sabbia direttamente su una spiaggia in erosione, per riparare o formare, e successivamente conservare, una adeguata spiaggia protettiva, e considerando anche altre misure di rimedio ausiliarie a quella soluzione.

Quando vi sono le condizioni per un ripascimento artificiale, lunghe zone di spiaggia possono essere protette a costi relativamente bassi rispetto a quelli di strutture di difesa alternativa.

Sotto certe condizioni, un sistema di opere accessorie può incrementare l'effetto di difesa; tuttavia, se una spiaggia è ripasciuta o allargata dal naturale apporto di materiali di spiaggia, deve prevedersi, in conseguenza della costruzione delle opere di contenimento (pennelli e soglie), una corrispondente diminuzione di rifornimento naturale alla zona sottoflutto con la risultante espansione del problema.

Gli effetti negativi delle opere accessorie di contenimento possono usualmente ridursi, ponendo materiale di riempimento artificiale in adatte quantità correntemente con la costruzione dei pennelli, per permettere il bypass verso valle del materiale naturale; questo stoccaggio viene chiamato "riempimento dei pennelli".

Opere ausiliarie di contenimento possono essere incluse in un progetto di difesa di una spiaggia mediante ripascimento per ridurre la quantità della perdita e quindi la necessità di più frequenti ricarichi.

Quando si prevede l'uso delle opere di contenimento in uno con il riempimento artificiale, i loro benefici devono essere attentamente valutati per giustificare l'impiego.

I limiti dell'intervento sono legati esclusivamente alla disponibilità, a costi economici, di materiali adatti per il ripascimento. Valutazioni economiche che possono farsi egualmente per l'equilibrio biologico dei fondali.

Durante l'esecuzione è da prevedersi qualche inconveniente di carattere ambientale per l'aumento temporaneo della torbidità delle acque costiere, almeno in una fase iniziale, specie quando sia rilevante la percentuale di sedimenti fini nel materiale di riporto.

#### 3.4.2 Indicazioni per il progetto

Un progetto di ripascimento artificiale, sia che si tratti della realizzazione di una nuova spiaggia, che del mantenimento o ampliamento di una spiaggia esistente, richiede sempre una precisa conoscenza della dinamica del litorale su cui si interviene, specie per quanto riguarda la direzione del trasporto litoraneo ed il deficit dei sedimenti.

Fondamentale anche la conoscenza delle caratteristiche granulometriche e tessiture originarie della fascia costiera, da ottenersi in base ai risultati delle analisi di un sufficiente numero di campioni prelevati dalla spiaggia emersa e dalla spiaggia sommersa.

La scelta del materiale di riporto dovrà essere effettuata tenendo conto delle caratteristiche originarie dei sedimenti costieri.

Anche i quantitativi di progetto dei materiali di ripascimento dovranno essere stabiliti in base alle caratteristiche granulometriche del materiale di riporto rispetto al materiale originario.

In particolare, per spiagge relativamente stabili o in leggero arretramento, sarà opportuno che il materiale di riporto abbia la stessa granulometria del materiale originario o, meglio, che sia leggermente più grosso; in queste ipotesi i quantitativi di progetto potranno essere stabiliti considerando trascurabili le perdite di materiale di riporto dovute a diversità di comportamento sotto l'azione del moto ondoso (processi di rimozione e selezione dei sedimenti) rispetto al materiale originario.

Sedimenti a granulometria leggermente più grossa dovrebbero risultare stabili in condizioni normali e dar luogo a profili di spiaggia più ripidi.

L'utilizzo di materiale più fine comporterà invece, sotto l'azione del moto ondoso, la perdita di quantità anche considerevoli e non stimabili con precisione di sedimenti subito dopo il ripascimento.

Di tale fatto si dovrà tener conto, maggiorando adeguatamente i quantitativi di apporto stabiliti nell'ipotesi di uniformità di caratteristiche fra materiale di ripascimento e materiale originario mediante opportuni fattori correttivi, detti anche "fattori di riempimento".

Per una valutazione orientativa di questi ultimi, si potrà fare riferimento, una volta note le caratteristiche granulometriche dei sedimenti originari e di quelli ottenibili dalle cave di prestito, a metodi teorici come quelli di Krumbein-James, James e Dean.

Un programma di ripascimento artificiale richiede la preventiva definizione delle caratteristiche geometriche di progetto in particolare: quota, larghezza della berma e profilo, che prevedibilmente assumerà la spiaggia sotto l'azione del moto ondoso.

La quota della berma potrà essere fissata tenendo conto delle prevedibili altezze di risalita del moto ondoso e dell'altezza di berma della spiaggia originaria, nonché di quella di spiagge in condizioni di esposizione simili.

La larghezza della berma andrà definita a seconda della finalità della spiaggia (spiaggia protettiva, spiaggia per usi ricreativi).

La definizione del profilo di progetto potrà avvenire basandosi sui profili trasversali rilevati all'interno della fascia costiera in esame o dei tratti adiacenti, tenendo conto delle eventuali diversità delle caratteristiche granulometriche dei materiali di apporto rispetto ai materiali originari (Dean).

E da precisare che la definizione del profilo di equilibrio di una spiaggia prevedibile a seguito di un intervento di ripascimento interessa esclusivamente ai fini del computo preliminare dei volumi di apporto, mentre nella pratica la modellazione del profilo sarà affidata agli agenti naturali.

Un ultimo aspetto da considerare nel progetto consiste nelle modalità di alimentazione della spiaggia, in particolare per quanto riguarda la scelta fra un unico o più punti di alimentazione, nonché la ubicazione e le dimensioni più opportune del o dei depositi di alimentazione.

Nel caso di una spiaggia facente parte di un'unica unità fisiografica, il ripascimento potrà ottenersi mediante la realizzazione di un deposito di alimentazione all'estremità sopraflutto, in modo che l'alimentazione della spiaggia sottoflutto possa avvenire ad opera del trasporto litoraneo.

La previsione di più punti di alimentazione è consigliabile quando sia richiesto un ripascimento rapido ed uniforme su tutta la spiaggia.

---

Da tener presente che un deposito di alimentazione non dovrà mai essere spinto a profondità eccessive, tali da impedire un'efficace movimento da parte del trasporto litoraneo.

Spesso il costo per metro cubo di sabbia per piccoli progetti è abbastanza alto, a causa dell'alta spesa richiesta per mobilitare l'attrezzatura necessaria, mentre, per grandi progetti di ripascimento, la stessa spesa costituisce una parte minore dell'impegno economico di progetto.

Inoltre, il ripascimento artificiale può risultare abbastanza costoso per piccole spiagge, a causa della rapida erosione che interessa una spiaggia più estesa verso il largo rispetto alla costa adiacente, il cui materiale erodibile sarà più facilmente trasportato anche per effetto della focalizzazione su di essa dell'energia ondosa.

L'uso di materiale di ripascimento più grosso di quello naturale, e conseguentemente più stabile, può ridurre le richieste di rifornimento, ma può essere meno adatto per l'habitat naturale o per la balneazione.

A volte può essere utile disperdere una certa quantità di materiale fino come copertura artificiale su quello più grosso, per meglio emulare le condizioni naturali.

Il progetto dovrà contenere, anche al fine di una più corretta valutazione del suo costo e di un confronto con soluzioni alternative, attendibili indicazioni sulla evoluzione nel tempo della spiaggia artificiale.

A tal fine, utili e necessarie sono le informazioni sulla dinamica del trasporto e sulle caratteristiche dei sedimenti di spiaggia più volte richiamate.

### 3.5. Opere per la protezione di porti e canali di accesso

Si tratta di opere aventi lo scopo di consentire alle navi di manovrare in condizioni di sicurezza nel canale di accesso o porto.

Esse vengono qui esaminate, non per le finalità proprie della loro costruzione, ma per gli effetti che tali opere inevitabilmente comportano sui litorali adiacenti.

Esse comprendono: moli di armatura di foci lagunari o fluviali, moli di protezione dei porti, escavazioni e sistemi di bypassing.

I moli sono strutture aventi la funzione di proteggere lo specchio d'acqua fra essi compreso dall'agitazione ondosa e nel contempo rendere stabile la differenza di quota del fondale fra lo specchio navigabile e la spiaggia adiacente. Essi vengono realizzati in forma di frangiflutti emergenti radicati a terra o di pennelli, quando lo specchio compreso si riduce al solo canale.

Essi si differenziano dalle corrispondenti strutture per la difesa dei litorali soprattutto per le dimensioni e per i fondali che raggiungono.

Le escavazioni possono essere sia escavazioni di nuove darsene portuali, che escavazioni nello specchio portuale insufficientemente "protetto" dai moli, sia infine escavazioni di un canale marittimo non difeso; le ultime sono opere di manutenzione ordinaria o straordinaria necessarie all'ufficiosità delle strutture.

Infine i sistemi di bypassing sono sistemi che consentono alle sabbie di oltrepassare artificialmente una imboccatura portuale o lagunare, evitando cioè l'interrimento del bacino e ripristinando il trasporto litoraneo interrotto.

#### 3.5.1 Funzioni e limiti

I moli raggiungono lo scopo di non fare entrare le sabbie nelle aree navigabili in genere impedendo la tracimazione e il transito delle sabbie davanti alla bocca, fenomeni per cui, con significante probabilità, si verifica la cattura da parte del porto.

In questa ottica, i moli vengono costruiti con coronamento a quota tale da non essere tracimati (se non per eventi talmente rari da non comportare un significativo onere a seguito dei volumi di sabbia entrati e della agitazione prodotta) e la loro testata viene portata ad una distanza da riva prossima a quella, a cui il fondale naturale nelle spiagge adiacenti eguaglia il fondale richiesto per la navigazione.

Se costruiti in questa ottica, i moli, salvo quelli a protezione di bassissimi fondali, finiscono per arrestare completamente o quasi il trasporto litoraneo.

In presenza di deriva litoranea, si formerà un accumulo sopraflutto ed erosione sottoflutto, potendo risultare assai più evidente l'erosione dell'accumulo, se parte delle sabbie fluenti prima lungo riva entra nello specchio protetto e/o parte viene deviata verso il largo, risultando in tutto o in parte perduta per la riva sottoflutto.

Quando i moli non vengono protesi fino al fondale richiesto dalla navigazione, questo deve essere mantenuto dragando un canale e mantenendolo dragato, perché la sabbia in transito si deposita, incontrando profondità maggiori. La presenza della incisione costituita dal canale tende a concentrare in esso le correnti di ritorno se queste possono alimentarsi dalla zona dei frangenti, disperdendo verso il largo parte dei sedimenti.

Se le sabbie dragate dal canale vengono scaricate al largo, si avranno per la spiaggia sottoflutto gli stessi effetti che se i moli fossero protesi più al largo.

In presenza di deriva litoranea, sempre che i danni diversamente prodotti sottoflutto lo giustifichino economicamente, si dovrà provvedere ad un sistema di bypass. Al sistema costituito da una condotta fissa, viene oggi generalmente preferito un sistema con trappola per sabbie e trasporto artificiale saltuario.

La trappola di sabbie può essere costituita da un pennello o molo, da un frangiflutti foraneo o da una depressione del fondale a cui le sabbie arrivano. Il deposito prodotto nei primi dei suddetti casi è prevalentemente accessibile da terra e il trasporto si farà in questi casi con mezzi terrestri, mentre nei secondi si preferisce l'uso di draghe; in entrambi i casi si fa uso di mezzi di trasporto che non sono dedicati esclusivamente allo scopo.

L'uso del prodotto delle escavazioni per il ripascimento di spiagge non è esente da problemi; infatti esso è spesso ricco in fanghi, organici e non, che verrebbero messi in circolo all'atto della scarica, arrecando degrado alla qualità delle acque e danno all'ambiente biologico. A tal riguardo giova osservare che l'inquinamento delle sabbie avviene, in genere, all'interno dei porti, e sarà sufficiente intrappolarle prima dell'ingresso nel sorto per poterle impiegare per ripascimenti artificiali. Depositi di sabbia limosa anche non inquinata possono, se mossi liberare notevoli quantità di nutrienti, per cui il loro impiego, su spiagge adiacenti a corpi d'acqua tendenzialmente eutrofici, dovrà essere fatto con attenzione e scegliendo il periodo adatto nel corso dell'anno.

Il problema dei danni provocati al litorale da moli e canali di accesso non può e non deve essere scisso dalla progettazione del porto stesso, non perché esso stravolga l'analisi costi-benefici e pertanto la fattibilità della struttura, ma perché, se il sistema di bypass viene analizzato e, ove opportuno, progettato e realizzato in coordinazione con le strutture portuali, esso risulta assai più economico e non comporterà la necessità di riparare i danni diversamente arrecati.

#### 3.5.2 Indicazioni per il progetto

Per la progettazione di moli dovranno essere condotte, oltre alle indagini già descritte circa i livelli di marea, il regime delle onde, il trasporto dei sedimenti, anche indagini geognostiche per assicurare la stabilità statica della fondazione.

Per ridurre l'ingresso di sabbie nel porto e mantenere in qualche misura dragato naturalmente il canale di accesso, si può fare un uso attento della riflessione prodotta da parte delle strutture e delle correnti di ritorno derivanti dalla tracimazione (di acque non cariche di sabbia).

Il mantenimento dei fondali alla bocca, quando esista un bacino di espansione all'interno, può essere affidato alle correnti di marea. In corrispondenza di foci fluviali, le correnti indotte dalle piene possono essere prevalenti. In entrambi i casi si determina un fondale a cui sono associate correnti di velocità tali da produrre il trasporto di sedimenti necessario (circa nullo per bocche lagunari).

### 3.6. Dune ed argini a mare

Le dune possono essere mobili o fisse; le prime sono costituite da sabbia incoerente mossa dai venti, le seconde sono fissate dalla vegetazione che in parte con le radici, in parte con l'humus prodotto, dà coerenza e capacità di trattenere umidità alle sabbie.

Il passaggio da un tipo all'altro è reversibile, avendosi in genere dune mobili in ambienti molto ventosi ed aridi e dune fisse in ambienti più favorevoli; esso è però difficile nel senso che ognuno dei due tipi, una volta che si è instaurato, genera delle situazioni che inibiscono l'altro. Le dune fisse hanno benefici effetti sul retrospiaggia:

- costituiscono un argine alle acque alte;
- costituiscono un accumulo di sabbia che alimenta la spiaggia occasionalmente in erosione;
- costituiscono una barriera frangivento che trattiene le sabbie e il salmastro, proteggendo il retrospiaggia.

Gli argini a mare sono un sostitutivo artificiale delle dune e realizzano praticamente solo il primo dei suddetti benefici, essendo in genere, quando esposti sulla spiaggia, difesi sul lato mare da un rivestimento in pietrame con o senza bitume.

L'efficienza come argine idraulico è determinata dalla minima quota della sommità, e pertanto a parità di quota media o volume, sarà maggiore per un argine che non per una duna che ha sommità più irregolare. Nei nostri climi le dune si mantengono naturalmente, senza oneri se non quelli derivanti dalle limitazioni all'uso del suolo.

Non vi è dubbio che, dove le dune esistono ancora, per proteggere il retrospiaggia dall'acqua alta convenga, ove insufficienti, provvedere alla manutenzione di queste, colmando qualche avvallamento, ecc.. Dove sono state rase per costruire insediamenti edilizi, esse possono risultare forse troppo ingombranti o poco efficaci, se ricostruite a tergo di questi.

La manutenzione della duna deve comprendere, oltre alle operazioni che ne determinano la integrità come argine (quota e consistenza del coronamento), anche quelle che ne assicurano la sussistenza come sistema ecologico, a carattere prevalentemente vegetazionale; queste ultime sono: mantenere pingue la falda di acqua dolce sottostante le dune, evitando il prelievo da pozzi superficiali, e facilitando la percolazione delle acque piovane (non paiono opportune le usuali fognature per acque bianche, che drenando e allontanando rapidamente le acque ne impediscono la percolazione), conservare la struttura di barriera naturale, anche e soprattutto nelle sue parti meno appariscenti ma più esposte che fronteggiano il mare, come la zona erbacea che fissa le sabbie (vegetazione colonizzatrice, caratterizzata in genere dalla presenza di *Ammophila arenaria*) e quella cespugliosa retrostante (caratterizzata in genere dalla presenza di ginepro e/o livello spinoso, vegetazione schermante).

La struttura vegetazionale della duna può essere usata anche come indicatore di erosioni in atto. Infatti, in fase regressiva della spiaggia vengono a trovarsi esposte sulla riva associazioni che non hanno funzione colonizzatrice o schermante.

Particolare attenzione dovrà essere riservata alle foci fluviali.

Le indagini effettuate negli ultimi decenni hanno dimostrato, senza possibilità di dubbio, che sono proprio queste le aree dove si sono manifestate nel dopoguerra le erosioni più intense.

Le foci, un tempo molto prominenti, stanno nettamente spostandosi su di una posizione più arretrata di maggior equilibrio, a causa del diminuito apporto solido fluviale di fondo.

Così, la linea di riva tende sempre più ad avvicinarsi ad una retta per il forte arretramento delle parti prominenti (foci) rispetto alle zone concave (aree interfocali).

Le foci, d'altro canto, sono praticamente l'unica fonte di rifornimento delle spiagge alimentate dai corsi d'acqua, sia perché da esse si diffondono gli apporti solidi fluviali e sia perché il materiale proveniente dalla loro erosione va a rifornire le aree interfocali.

Impedire l'arretramento delle foci o addirittura voler recuperare spiaggia con scogliere foranee o con pennelli è estremamente dannoso per l'equilibrio dei litorali.

Gli apporti solidi fluviali verrebbero in gran parte intrappolati da tali difese; inoltre una maggior percentuale di essi verrebbe dispersa verso il largo, perché questi manufatti prolungherebbero in qualche modo le foci verso fondali più profondi.

Le difese, inoltre, impedendo l'erosione delle foci, eliminerebbero un'essenziale fonte di rifornimento alle spiagge adiacenti, innescando l'erosione nelle aree interfocali o aggravandola se già in atto.

D'altra parte, proteggere aree con così forte tendenza all'arretramento sarebbe costoso e darebbe, per lo più, mediocri risultati.

Ciò vale non solo per gli interventi di tipo "tradizionale" (scogliere foranee, pennelli ecc.), ma anche per i ripascimenti artificiali.

Analoghe negative conseguenze si avrebbero qualora venissero costruiti moli fluviali in corrispondenza o in prossimità di una foce.

Alle aree di foce, dunque, dovrà essere permesso di evolversi liberamente, a meno che, naturalmente, l'erosione non porti alla distruzione di importanti beni economici, naturali o storico-artistici.

Arretrando, esse si collocheranno su una linea di maggior equilibrio, più facilmente difendibile.

A quel punto si potrà eventualmente intervenire con difese "leggere" che servono a bloccare o attenuare la residua tendenza all'arretramento, senza impedire il trasporto dei sedimenti lungo riva.

Questa strategia è possibile, naturalmente, solo in quelle foci che non sono ancora state urbanizzate fino a pochi metri dal mare.

In tali aree non si dovrà assolutamente costruire se non ad una opportuna distanza di sicurezza, superiore a quella adottata per le spiagge interfocali.

Se in qualcuna delle foci non ancora urbanizzate alcuni singoli edifici si trovassero troppo vicini a riva, tanto da venir distrutti dall'arretramento del litorale, sarà necessario lasciarli al loro destino, qualora sia più conveniente per la vita delle spiagge ricostruirli più all'interno che proteggerli.

### 3.7. Indicazioni per la scelta del tipo di opera

Premesso che la scelta strategica fondamentale deve essere "non preconstituire quelle situazioni di fatto che plausibilmente richiederanno interventi riparatori di urgenza", i fattori determinanti il tipo di opere possono essere:

- l'urgenza;
- il tipo di regime dei trasporti longitudinali;
- l'importanza della marea;
- la stabilità morfologica del paraggio;
- la finalità dell'intervento.

L'urgenza porta a scegliere quelle opere che non hanno grosse controindicazioni, per cui possono essere attuate senza approfonditi studi, e che coinvolgono piccoli volumi di materiale e quindi piccoli costi in genere.

L'urgenza, anche la più estrema, non deve essere addotta a giustificazione di interventi palesemente antieconomici, in quanto, pur se frettolosa, una stima dei beni difesi e dei costi può sempre essere fatta e ciò indipendentemente dalla salvaguardia della vita umana, che è garantita assai più da provvedimenti di sgombero che non da opere di difesa, le quali di necessità coinvolgono tempi che si misurano in giorni.

Poiché, per ottenere la difesa duratura del bene in oggetto, si dovrà intervenire in seguito con altre opere, l'urgenza non dovrà condurre alla realizzazione di difese di costo superiore al 30% circa del valore dei beni difesi dall'erosione, che potrebbe manifestarsi nel lasso di tempo necessario per progettare e realizzare un intervento più meditato.



Si distinguono qui i seguenti tipi di urgenza:

- a) estrema; l'intervento deve essere iniziato subito (entro 15 giorni), in assenza di un formale progetto;
  - b) media; l'intervento deve essere iniziato entro 1 anno, ma possono essere programmate ed eseguite parte delle indagini necessarie alla corretta progettazione;
  - c) generica; possono essere eseguite tutte le indagini necessarie, pur nei tempi imposti dall'urgenza dell'intervento.
- Come tipi di regime del trasporto litoraneo sono stati schematicamente individuati i seguenti:
- d) trasporto litoraneo assente o insignificante rispetto ai movimenti trasversali alla spiaggia;
  - e) deriva litoranea (trasporto netto) assente o insignificante rispetto ai trasporti lordi;
  - f) deriva litoranea modesta ma ben definita;
  - g) trasporti litoranei importanti ma con deriva mal definita;
  - h) trasporti litoranei importanti e deriva ben definita.

Per l'importanza della marea si distinguono due classi:

- i) insignificante; escursioni di livello contenute in mezzo metro circa;
- l) importante; escursione di marea abituale dell'ordine di mezzo metro o più e/o possibilità d'acqua alta di altezza superiore al metro

Convien, infine, osservare che la instabilità morfologica del pareggio, è inversamente legata alle dimensioni spaziali delle grandi forme caratterizzanti la riva ed alla altezza della spiaggia attiva nella sua più ampia accezione, e direttamente alla erodibilità della costa; si distinguono le seguenti classi:

- m) insignificante; ad es. falesie;
- n) modesta; ad es. spiagge sottili di grande estensione e spiagge a tasca (pocket beach);
- o) importante; ad esempio cuspidi focali e piccole unità fisiografiche con forti trasporti. Il tipo di regime del

L'importanza della marea porta a scegliere strutture, la cui risposta funzionale sia poco sensibile alle variazioni del livello del mare, mentre l'instabilità morfologica dovrebbe orientare il progettista verso la scelta di strutture con costo iniziale e vita presunta limitati.

Infine è necessario distinguere fra opere di difesa della spiaggia, a cui si richiede la conservazione o il protrimento della spiaggia stessa, dalle opere di difesa della costa, in cui, vedi il caso delle difese parallele, la finalità può essere raggiunta anche a scapito della conservazione della spiaggia.

In particolare possono darsi le indicazioni seguenti.

-I pennelli sono consigliabili dove la deriva litoranea è ben definita per ridistribuire lungo il litorale gli apporti fluviali in ragione diversa da quella derivante dal regime ondoso e dalla configurazione attuale del litorale; ad es. per la stabilizzazione di apparati focali andati in erosione per il ridursi, senza annullarsi, degli apporti solidi sabbiosi. Essi risultano abbastanza insensibili alla marea, ma debbono essere ben radicati a terra ed impiegati con prudenza in litorali morfologicamente labili.

-I frangiflutti foranei sono da consigliare dove l'escursione di marea ed il trasporto litoraneo sono modesti.

-Rivestimenti e soprattutto muri di sponda sono in genere da sconsigliare per la stabilità della spiaggia, ad eccezione di opere di modesto rilievo, che vengono interessate dall'onda solo in condizione di acqua alta eccezionale o quasi.

-Le difese parallele, frangiflutti foranei e difese radenti, non sembrano consigliabili dove, la conformazione della costa è rapidamente variabile.

-I ripascimenti artificiali sono da consigliare su piccola scala dove il trasporto è modesto; si prestano ottimamente sia dove l'escursione di marea è forte sia dove -la morfologia è labile.

Dove il trasporto litoraneo è consistente, i ripascimenti potranno essere abbinati ad opere di contenimento al fine di ridurre gli oneri di manutenzione.

Interventi a difesa delle dune possono consigliarsi dove, per la presenza di forti venti foranei, sono temibili perdite significative di sabbia verso il retrospiaggia e dove, essendo il retrospiaggia basso, sono particolarmente temibili gli effetti dell'acqua alta.

Il complesso è riassunto nel quadro seguente dove, al variare della caratterizzazione fisica del paraggio, viene indicato il grado di idoneità di ciascun tipo di intervento; l'idoneità è indicata nel modo seguente:

3 soluzione consigliabile

2 soluzione idonea

1 soluzione accessoria

+ soluzione idonea o accessoria per qualche forma del tipo, inefficiente per altre

0 soluzione inefficiente

\* soluzione sconsigliabile.

Quadro schematico per la scelta del tipo di opera per difese di spiaggia.													
Caratterizzazione del paraggio													
Tipo di intervento	urgenza			trasporto litoraneo					marea		instabilità morfologica		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l	m	n	o
Pennelli	*	1	2	0	1	3	2	2	1	2	2	1	*
Frangiflutti foranei	*	0	2	2	3	+	2	+	2	1	2	1	0
Difese aderenti	2	+	*	1	0	0	*	*	1	2	2	1	*
Ripascimenti	3	3	2	3	2	2	1	1	2	2	1	2	3
Conservazione dune	1	2	2	1	2	0	2	0	2	2	0	2	2

Si fa esclusivo riferimento in esso ad opere di difesa della spiaggia e del retrospiaggia, che sono le più diffuse.

La suddivisione delle opere per tipi è in larga misura schematica; esistono strutture e interventi che hanno caratteristiche proprie di tipi diversi, o risultano dal combinato di tipi diversi.

Così è, per esempio, di pennelli, consigliati da taluni, aventi la testa rivolta sottoflutto e formante un angolo non grande rispetto alla riva, o frangiflutti disposti obliqui e non distanti da riva, sì che una delle teste viene di fatto a radicarsi a terra. Oppure il caso di ripascimenti contenuti fra pennelli e/o barriere foranee.

Pare opportuno chiarire che la differenza fra un ripascimento e un rivestimento in massi gettati alla rinfusa, consiste soprattutto nella dimensione dei granuli-massi impiegati in rapporto ai grani-ciottoli della spiaggia. La forte preferenza, che viene data ai ripascimenti rispetto ai rivestimenti, deriva dalla constatazione dei problemi di stabilità del fondo che si riscontrano in prossimità e sotto la struttura, quando questa è costituita di grossi massi (stabili su pendenze elevate). Ciò non toglie che, per interventi di urgenza, considerato il minor volume del versamento, possa convenire impiegare massi anche grossi; in tal caso, però, non sembra opportuno versare solo massi grossi, ma un misto graduato che possa vagamente costituire un filtro rovescio e, passata l'urgenza estrema, versare ancora del materiale intermedio, per consentire un passaggio di dimensioni più graduale dalla spiaggia sommersa alla zona di versamento di massi.

### 3.8. Il monitoraggio di controllo delle opere

Si torna a ribadire che per una efficace politica di protezione costiera, e' indispensabile che i litorali siano oggetto di un monitoraggio sistematico, idoneo a tenere sotto controllo la loro evoluzione. E ciò soprattutto per verificare l'efficacia delle opere realizzate per la difesa delle coste.

A tale scopo, il monitoraggio dovrà essere finalizzato al rilevamento:

- delle caratteristiche significative dello stato del mare e delle correnti litoranee prodotte dal moto ondoso nella fascia costiera compresa fra i primi frangenti e le linea di riva;
- della configurazione del fondo, nella zona prima citata, e della spiaggia emersa;
- delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti costieri;

La scansione temporale e la durata dei suddetti rilievi dovranno commisurarsi all'importanza dei fenomeni e, in ogni caso, dovranno essere tali da consentire l'interpretazione e la quantificazione dei fenomeni di idrodinamica costiera e le modificazioni in atto.

Nella impossibilità di poter eseguire i rilievi anzidetti, una indicazione sulla tendenza evolutiva del litorale può essere fornita dall'osservazione sistematica della linea di riva, eseguita con semplici rilievi topografici da terra o con riprese fotografiche.

## 4. ELABORATI DI PROGETTO

L'approfondimento delle indagini e il dettaglio e l'attenzione nelle verifiche di progetto debbono essere proporzionati all'importanza dell'opera, in misura da garantire la convenienza a realizzare l'opera stessa. Essi cioè debbono essere approfonditi fino a che il costo marginale derivante da questi risulta inferiore all'analogo costo derivante dal rischio di un insuccesso dell'opera; l'approfondimento è opportuno che sia diretto a quelle voci che risultano critiche in quanto caratterizzate da un elevato rapporto rischio/costo.

Il suesposto principio va concretizzato nella relazione di progetto, ad evitare che diversamente, per l'ampia soggettività del concetto di rischio, possa prestarsi ad interpretazioni diverse.

Si deve rilevare, peraltro, come alcune indagini che paiono opportune trovano giustificazione in un'ottica che trascende il singolo intervento e quindi il succitato criterio di approfondimento.

Si richiamano qui espressamente, per quanto applicabili le vigenti disposizioni per la compilazione di progetti di opere pubbliche (D.M. 29/5/1895 modificato con D.P.C.M. 15/7/1947 n. 763) e, inoltre, le leggi 2/2/1974 n. 64 con i successivi DD.MM. 3/3/1975 e 26/1/1981 (norme antisismiche) e D.M. 11/3/1988 (norme geotecniche), le leggi 10/5/276 n. 319 e 24/12/79 n. 650 con le successive modificazioni (legge Merli), la legge 431/85, la legge 183/89 (legge per la difesa del suolo) e successivo regolamento.

### 4.1. Elaborati descrittivi

In particolare si ritiene che ogni progetto debba essere corredato della corografia, estendentesi all'unità fisiografica di cui il sito previsto per l'opera fa parte. Similmente esso dovrà essere corredato di una (o più) planimetria del retroterra, in cui siano evidenziate infrastrutture ed uso del suolo, con particolare riguardo a quelle sulle quali sono possibili effetti e/o dalle quali trae ragione l'opera stessa, e di una (o più) batimetria aggiornata ed estendentesi a profondità adeguata, comprendente la spiaggia, le opere esistenti o in corso di realizzazione e le opere previste dal progetto.

Il rilievo della situazione dei luoghi antecedente la costruzione della opera è essenziale sia per affiancare la contabilità dei lavori, sia per valutare gli effetti dell'opera stessa e, a lungo termine, razionalizzare gli interventi. Esso è atto inderogabile e deve essere affidato ad ente o persona che dia garanzia di obiettività.

Qualora nel progetto si faccia riferimento a dati non recentissimi, il rilievo va ripetuto prima dell'inizio dei lavori.

Ogni progetto dovrà contenere informazioni circa il regime meteomarinico del paraggio interessato con dettaglio e profondità adeguati all'importanza dell'opera. Da tale regime devono desumersi le condizioni prevalenti e le condizioni estreme di funzionamento dell'opera, per quanto riguarda livello del mare, agitazione ondosa e vento.

Dovrà essere individuata l'unità fisiografica nella sua estensione e nella dinamica essenziale, almeno come indicato al par 2.1.

Dovranno essere prodotti i piani d'onda (diagrammi di rifrazione e diffrazione) relativi alla zona interessata dalla struttura nel caso di frangiflutti foranei emergenti e moli e, limitatamente ai casi di una certa importanza, nel caso di pennelli, difese radenti, ripascimenti e barriere sommerse. I suddetti piani dovranno essere prodotti per le ondatazioni prevalenti e, limitatamente ad opere di maggiore importanza, dominanti.

L'analisi della dinamica della spiaggia (dinamica trasversale e longitudinale, trasporti litoranei e distribuzione sulla spiaggia sommersa) dovrà essere condotta in maniera qualitativa per pennelli e frangiflutti foranei, sia in assenza che in presenza dell'opera, evidenziando i segni presenti in natura a conferma di tale analisi.

La stessa deve essere condotta anche in via quantitativa per tutte le opere di una certa importanza.

Infine dovranno essere prodotti tutti i disegni individuanti l'opera, e, ove rilevanti, le modalità costruttive nonché la documentazione relativa ad opere, interventi e sistemazioni finalizzate alla mitigazione dell'impatto visivo-percettivo sulla componente paesistico-ambientale.

### 4.2. Elaborati di verifica

Dovrà essere valutato il bilancio sedimentario dell'area interessata dall'opera in assenza e in presenza della stessa. Per opere di modesto rilievo e che incidono solo su alcune voci del bilancio stesso, sarà sufficiente valutare queste voci o le alterazioni indotte su di esse.

Dovranno essere condotte valutazioni della risalita, della tracimazione dell'onda, della stabilità degli elementi singoli, della statica dei muri di sostegno, della stabilità globale della fondazione e ogni altra verifica necessaria ad assicurare la stabilità dell'opera per tutte le sollecitazioni che la interessano.

I profili di equilibrio assunti per la spiaggia dovranno derivare da profili rilevati nel paraggio per similitudine o per interpretazione con modelli dinamici accreditati.

---

Ogni progetto dovrà contenere infine un'analisi della sua giustificazione economica, condotta valutando costi e benefici con dettaglio proporzionato all'importanza dell'opera, ed in particolare:

- costo di costruzione dell'opera e della sua manutenzione;
- costo dei danni arrecati ai litorali adiacenti;
- benefici derivanti alle spiagge protette;
- benefici indiretti derivanti ad aree limitrofe o alla comunità sociale.

Costi e benefici dovranno essere attualizzati al momento della costruzione.

Ove i costi superassero i benefici manifesti, dovrà essere fatta esplicita menzione della finalità, economicamente non quantificabile, giustificante l'opera.

#### 4.3. Prove su modello

Per accertare il funzionamento delle opere, sia ai fini della stabilità delle stesse che ai fini degli effetti sulla costa, si realizzano spesso modelli fisici o matematici (e talvolta entrambi).

Questi altro non sono che strumenti di valutazione degli effetti, quando questi effetti non sono valutabili tramite semplici formule e brevi calcolazioni.

Un fenomeno è modello di un'altro, detto prototipo, se esiste fra di loro similitudine meccanica.

Nei modelli fisici in scala i fenomeni in modello e prototipo sono gli stessi, mentre differiscono essenzialmente le dimensioni.

Nei modelli matematici o numerici, ai fenomeni nel prototipo corrispondono relazioni fra le grandezze coinvolte, evidenziate in forma matematica o numerica.

Lungi dall'essere una panacea, i modelli in sede preventiva richiedono la identificazione:

- dei fenomeni fisici rilevanti ai sensi di quanto si vuole evidenziare: i modelli infatti sono sempre modelli parziali, essi rappresentano in modo fedele alcuni fenomeni, mentre distorcono o cancellano altri fenomeni; ci si dovrà pertanto accertare che tutti i fenomeni rilevanti in prototipo siano rappresentati in modello e che non siano eccessivamente amplificati fenomeni irrilevanti nel prototipo;

- dei dati necessari per l'esecuzione del modello: un modello, essendo un mero strumento di elaborazione o trasformazione dei dati, non fornisce risultati più attendibili dei dati su cui è basato, aggiungendosi all'incertezza dei dati la incertezza sulla esattezza del modello.

Nota l'attendibilità dei dati disponibili ed il programma delle prove necessarie ad accertare quanto desiderato, si sceglierà il modello parziale più idoneo, cioè quello che per affidabilità dello strumento e per capacità di convincimento, per tempi e costi di esecuzione risulta ottimale.

A favore dei modelli fisici può addursi la capacità di rappresentare fenomeni complessi come la turbolenza o il frangimento delle onde, la cui rappresentazione analitica è difficile e spesso solo approssimativa.

Per converso la necessità pratica di realizzare il modello in scala fortemente ridotta comporta sistematicamente effetti scala legati alla viscosità dell'acqua ed alla tensione superficiale all'interfaccia acqua-aria di fatto non riprodotte nel modello.

Di conseguenza, gli spettri dell'onda e della turbolenza in modello risultano tagliati alle alte frequenze, modificato a volte il regime del moto in prossimità della parete, ridotta in genere la mobilità di particelle al fondo e l'areazione dell'acqua.

Per ogni particolare effetto scala, come vengono usualmente chiamate queste distorsioni, esistono accorgimenti compensatori, che a loro volta però inducono altri effetti scala.

Ad esempio, l'uso di sedimenti leggeri e di maggior diametro per ovviare ai problemi legati alla viscosità, determinano un incremento della permeabilità del fondo e, usando materie plastiche di piccole dimensioni, altri fenomeni legati alla diversa affinità elettrochimica per l'acqua.

I modelli matematici sono particolarmente indicati per rappresentare fenomeni, la cui dinamica è ben nota, ad esempio la propagazione ondosa, e che si svolgono intrinsecamente in spazi di grande estensione, talché risulta estremamente onerosa la realizzazione di un modello fisico affidabile.

Possono ancora fornire un valido supporto, anche nei casi in cui la eliminazione di ogni effetto scala rilevante in modello fisico è impossibile, come ad esempio per la movimentazione di sedimenti molto sottili; in questi casi entrambi i modelli hanno un carattere più qualitativo che quantitativo ed una calibrazione appare necessaria.

Molte delle perplessità connesse all'uso dei modelli risultano, tuttavia, attenuate, quando i modelli stessi vengono impiegati per confrontare fra loro comportamenti di opere differenti ed alternative e non già per riprodurre gli effetti di un singolo intervento.

Nel seguito si forniscono alcune indicazioni per la scelta ed il controllo della esecuzione del modello.

#### 4.3.1 Modelli fisici

Per modelli fisici si intendono i modelli in scala, cioè combinazioni prototipo-modello, in cui si realizzano gli stessi fenomeni di rilievo a meno di fattori di scala.

Il modello rappresenta in questo caso una immagine ridotta, ma fedele, del prototipo, almeno per quanto attiene agli elementi giudicati rilevanti.

##### 4.3.1.1 Modelli di propagazione ondosa

I modelli sono normalmente realizzati secondo la regola di similitudine di Froude (scala dei tempi e delle velocità pari alla radice della scala delle lunghezze)

Si sconsiglia l'uso in modello di onde di lunghezza sensibilmente inferiore ad 1 m., per gli effetti scala legati alla tensione superficiale ed alla viscosità.

Quando il fenomeno prevalente che si desidera rappresentare è costituito dalla rifrazione dell'onda su fondali lentamente e regolarmente variabili in ampi specchi d'acqua, è d'uso distorcere le scale orizzontali e verticali del modello, riducendo maggiormente le orizzontali rispetto alle verticali.

In questo caso, la fedele rappresentazione delle celerità dell'onda in tutto il campo delle profondità relative possibili richiede che il periodo dell'onda (e di conseguenza la lunghezza) sia ridotto secondo la regola di similitudine di Froude relativa alla scala delle verticali.

I fenomeni di diffrazione risultano distorti, non risultando in scala la lunghezza dell'onda rispetto alle distanze orizzontali.

Anche la riflessione delle scarpate risulta distorta, nella fattispecie incrementata, similmente la posizione e la forma dei frangenti risentono in qualche misura della distorsione delle pendenze dei fondali.

Per tutti questi motivi, una distorsione geometrica fino ad 1:2 può essere accettata con una certa tranquillità risultando anche benefica per compensare gli effetti di scala legati alla capillarità ed alla viscosità.

Distorsioni geometriche più forti richiedono una attenta valutazione degli effetti indotti.

Quando i fenomeni prevalenti sono costituiti dalla riflessione e dalla diffrazione, di norma non si distorce geometricamente il modello, o, in presenza di una piccola distorsione, la lunghezza d'onda è ridotta nella scala delle orizzontali.



Secondo questi criteri sono normalmente realizzati i modelli in vasca di opere adottando una scala di norma non inferiore a 1:100. La rifrazione può essere dovuta anche a correnti. Lo studio sul modello dei fenomeni associati è però raro, per lo più a causa della mancanza di precise indicazioni sulle correnti.

Nei casi in cui la corrente in prototipo possa raggiungere intensità dell'ordine di 1 m/s (equivalente alla alterazione del fondale di circa un metro) gli effetti di tali correnti dovranno essere valutati e, ove opportuno, le correnti riprodotte in modello.

I dati necessari sono costituiti da:

- batimetria dell'area;
- scabrezza equivalente dei fondali;
- clima ondoso al largo, ovvero il complesso di onde (altezza, periodo, direzione ed, eventualmente, spettri in frequenza e direzione associati) di cui si desidera rappresentare la trasformazione;
- sovrizzo di marea concomitante alle onde;
- eventuali correnti concomitanti.

#### 4.3.1.2 Modelli di interazione con strutture composte di grandi elementi

Si fa riferimento a frangiflutti od altre opere a mare i cui elementi principali sono, in prototipo e modello, sufficientemente grandi da escludere per essi rilevanti effetti della viscosità e della capillarità.

Finalità principale di questi modelli è di regola accertare la resistenza dell'opera progettata agli attacchi ondosi previsti.

Le prove vengono condotte secondo la regola di similitudine di Froude con scala delle densità (masse specifiche) fissata.

Spesso si considera che il fluido nel prototipo e nel modello abbiano la stessa densità, trascurando la maggiore densità dell'acqua salata (+2.5%) nel prototipo rispetto a quella dolce impiegata in modello.

Si raccomanda di verificare comunque la densità effettiva dei solidi impiegati in modello in quanto scarti di alcuni punti percentuali rispetto ai valori usuali non sono infrequenti e possono risultare di qualche importanza.

Per modelli di strutture complesse, risultando a volte difficile ottemperare esattamente alla scala delle densità, si segnala che le caratteristiche essenziali che debbono essere accuratamente ridotte sono la sezione d'urto esposta all'onda ed il peso della struttura nelle condizioni effettive di immersione; si potrà pertanto operare sugli spessori delle menbrature in modo da ottenere in scala le caratteristiche sopra menzionate.

Effetti scala si hanno di regola nel nucleo e nella fondazione per le ridotte dimensioni dei meati in essi presenti.

Di regola si distorcono leggermente le dimensioni dei granuli di questi elementi della struttura, così che la permeabilità risulti ridotta in scala.

Effetti scala di fatto ineliminabili rimangono in relazione ai fenomeni di aerazione dell'acqua (inibita in modello rispetto al prototipo) e di resistenza strutturale degli elementi (esaltata in modello).

In particolare questo secondo effetto riveste notevole importanza per grandi elementi snelli (esempio dolos di peso superiore a 20 t).

Per questi elementi, il modello accerta soltanto la stabilità idraulica dell'elemento, cioè accerta che l'elemento non venga rimosso dall'onda, dato per certo che esso rimanga integro, mentre la resistenza strutturale alle sollecitazioni a cui viene sottoposto deve essere accertata per altra via.

Risulta opportuno in questi casi registrare durante le prove eventuali ondeggiamenti degli elementi, che, pur non portando alla rimozione dell'elemento, possono determinare negli urti di fine corsa sollecitazioni assai gravose per l'elemento.

Quale che sia l'onda di progetto prevista, e bene che le prove vengano condotte in condizioni di sollecitazione crescente fino al completo danneggiamento dell'opera.

Normalmente l'altezza d'onda incidente è un parametro idoneo ad ordinare le condizioni di attacco ondoso secondo la sollecitazione indotta.

Fa eccezione il caso, peraltro non infrequente, di onde frangenti con frequenza apprezzabile sui fondali antistanti l'opera; in questo caso sia il periodo dell'onda che, soprattutto il livello medio dell'acqua, rivestono un ruolo importante.

Il periodo dell'onda e l'associata forma dei frangenti hanno sempre un certo effetto sulla stabilità dei massi di una gettata; al crescere del periodo, a parità di pendenza del paramento e di altezza dell'onda incidente, la stabilità dei massi decresce per frangenti di tipo a cascata ("plunging") e cresce per frangenti di tipo a risalto ("surging"), il primo comportamento verificandosi quando il numero di Iribarren (rapporto fra la pendenza della scarpa e la radice della ripidità dell'onda al largo) non supera 2,5 circa.

Acquista importanza, nel caso di onde irregolari la durata della mareggiata, in relazione alla quale cresce la probabile onda massima che investe l'opera. L'attacco ondoso, sia in termini di durata effettiva sia in termini di onde indipendenti, dovrà essere commisurato alla presunta durata della mareggiata di progetto.

Molti fra questi modelli vengono effettuati in canaletta con attacco ondoso rigorosamente ortogonale.

Il dispositivo sperimentale, preferito per ovvie ragioni di economia, non consente peraltro di evidenziare fenomeni intrinsecamente tridimensionali, quali quelli che si verificano ad esempio alla testata di un molo.

Anche per strutture a gettata dinamicamente stabili (in cui l'equilibrio corrisponde ad un bilanciamento statistico dei movimenti dei massi e non alla immobilità degli stessi) si dovranno valutare attentamente gli effetti della obliquità degli attacchi ondosi.

In questi casi, per le strutture più importanti, sarà opportuno affiancare a prove in canaletta, finalizzate a definire la sezione corrente dell'opera, prove in vasca per la configurazione finale di progetto o per le testate.

I dati necessari per questo tipo di prove sono:

- progetto completo dell'opera;
- statistica delle onde estreme: caratteristiche della massima ondatazione (altezza e periodo, nonché eventualmente forme spettrali presunte in frequenza e direzione) per ogni settore di provenienza ed al variare del tempo di ritorno dell'evento.

#### 4.3.1.3 Modelli di spiaggia

Le piccole dimensioni dei granuli componenti la spiaggia non consentono generalmente di rappresentare fedelmente tutti i processi che compongono il trasporto dei sedimenti.

Poiché gli attacchi ondosi sono di regola ridotti in modello, secondo il criterio di similitudine di Froude, la scelta dei sedimenti da impiegare nelle prove viene effettuata così che risultino riprodotte in scala o la velocità dell'acqua che dà inizio al movimento o la velocità di sedimentazione, secondo che il moto dei sedimenti sia incipiente o sviluppato.

Per sedimenti fini, i due criteri portano a risultati alquanto diversi, a riprova della impossibilità di ottenere una similitudine completa.

Si dovranno comunque utilizzare sedimenti di dimensioni non così fini da far insorgere fenomeni di coesione anche appena percettibili.

Per ovviare a questi problemi sono stati impiegati in modello sedimenti leggeri.

L'esperienza si è dimostrata non sempre soddisfacente, manifestandosi sovente effetti scala legati vuoi alla imperfetta riduzione delle forze di inerzia, vuoi alla diversa affinità elettrochimica per l'acqua.

La riduzione dei sedimenti non in scala, entro ragionevoli limiti, ha come principale effetto l'alterazione delle pendenze trasversali della spiaggia, effetto che è stato osservato e quantificato ed è pertanto prevedibile.

Si può pertanto operare con un modello geometricamente distorto, con le orizzontali maggiormente ridotte rispetto alle verticali, così da avere un modello più piccolo in pianta e sedimenti non troppo fini.

Come si è accennato dianzi la distorsione geometrica ha effetti non trascurabili sulle onde e ne vanno valutati attentamente gli effetti quando supera il rapporto di 2:1.

Per questo tipo di modelli sono necessari i dati seguenti:

- batimetria (topografia della spiaggia emersa e sommersa) dell'area di studio,
- natura e composizione granulometrica dei fondali,
- clima ondoso,
- livelli di marea concomitanti.

Nei modelli di spiaggia, che risentono in varia misura di tutte o quasi le onde incidenti, è importante riprodurre in modello un complesso di attacchi ondosi rappresentativo del clima, tenuto conto della intensità degli effetti prodotti e della durata di ognuno di questi.

#### 4.3.2 Modelli matematici o numerici

Per modelli matematici si intendono un complesso di variabili e di relazioni fra queste, sufficienti a determinare univocamente una soluzione. La ricerca della soluzione può farsi in diversi modi: in forma analitica quando si ricavano valori o funzioni che soddisfano esattamente al problema, in forma numerica, quando viene identificato un algoritmo che fornisce con una sufficiente approssimazione la soluzione.

Il grande sviluppo degli elaboratori ha reso quest'ultima forma di soluzione di gran lunga la più frequente.

##### 4.3.2.1 Modelli della propagazione ondosa

Possono distinguersi fra modelli di rifrazione e modelli di diffrazione pura o combinata con la rifrazione (fondali variabili).

I modelli di rifrazione pura sono i più semplici ed adatti a descrivere la propagazione su vasti spazi.

Essi si basano sulla ipotesi-approssimazione che le caratteristiche del mezzo e dell'onda siano lentamente e regolarmente variabili, cioè che fondale, corrente, ampiezza e numero d'onda siano quasi costanti nello spazio di una lunghezza d'onda.

Ogni gruppo d'onde si propaga in modo coerente lungo traiettorie dette raggi, ortogonali alla direzione locale dei fronti d'onda.

Le regole che descrivono queste traiettorie sono quelle note dell'ottica geometrica:

- leggi della rifrazione e riflessione.

I diversi modelli differiscono principalmente per i fenomeni collaterali alla rifrazione che sono in grado di rappresentare: la dissipazione di energia per attrito al fondo, per frangimento, la dispersione in frequenza e direzione dello spettro effettivo, le correnti.

I fenomeni di dissipazione dell'energia per attrito sono importanti soprattutto su piattaforme continentali estese e per onde di lungo periodo.

Il frangimento rappresenta un fondamentale fenomeno limitante l'altezza d'onda, quando i fondali sono a questa comparabili.

La dispersione in frequenza e direzione determina una accentuata regolarizzazione della soluzione ed un modo elegante e rispettoso della fisica del fenomeno per ovviare al problema delle caustiche; considerando diverse armoniche indipendenti, le caustiche, ognuna di intensità infinitesima, si formano in posizioni diverse estendendo ad una zona l'effetto di concentrazione che per l'onda monocromatica è concentrato in un punto.

Quando la dispersione non sia rappresentata è necessario provvedere ad una regolarizzazione dei fondali utilizzati nel calcolo per evitare il formarsi di numerose caustiche non rispondenti alla realtà fisica.

La presenza di correnti modifica alquanto la teoria ed i modelli della rifrazione, sia perché la relazione di dispersione ne risulta influenzata, sia perché si verifica un trasferimento di energia fra campo d'onda e corrente.

Modelli alquanto sofisticati, attualmente in fase di sviluppo più che di applicazione professionale, evidenziano il legame ciclico onde-frangimento-correnti e rappresentano le correnti litorali da onda, importanti per la rappresentazione del trasporto litoraneo in ambienti morfologicamente complessi.

Variazioni rapide del fondale o, più spesso, punti prominenti del contorno che limita lo specchio d'acqua, quali restate di moli e sporgenti, determinano le condizioni, per cui, almeno localmente, l'approssimazione della rifrazione non risulta attendibile.

In questi casi, che si presentano con frequenza particolare negli studi della penetrazione ondosa in bacini portuali o dietro difese di riva, non si può prescindere dal tenere conto del fenomeno della diffrazione, cioè della dispersione della energia radiante sia lungo i raggi che lungo i fronti d'onda.

Esistono quantomeno tre categorie di modelli a questo scopo, citati in ordine di complessità e generalità decrescenti:

- i modelli iperbolici tridimensionali (2H-1T), rappresentanti la propagazione ondosa nel suo effettivo evolvere nello spazio e nel tempo, rimanendo libera la forma della oscillazione nel tempo;
- i modelli ellittici bidimensionali (2H), in cui viene assunta un'oscillazione sinusoidale nel tempo, ma senza alcuna particolare ipotesi sulla distribuzione spaziale del campo d'onda (presenza di importante riflessione dei contorni);
- i modelli parabolici derivanti dalla combinazione di uno schema rifrattivo lungo i raggi con uno schema diffrattivo lungo i fronti (schema non adatto a rappresentare la riflessione dei contorni ma particolarmente tagliato per rappresentare la propagazione dell'onda su fondali rapidamente variabili o l'espansione dell'onda dietro ostacoli).

##### 4.3.2.2 Modelli di trasporto dei sedimenti ed evoluzione morfologica della spiaggia

Essi rappresentano in modo più o meno completo sia la propagazione ondosa, che le correnti indipendenti od indotte, sia, infine, il ciclo di erosione-trasporto-sedimentazione dei sedimenti e la conseguente evoluzione dei fondali.

Nelle forme più complete, sono modelli assai complessi ancora in fase di messa a punto, poco adatti per un utente professionale, ma che probabilmente a breve risulteranno disponibili.

I modelli possono essere distinti in ragione delle dimensioni spaziali dei fenomeni rappresentativi e del dettaglio con il quale i singoli fenomeni vengono rappresentati.

Rispetto alle dimensioni, si possono distinguere i modelli ad una o più linee rispetto ai modelli bidimensionali (nello spazio).

Nei primi i fenomeni che si manifestano in sezioni trasversali alla spiaggia sono trattati in forma globale (modelli ad una linea) o con una discretizzazione limitata e forma della soluzione preassegnata (modelli a 2 o più linee).

Questi modelli sono idonei a simulare il comportamento di lunghi tratti di litorale per lunghi intervalli di tempo, non solo perché l'economia di calcolo derivante dalla dimensione condensata è in questi casi sensibile, ma anche perché alcune delle ipotesi implicite in questi modelli (forma trasversale della sezione invariabile o variabile entro forme preassegnate) sono verificate solo mediamente nello spazio e nel tempo.

Nei modelli ad una linea, il cui prototipo è lo schema di Pelnard-Considère, tutta la fascia attiva della spiaggia si suppone traslata coerentemente.

I modelli differiscono per la forma della relazione caratterizzante il trasporto longitudinale.

I più semplici utilizzano formule, come quella del CERC, che presuppongono un equilibrio locale fra l'azione motrice, l'onda, e l'azione resistente, l'attrito al fondo, associata all'effetto, il trasporto di sedimenti, e condensano la complessità del clima in un'onda equivalente: un'onda di caratteristiche e durata da determinarsi, i cui effetti sono approssimativamente equivalenti a quelli del complesso delle onde componenti il clima.

---

Modelli ad una linea più complessi possono evidenziare in varie forme il bilanciamento non locale, ma mediato attraverso la formazione delle correnti litoranee con la loro inerzia a stabilirsi, fra la forzante ondosa ed il trasporto di sedimenti.

Inoltre, possono rappresentare la variabilità del clima attraverso un complesso di onde rappresentative.

Per stabilire la equivalenza fra un'onda ed un complesso di onde, si usa abitualmente il criterio energetico, fondatesi sulla proporzionalità, valida almeno in prima approssimazione, fra trasporto e "longshore power", unita alla considerazione che la fascia in cui il trasporto si verifica è orientativamente costituita dalla zona dei frangenti, di ampiezza circa proporzionale alla altezza d'onda.

Un buon criterio di equivalenza consiste di conseguenza nello scegliere le caratteristiche dell'onda in corrispondenza a valori centrali (media o mediana) della distribuzione del cumulo nel tempo del longshore power delle onde elementari nel complesso considerato (proporzionale al volume movimentato).

La durata dell'attacco ondoso sarà poi determinata in modo da produrre lo stesso trasporto complessivo (o longshore power cumulo).

Modelli a due o più linee debbono essere di preferenza utilizzati o quando le caratteristiche della spiaggia sono fortemente disomogenee (ad es. ghiaia in prossimità della battigia e sabbie sulla barra) o quando le opere di cui si vuole valutare l'effetto non coinvolgono l'intera fascia attiva della spiaggia, sicché risulta essenziale nella dinamica del fenomeno la modificazione del profilo trasversale della spiaggia indotta dall'opera, modificazione non rappresentabile in un modello ad una sola linea.

Modelli bidimensionali completi sono al momento in fase di sviluppo, per cui non è possibile né descriverli con precisione né tanto meno classificarli.

Nella scelta del modello occorre dapprima far mente locale a:

- i fenomeni principali che si verificano nel prototipo,
- i dati disponibili sul clima ondoso,
- i dati disponibili sui sedimenti di fondo,
- la conoscenza delle condizioni al contorno relative al tratto di litorale da simulare,
- la conoscenza dei livelli di maree concomitanti alle onde,
- la disponibilità di rilievi idonei per una calibrazione del modello.

Di conseguenza si determineranno le caratteristiche del modello e si programmerà una campagna di acquisizione dei dati del prototipo necessaria a complemento di quelli esistenti.

Si sceglierà un modello semplice e robusto, o già verificato in casi simili, quando i dati disponibili a seguito della campagna sono di qualità non eccelsa, riservando a casi ben documentati in prototipo i modelli più complessi.

Sono rari i casi in cui conviene spendere più nel modello che nella campagna di acquisizione dati e di rilievi finalizzati alla calibrazione del modello stesso.



L'Atlante delle opere di sistemazione costiera intende presentare ad un ampio pubblico il panorama completo degli interventi che vengono utilizzati per sistemazione e la difesa delle coste italiane, evidenziandone la funzionalità e la compatibilità paesaggistica e, più in generale, ambientale.

La descrizione delle tipologie delle opere sarà preceduta da alcuni capitoli introduttivi che consentiranno di comprendere il significato della necessità di progettare tali interventi, soprattutto quelli di prevenzione, alla scala di unità fisiografica a causa dell'interdipendenza dei numerosi processi che vi si svolgono; a tal fine saranno utili anche alcuni richiami alla legislazione europea, nazionale e regionale in materia di gestione delle aree costiere.

Questo Atlante completa una serie di pubblicazioni che descrivono, in forma divulgativa, le opere strutturali e non strutturali in uso per la sistemazione dei versanti, delle aste fluviali e delle coste. Il progetto di questa collana è stato sviluppato dal Dipartimento difesa del suolo dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici APAT (ex ANPA). In particolare il presente volume è stato redatto in collaborazione con il Dipartimento tutela delle acque interne e marine.

