



APAT

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

Atlante delle opere di sistemazione costiera

MANUALI E LINEE GUIDA

44/2007



APAT

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

Atlante 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

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	1.0 LA GESTIONE DELLE COSTE IN ITALIA	1
	1.1 Misure legali	3
	1.2 Attività di recupero e ripristino	6
Cap. 2	2.0 DINAMICA COSTIERA	8
	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	3.0 PROGETTAZIONE DELLE OPERE COSTIERE	26
	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	4.0 OPERE PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE MARINA	43
	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.</i> <i>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
	5.0 OPERE DI SISTEMAZIONE IN AREE COSTIERE UMIDE	110
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	6.0 OPERE PER IL CONTROLLO DELLE MAREE	127
	<i>Argini; Sistemi meccanici di paratoie mobili.</i>	
Cap. 7	7.0 OPERE PORTUALI	129
	7.1 Opere di difesa dei porti	137
	Bibliografia	141
	Appendice	147

Generalità

Una 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

In 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

Negli 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:

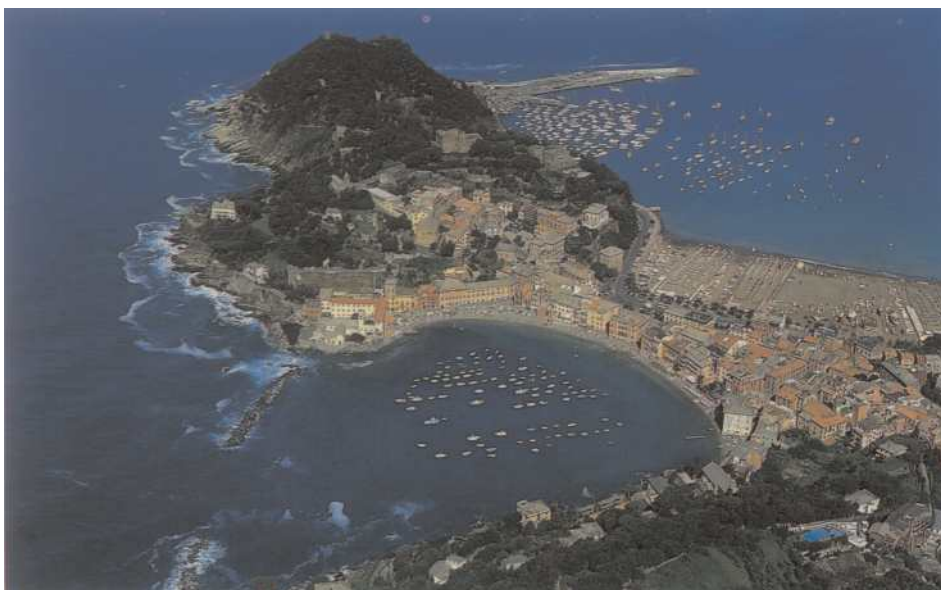


Figura 2.0.2: Porto di Giulianova (TE): Interferenza dell'opera marittima con il regime di trasporto dei sedimenti. Qualunque opera marittima introduce una modifica della naturale dinamica litoranea e interferisce con il regime di trasporto dei sedimenti. Un'opera di protezione limitata ad un breve tratto 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.

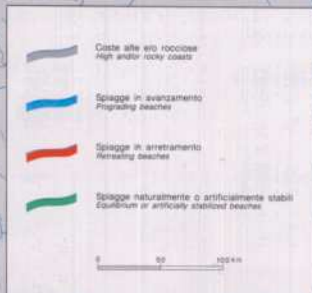
Figura 2.1.1: Ventotene (LT): Cala Parata Grande. Il mare aggredisce ed erode le coste rocciose tramite l'abrasione e la corrosione. L'azione di scalzamento al piede della parete rocciosa ne determina il crollo e quindi l'arretramento, contemporaneamente contribuendo alla formazione della piattaforma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

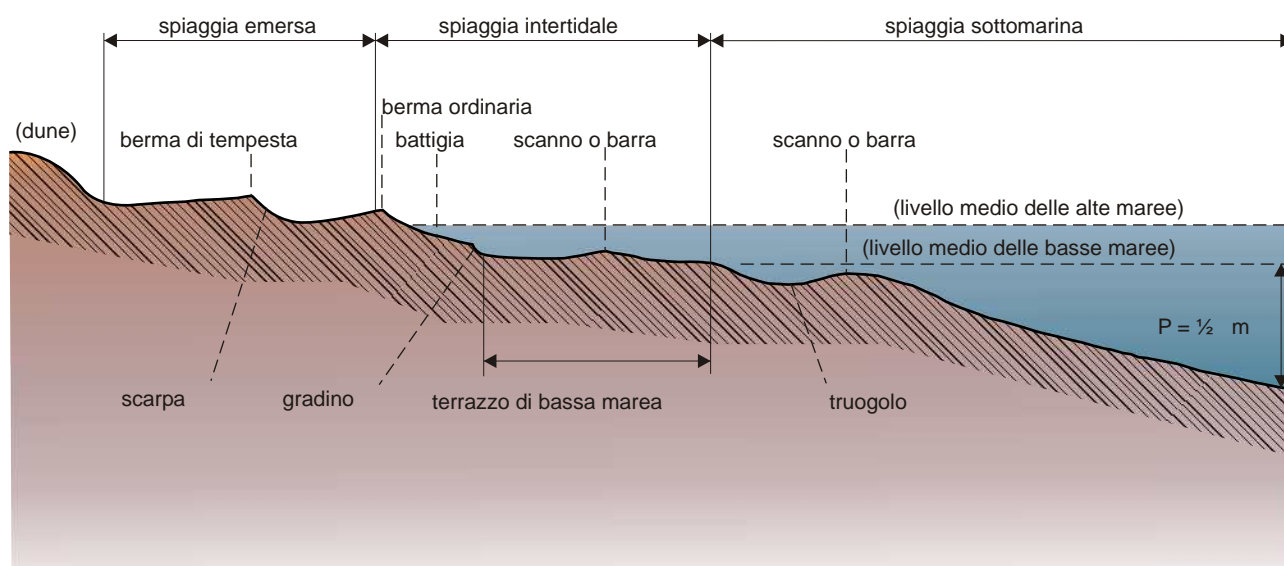




Figura 2.1.5: Le dune si consolidano e si accrescono grazie alla presenza di arbusti e di graminacee, capaci di trattenere la sabbia che il vento trasporta dalle spiagge verso l'entroterra.



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.).

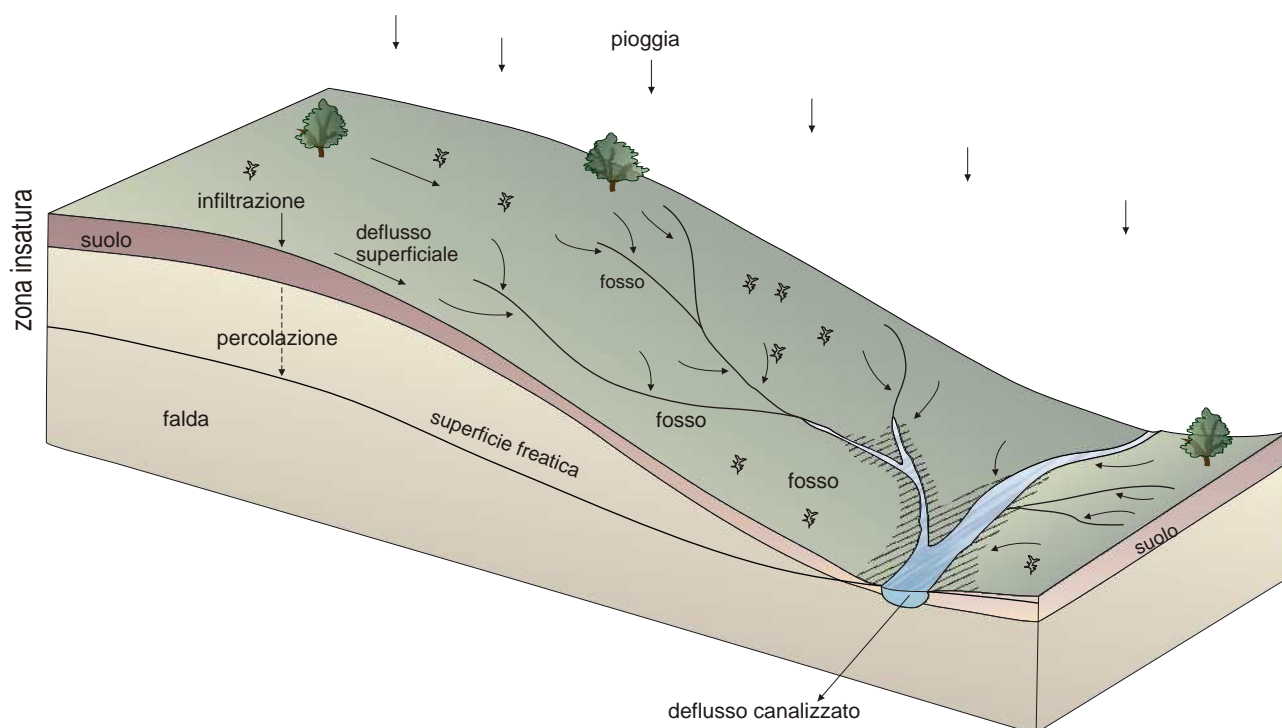
Il rifornimento di nuovi sedimenti

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.

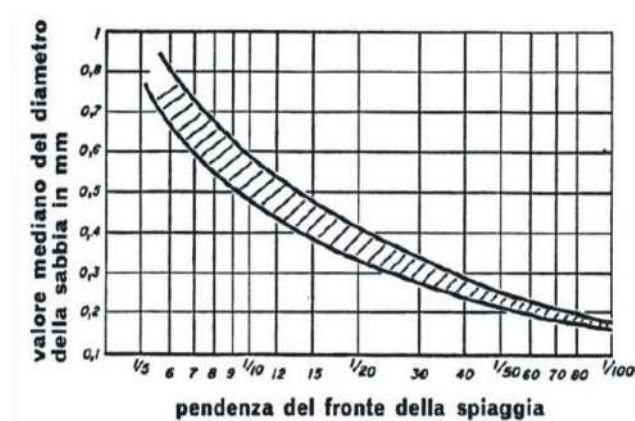
Figura 2.1.8: In prossimità della foce l'andamento della costa è caratterizzato da un protendimento, formato dall'accumulo del materiale detritico trasportato dal corso d'acqua.



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.

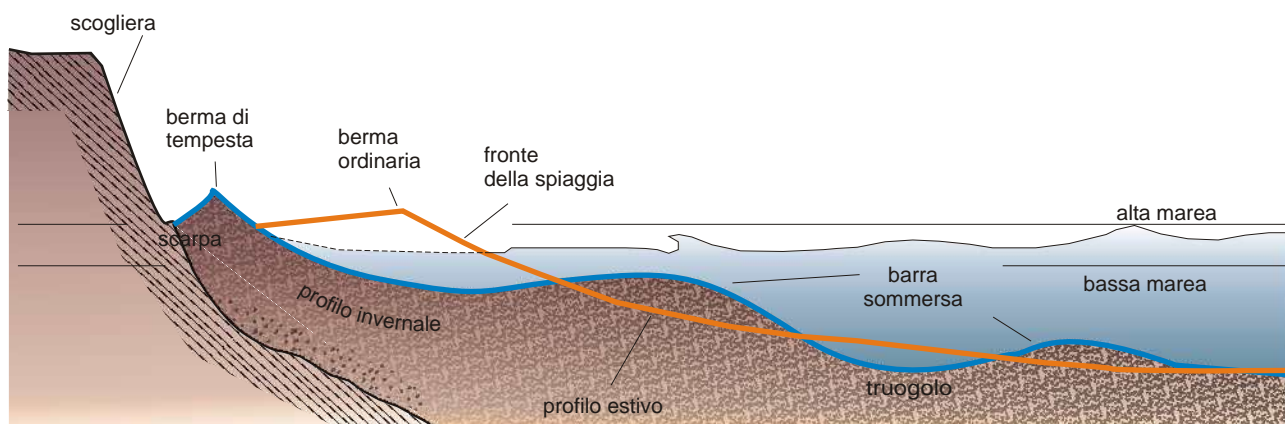
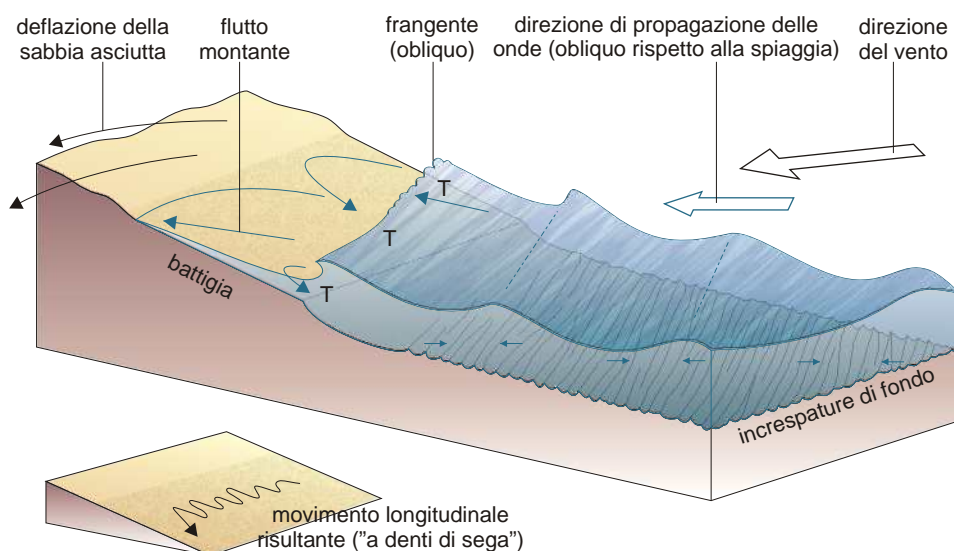


Figura 2.1.11: Durante le mareggiate invernali, le particelle più fini vengono asportate dalla spiaggia e trasportate al largo, dove avviene la formazione di una o più barre sommerse. Molti metri di spiaggia possono sparire a poche ore dall'inizio di una mareggiata e sono necessarie settimane o mesi 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.

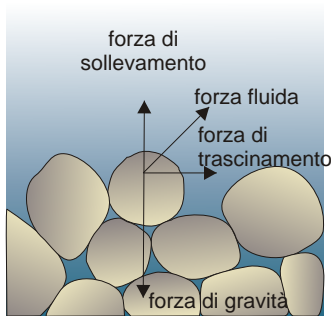


Figura 2.1.12: La forza esercitata dal fluido sulla matrice detritica di fondo è costituita da una componente che tende a sollevare il granulo e da un'altra che tende a trascinarlo. Le forze che si oppongono alla messa in movimento sono la forza di gravità e l'attrito tra i grani.

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, τ_{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.

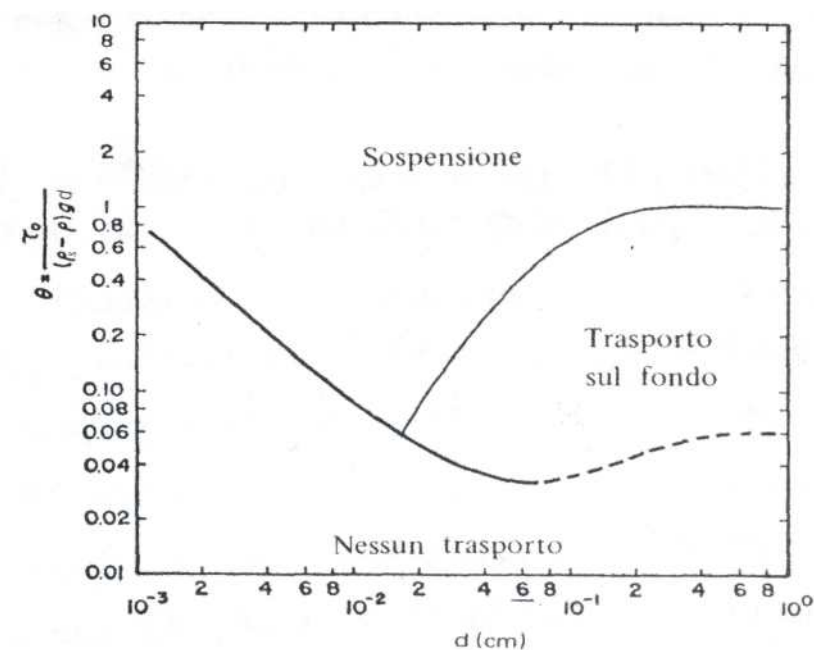
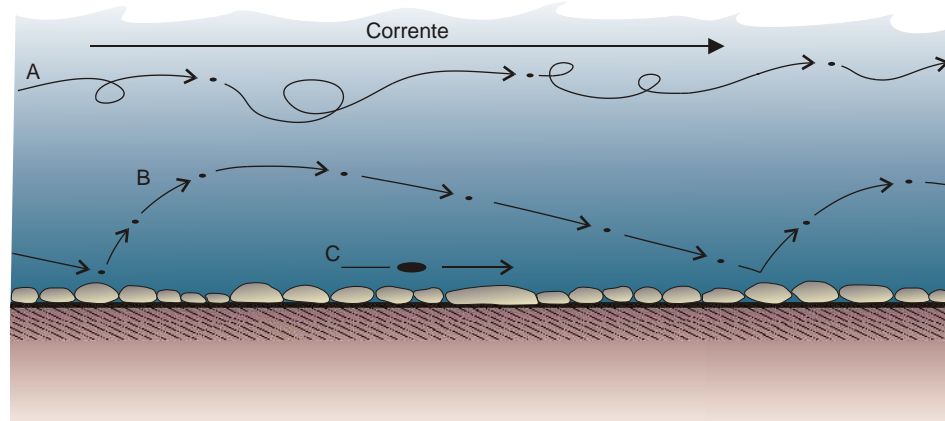


Figura 2.1.13: Diagramma di A. Shields e R.A. Bagnold. F. Ricci Lucchi, Sedimentologia parte 2

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

Tra 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

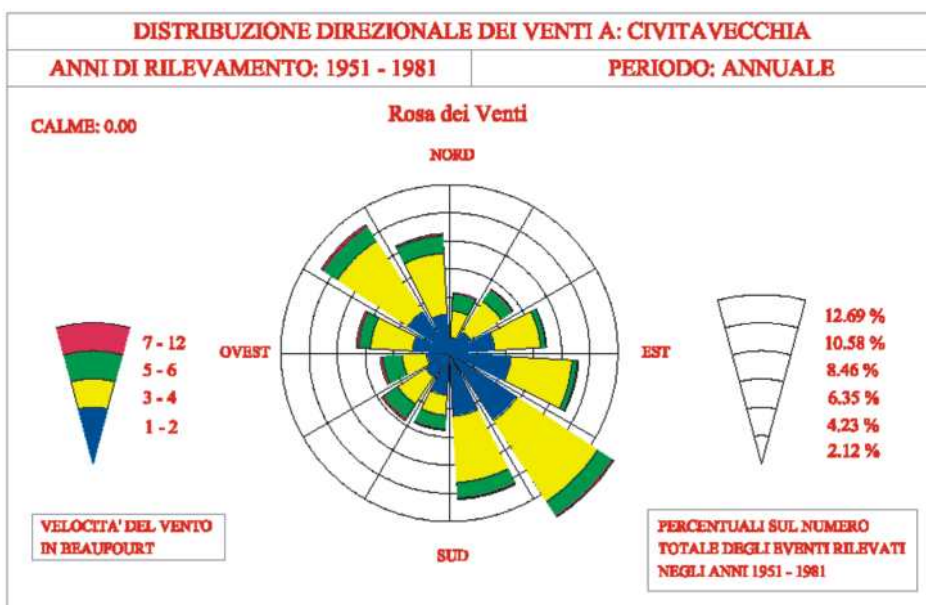


Figura 2.2.2: Il regime dei venti in una data località costiera può essere definito mediante distribuzioni di frequenza per settori direzionali e campi di velocità, con riferimento a periodi di osservazione possibilmente pluriennali. Come dati di base per la definizione del regime del vento vanno assunti 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 "morte")

Figura 2.2.3: Principali parametri del moto ondoso.

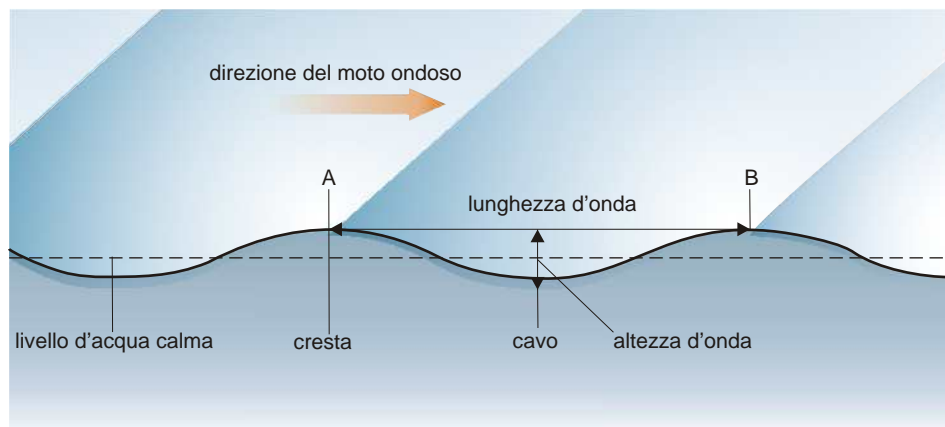


Figura 2.2.4: Nella zona di generazione le onde si mantengono di modeste dimensioni. Nella zona di maturazione le onde sono completamente sviluppate e possono raggiungere le massime dimensioni compatibili con il vento che le ha sollevate in termini di velocità e durata.

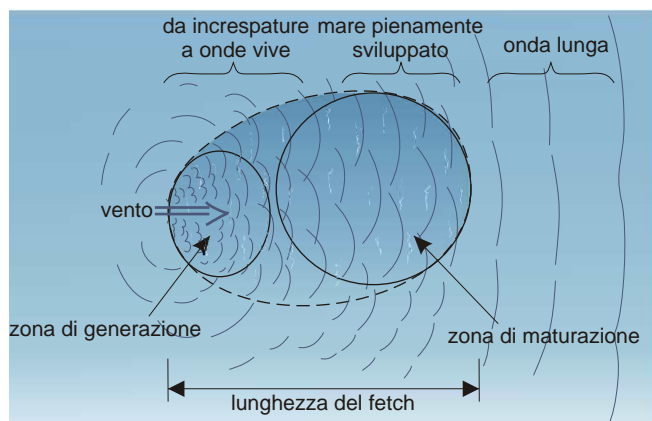


Figura 2.2.5: I treni d'onde lunghe sono caratterizzati, in generale da una ridotta altezza rispetto alla lunghezza d'onda.

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.

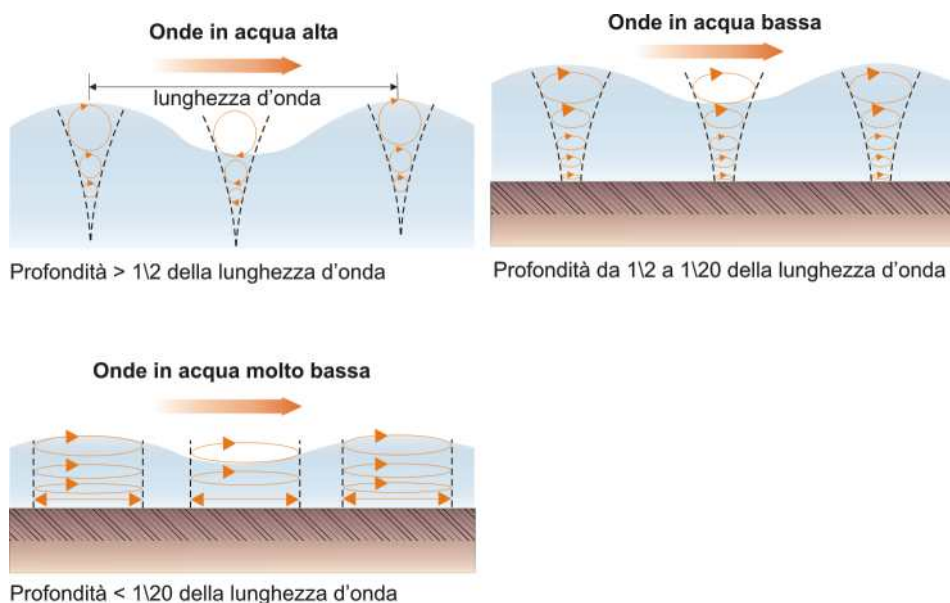
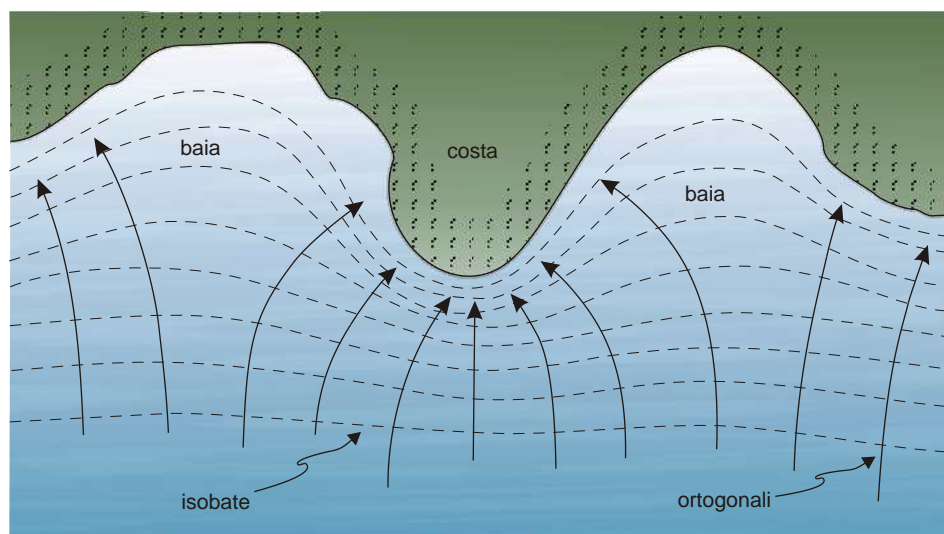


Figura 2.2.7: La spaziatura delle ortogonali d'onda (normali alle linee di cresta) è indicativa della distribuzione dell'energia del moto ondoso in prossimità della costa. Le ortogonali d'onda verso un promontorio si avvicinano tra loro, indicando una concentrazione di energia sulla costa. Verso la baia 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.

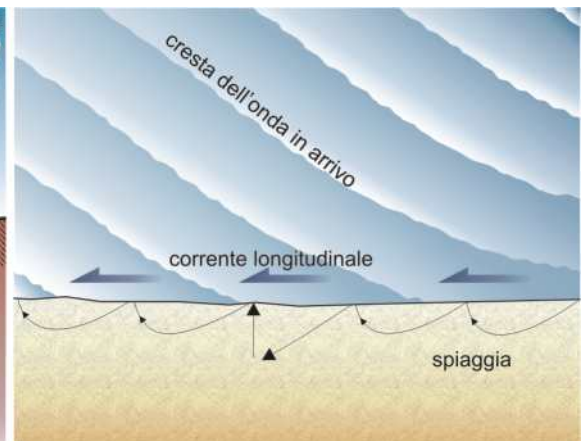


Figura 2.2.9: Corrente lungoriva

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.

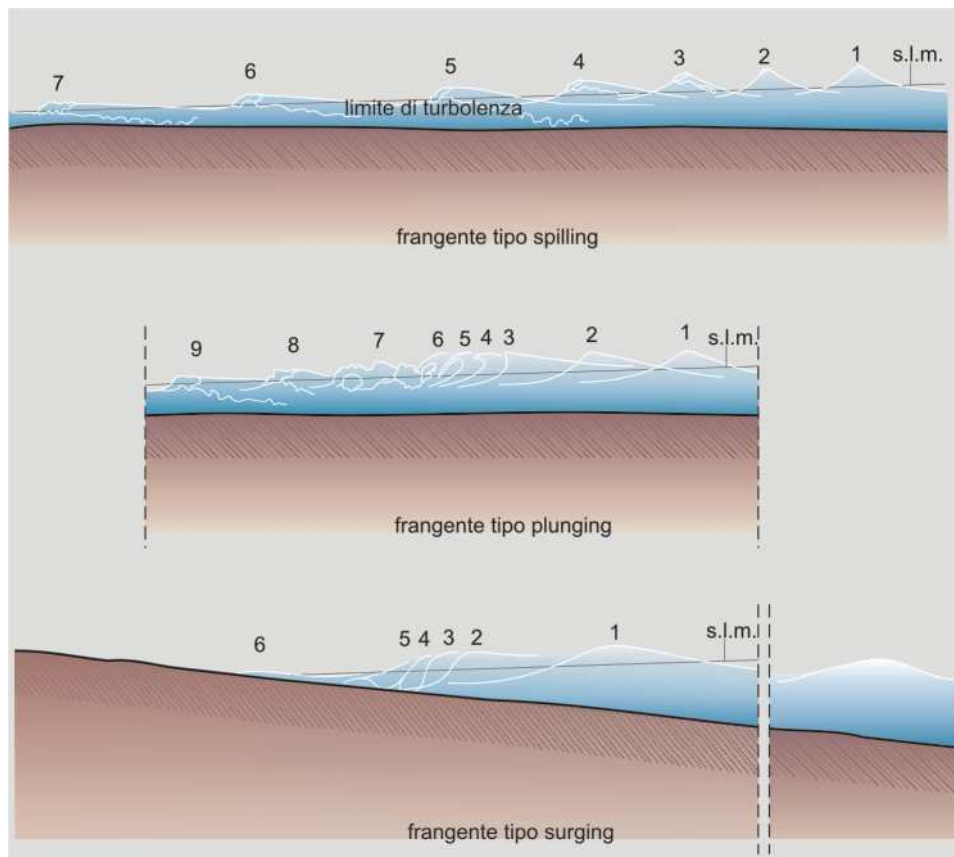




Figura 2.2.11: Frangente tipo plunging.



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.

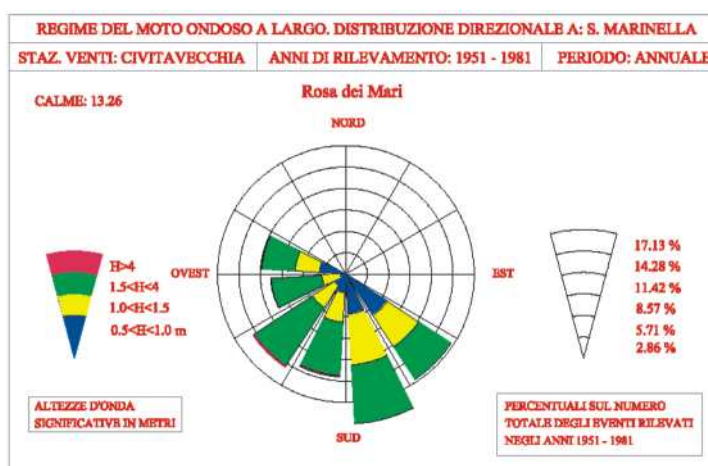


Figura 2.2.14: Il regime del moto ondoso può essere definito mediante la distribuzione di frequenza per settori direzionali e campi di altezza e periodo d'onda.

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:

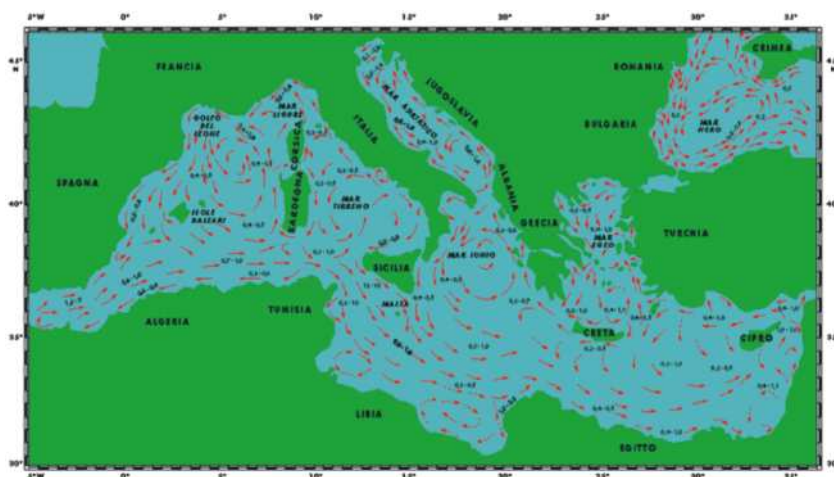
Correnti indotte dal moto ondoso: interessano sia la zona dei frangenti sia la fascia esterna, rivestendo una grande importanza per la dinamica della spiaggia ed il trasporto dei sedimenti;

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.

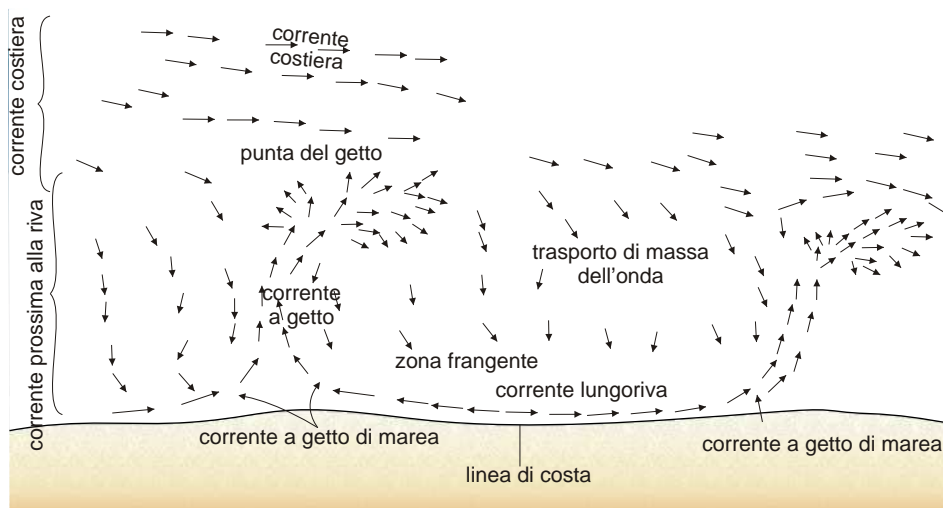
Figura 2.2.16: Circolazione delle correnti nel Mediterraneo.



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).

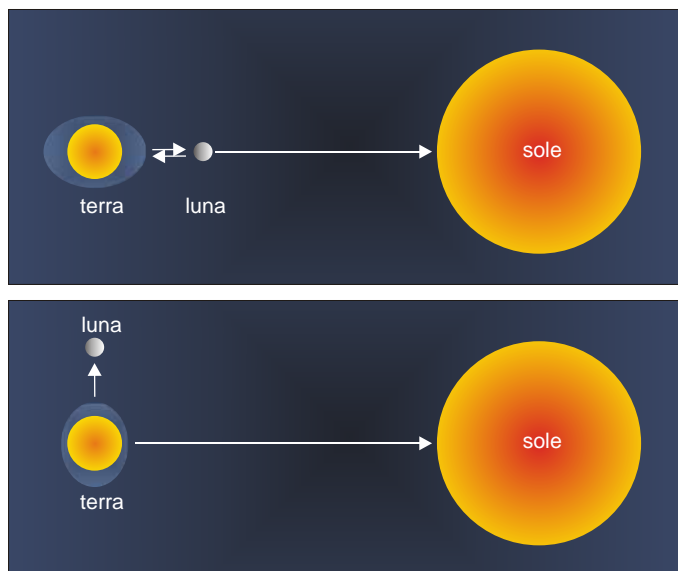


Figura 2.2.19: Mt. St. Michel (Francia).



Generalità

Lo 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

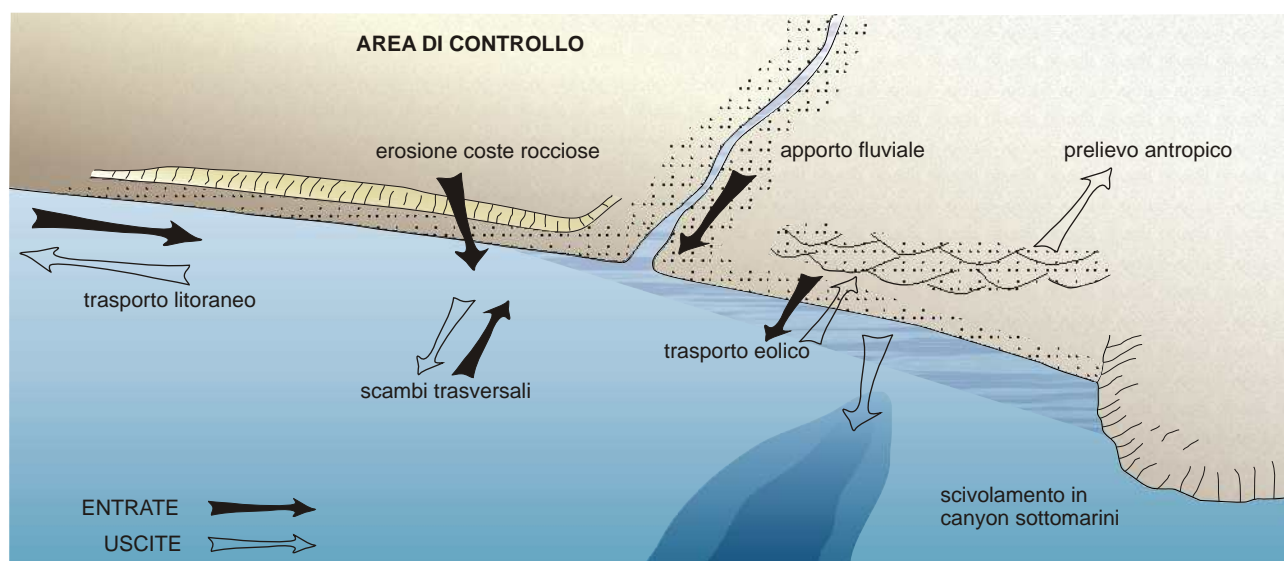
Gli *asporti verso terra* sono dovuti all'azione erosiva dei venti e delle onde oltre le linee di possibile ritorno o in specchi acquei interni.

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

Si 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

Gli 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.

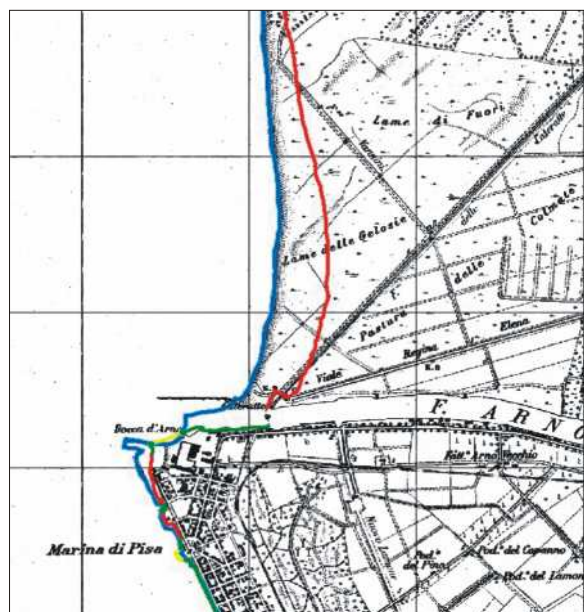


Figura 3.1.1: La sovrapposizione dei profili del litorale toscano in prossimità della foce del Fiume Arno rilevati negli anni '50 (carta IGM, scala 1:25.000, anno 1950) e nel 1998 (ortofoto VOLOIT2000) mostra la tendenza all'arretramento della linea di riva.

Generalità

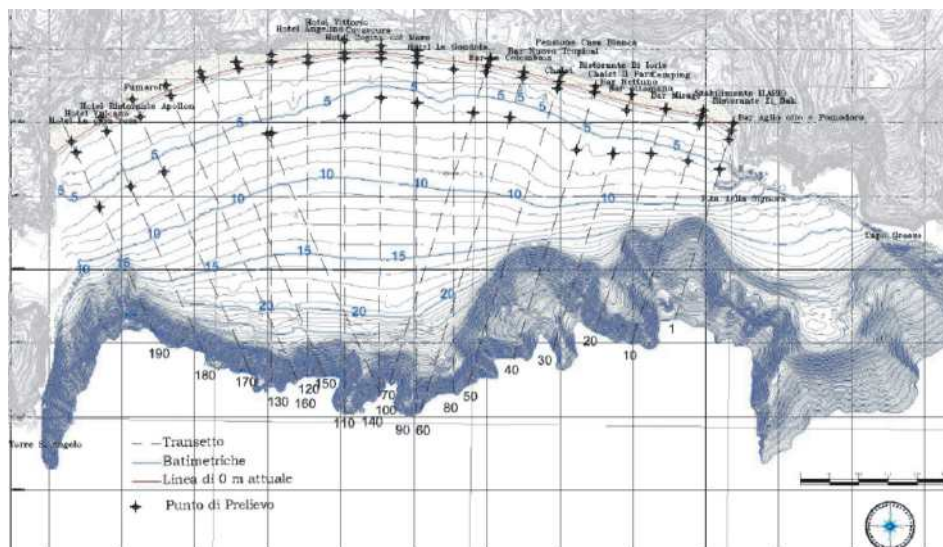
Rilievi topografici e batimetrici

Lo 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.



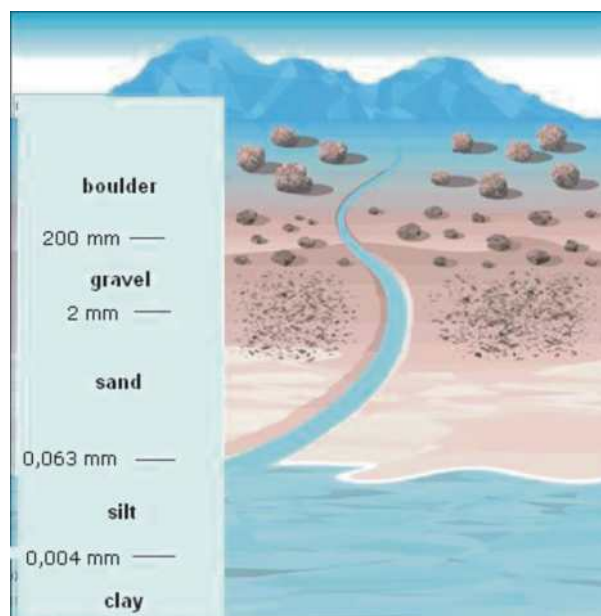
Il moto ondoso e le variazioni del livello medio mare costituiscono le principali forzanti idrodinamiche che controllano il movimento dei sedimenti lungo le coste. Le variazioni stagionali del clima ondoso causano variazioni cicliche della posizione della linea di riva. Tali spostamenti annuali non sono 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).



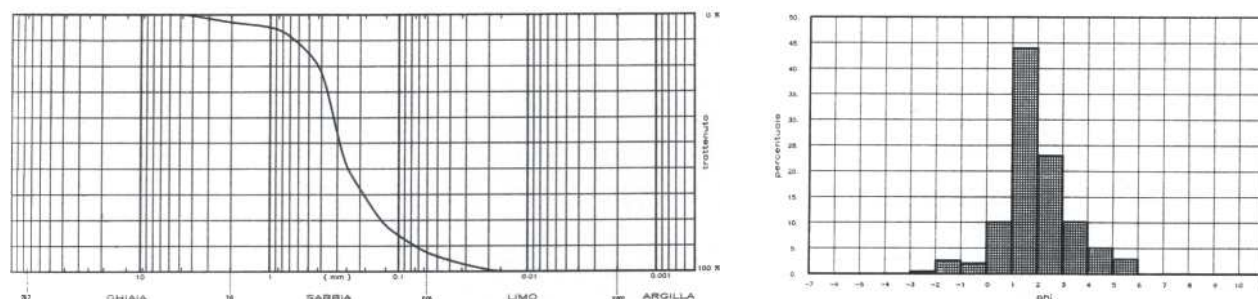
Di seguito sono descritti i parametri caratteristici ed i relativi significati sedimentologici:

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 ₅₀	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

Per 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.

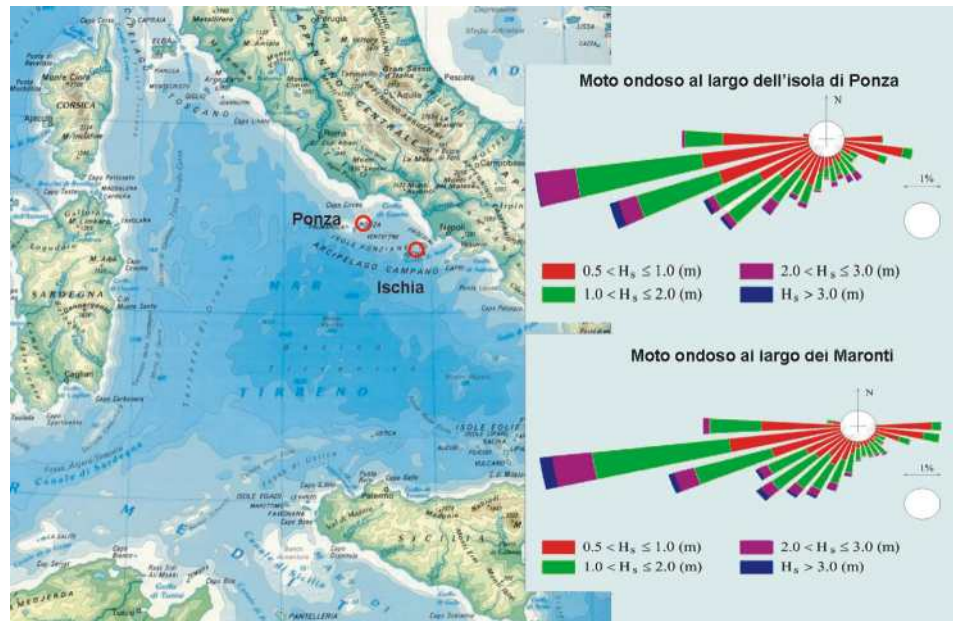


Figura 3.3.2: Modello fisico tridimensionale a fondo fisso, da ESTRAMED s.p.a., 1990.

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.

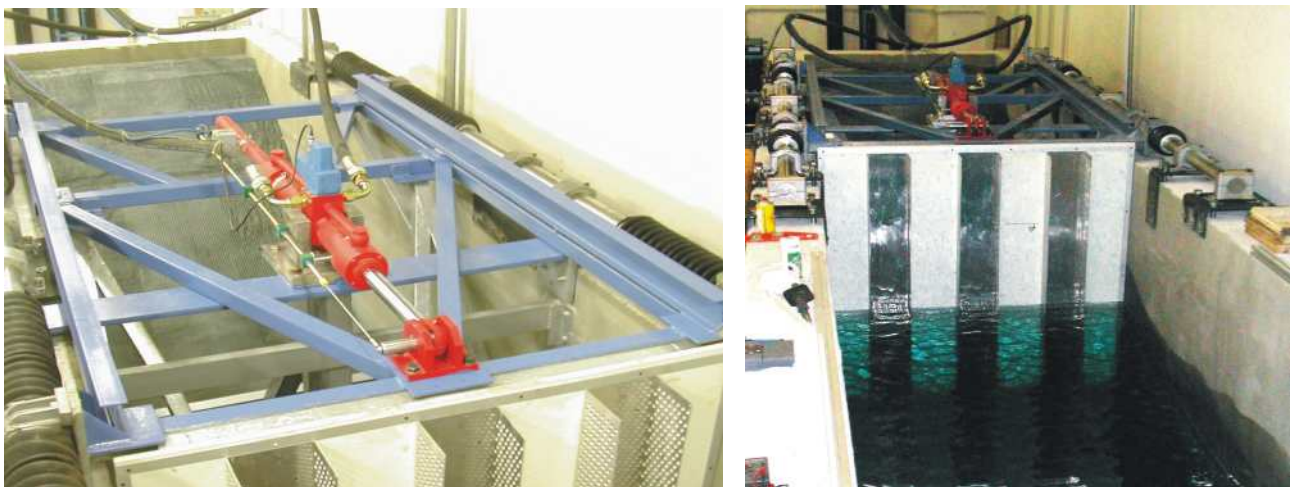


Figura 3.3.4: Pistone e pala del generatore d'onda, dal Laboratorio di Ingegneria Ambientale e Marittima dell'Università de L'Aquila.

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).

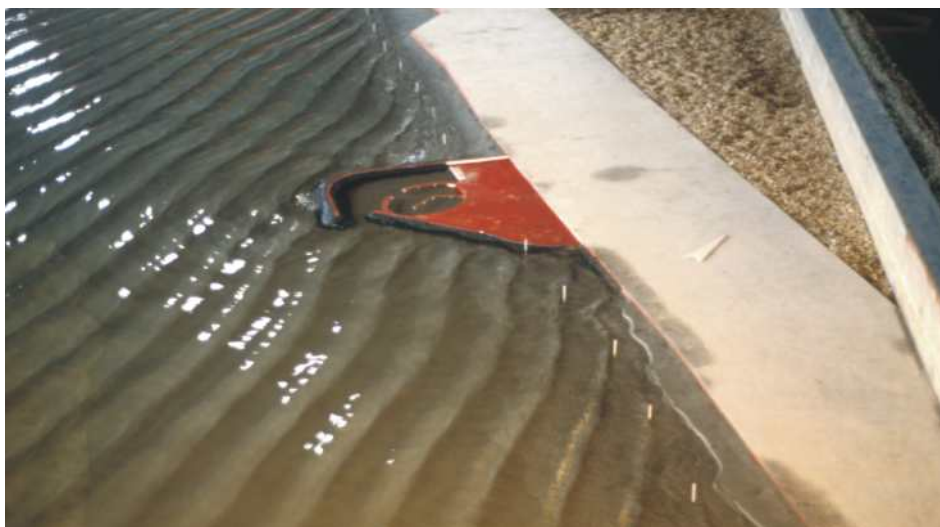


Figura 3.3.6: L'adozione di scale distorte consente, in generale, una buona riproduzione dei fenomeni di rifrazione del moto ondoso, risultando, invece, più carente per riflessione e diffrazione, tuttavia tale limitazione non riveste normalmente importanza determinante ai fini dello studio del movimento 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

Le 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.