

Generalità

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

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

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

Le principali tipologie di intervento sono costituite da:

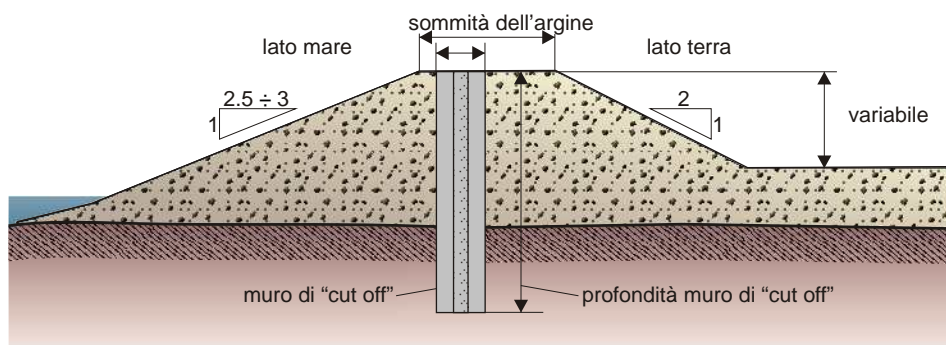
- Argini a mare
- Sistemi meccanici di paratoie mobili

Argini a mare

Descrizione e caratteristiche

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

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



Descrizione e caratteristiche

Barriere radiali

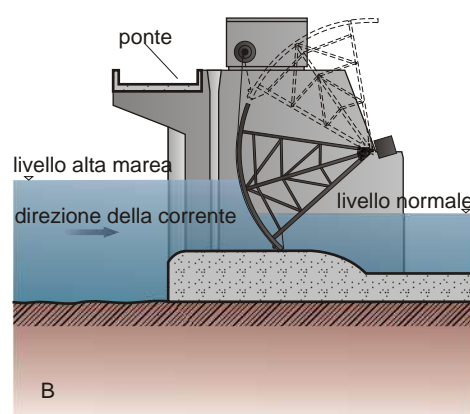
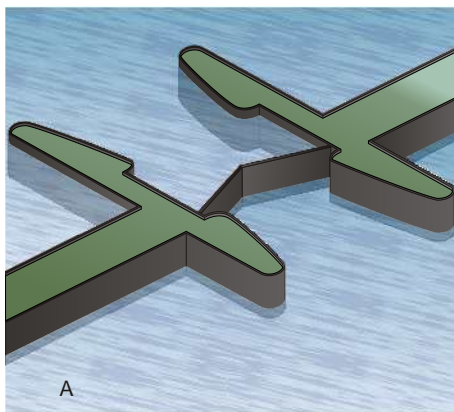
Sono costituite da sistemi di paratoie mobili la cui chiusura, in caso di alta marea, viene azionata mediante apparati elettromeccanici, per rotazione su un piano orizzontale, nel caso delle barriere radiali orizzontali, oppure su un piano verticale, nel caso delle barriere radiali verticali.

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

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

Figura 6.0.2: Esempi di barriere radiali antimarea:

- A) Barriera a paratoie con chiusura orizzontale.
- B) Barriera a paratoie con chiusura verticale.



Descrizione e caratteristiche

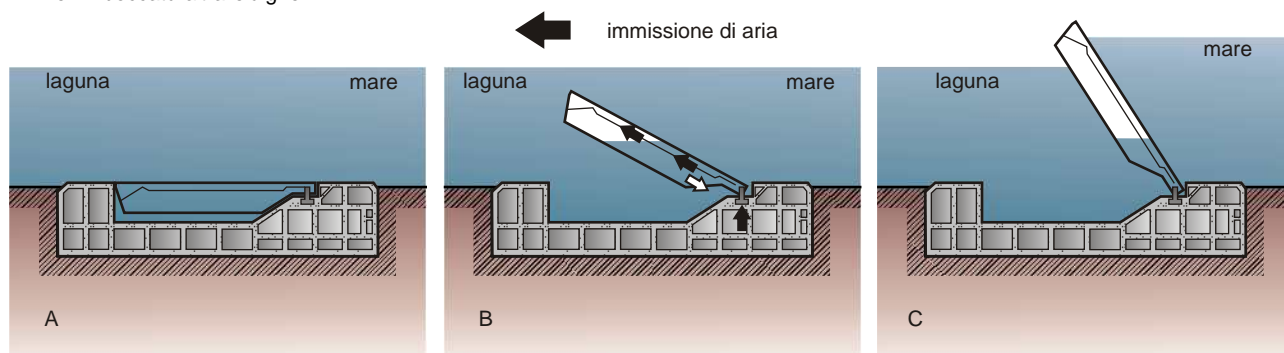
Paratoie mobili: Sistema MOSE

Si tratta di un sistema integrato di opere di difesa, per la protezione di Venezia e delle aree lagunari maggiormente vulnerabili dai fenomeni di "acqua alta".

MOSE, MODulo Strumentale Elettromeccanico, è l'acronimo del prototipo che ha consentito di verificare il funzionamento del sistema e il comportamento di componenti e materiali in condizioni reali. La soluzione adottata prevede la chiusura temporanea delle bocche di porto lagunari attraverso una serie di paratoie mobili. Ciascuna paratoia è costituita da una struttura scatolare metallica vincolata attraverso cerniere al proprio alloggiamento. In condizioni normali di marea le paratoie sono piene d'acqua e restano adagiate nelle strutture di alloggiamento realizzate sul fondale. Quando sono previsti livelli del mare superiori alla quota prefissata esse vengono svuotate mediante immissione di aria compressa e sollevate con una rotazione attorno all'asse delle cerniere, fino ad emergere. In questo modo le paratoie isolano temporaneamente la laguna dal mare, fino a mantenere un dislivello massimo di 200 cm tra mare e laguna. Le bocche restano chiuse per la sola durata dell'acqua alta e per i tempi di manovra delle paratoie (in media 4 ore e mezza).

Figura 6.0.3: Fasi di esercizio del sistema MOSE:

- A) Vani idraulici in posizione bloccata lasciano il passaggio aperto.
- B) Posizione intermedia, in cui l'acqua presente all'interno delle paratoie, viene espulsa mediante l'immissione di aria compressa.
- C) Le paratoie sollevate impediscono l'entrata di acqua nell'imboccatura tra le dighe.



Generalità

Storicamente il porto nasce come struttura adibita a fornire un ormeggio sicuro e un riparo protetto alle imbarcazioni nei confronti dei fattori meteomarinari.

I più importanti e famosi porti dell'antichità sono stati porti naturali, da quelli greci a quelli fenici, a quelli egiziani. Già in epoca romana, tuttavia, l'esigenza di attivare scali commerciali in aree non del tutto idonee, quali ad esempio la foce dei grandi fiumi, ha evidenziato la necessità di effettuare lavori di manutenzione ed ampliamento, che hanno portato di fatto ad una "artificializzazione" delle strutture. In questi casi solo la realizzazione di modifiche alla naturalità dei luoghi consentiva di incidere sui fenomeni locali e di conservare l'agibilità del porto nel tempo. Fu così che, in alternativa agli approdi naturali, quale era ad esempio il porto di Pozzuoli, si iniziarono a progettare anche opere innovative e di concezione più complessa come il porto-canale o i bacini portuali interni (ad esempio il porto di Traiano alla foce del Tevere), dove morfologia naturale e strutture artificiali si sovrapponevano e si integravano per migliorare fruibilità e sicurezza delle strutture.

E' stato solo in età moderna che, per le accresciute esigenze di utilizzo turistico, commerciale e militare, le modifiche apportate dall'uomo all'ambiente naturale si sono fatte sempre più marcate e ci si è spinti sino a progettare e realizzare porti interamente artificiali in aree costiere altrimenti non idonee allo scopo.

Benché una netta differenziazione tra le varie tipologie non sia, per quanto detto, possibile e non esistano di fatto strutture non modificate dall'azione dell'uomo, per fornire uno schema di classificazione di massima, i porti possono essere, ancora oggi, suddivisi in:

- **Porti naturali**
- **Porti artificiali**

Con tale terminologia si intende far riferimento alle caratteristiche originarie del sito, indipendentemente dalle modifiche che successivamente ne possono aver determinato la perdita di naturalità.

Figura 7.0.1: Ventotene (LT). Porto romano scavato nel tufo, sullo sfondo il nuovo porto turistico.



Le attuali strutture portuali sono di norma caratterizzate da un settore esterno di imbocco (o da un canale di accesso), dotato di eventuali opere di protezione, da un avamporto e da un porto interno.

La funzionalità dell'imbocco è vincolata da numerose condizioni, quali il clima meteomarinico del paraggio, le caratteristiche dei fondali e del trasporto litoraneo dei sedimenti, il tipo di traffico marittimo. Esso deve essere ubicato a una certa distanza dalla linea dei frangenti, per assicurare una navigazione il più possibile regolare. La collocazione dell'imboccatura deve tener conto del settore di traversia, cioè del settore da cui possono provenire le onde, primarie e secondarie, che si propagano verso il porto.

Dall'imboccatura si procede, lungo il canale di accesso, verso l'avamporto e, quindi, verso lo specchio d'acqua protetto (porto interno). Il canale d'accesso può essere anch'esso naturale o artificiale e deve essere progettato per poter assicurare la navigazione alle imbarcazioni di maggiori dimensioni previste. La sua ampiezza e la sua profondità sono condizionate non solo dalla grandezza e dalla manovrabilità delle navi, ma anche dalla loro velocità, dal pescaggio, dalla direzione ed intensità di onde, correnti e venti. L'avamporto è la zona preposta alle operazioni di arresto e manovra, che le imbarcazioni di una certa lunghezza svolgono prima di accedere al porto interno. Esso ha anche la funzione di bacino per lo smorzamento del moto ondoso e la riduzione degli interrimenti nell'area portuale. La grandezza, la configurazione e la disposizione del canale di accesso e dell'avamporto vengono definite con l'ausilio di modelli matematici idrodinamici e simulatori di manovra. Il porto interno infine è il luogo dove i natanti vengono ormeggiati e si effettuano le operazioni di carico/scarico di merci e persone. È anche il luogo dove le imbarcazioni possono essere costruite o ristrutturare all'interno di cantieri navali e bacini di carenaggio.



Figura 7.0.2: Porto-canale con diga foranea di protezione dell'imbocco, situato alla foce del fiume Pescara. La struttura di protezione, costruita a metà degli anni '90, impedisce la libera dispersione verso il largo delle acque dolci ed inquinate del fiume, che vengono così deviate verso il litorale a nord del porto, dove determinano problemi per la balneabilità delle spiagge. Sono in corso di studio alcune soluzioni alternative mirate alla mitigazione del problema dell'inquinamento. Nella stessa immagine è possibile osservare l'effetto di accumulo dei sedimenti determinato dal molo di destra del porto turistico (al centro), e dal molo di sinistra del porto-canale, dove viene segnalato il costante avanzamento della linea di riva accompagnato da una generale diminuzione della profondità del fondale. Foto, P. Orlandi.

In generale, è possibile affermare che le modifiche introdotte nell'ambiente costiero dalla presenza di un porto sono tanto più marcate quanto più è evidente la componente artificiale della struttura portuale stessa. Tali modifiche si riflettono essenzialmente su tre ordini di fattori: perdita di naturalità dei luoghi; variazione delle caratteristiche morfologiche del sito e del trasporto solido litoraneo; inquinamento delle acque.

Per quanto riguarda il deterioramento delle caratteristiche naturali, si deve rimarcare come, per una struttura portuale di moderna concezione, non esista la soluzione "ideale", ed una modifica dell'equilibrio preesistente risulti in qualche modo inevitabile. L'adozione di idonee scelte progettuali può comunque mitigare significativamente l'impatto ambientale e paesaggistico delle opere.

La costruzione delle strutture di servizio del porto, specialmente se effettuata per una grande estensione, induce un rilevante cambiamento nella struttura della costa, nella batimetria e nella morfologia del fondale, nelle modalità e nell'entità del trasposto solido litoraneo. Ciò può avere negative ripercussioni sia sulla struttura portuale stessa, che potrà essere interessata da fenomeni di interrimento nel tempo, sia sulle aree circostanti, che potranno essere soggette a fenomeni erosivi in zona sottoflutto, o da fenomeni di deposizione e innalzamento del fondale in quella sopraflutto. Anche i fenomeni di inquinamento sono inevitabili.

Nel caso di un porto alla foce di un grande fiume, ad esempio, il libero deflusso delle acque dolci, spesso inquinate, può essere impedito o reso difficoltoso in presenza di opere, quali dighe foranee.



Figura 7.0.3: Ricostruzione planimetrica dell'area compresa tra le città di Ostia (a destra) e Porto (a sinistra), durante l'età imperiale dell'Antica Roma (da Dal Maso & Vighi, 1975). Nell'illustrazione sono visibili il tratto terminale del fiume Tevere, con l'ampio meandro di Ostia Antica, il canale artificiale di servizio del Porto di Traiano (o "Fossa Traiana", attualmente noto come "ramo di Fiumicino" del delta tiberino), e il più antico porto costiero di Claudio.

Il Porto di Traiano, di forma esagonale, venne costruito contemporaneamente al canale artificiale verso la fine del I sec. d. C., in posizione più interna e riparata rispetto al vecchio scalo, per ovviare ai problemi di interrimento dell'imbocco lungo costa, causato dalla deposizione dei sedimenti trasportati dalla corrente di deriva litoranea. A seguito del progressivo avanzamento della linea di costa, attualmente il Porto di Traiano si trova a ca. 2500 m dalla linea di riva. Nell'immagine sono anche visibili il ramo del Tevere di Fiumicino e, in tratteggio, il paleo-meandro di Ostia Antica, abbandonato dal corso d'acqua nel corso della disastrosa alluvione del 1557. Negli ultimi decenni tutto il litorale è stato interessato da un'intensa fase erosiva che ha determinato ingenti danni alle infrastrutture ed alle attività turistiche.

PORTI NATURALI

In un porto di questo tipo viene sfruttata e valorizzata la naturale predisposizione morfologica del sito a offrire un approdo riparato. Nel caso più usuale i porti naturali si trovano in presenza di discontinuità morfologiche nella linea di costa, come insenature, calette, piccoli golfi, baie costiere o addirittura estuari fluviali, che possono essere sfruttati per fini commerciali e turistici senza la necessità di apportare rilevanti modifiche alle caratteristiche originarie. L'intervento antropico, in questi casi, si limita alla realizzazione di banchine o darsene, nel settore più interno, e di opere di protezione, quali dighe foranee e moli, in quello più esterno.

Figura 7.0.4: Differenti casi di porti naturali, realizzati lungo costa sfruttando le caratteristiche morfologiche del litorale.

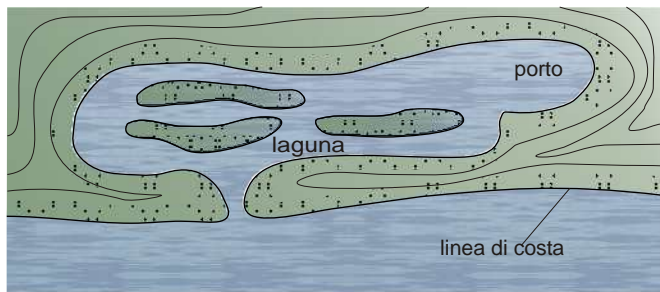
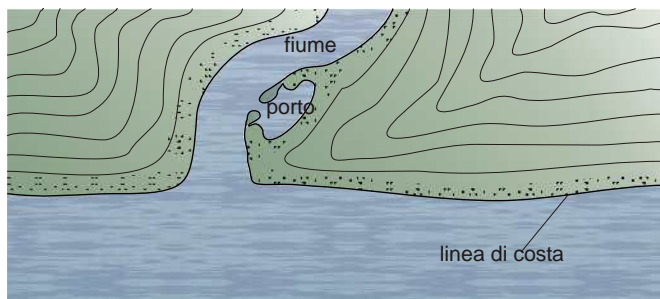
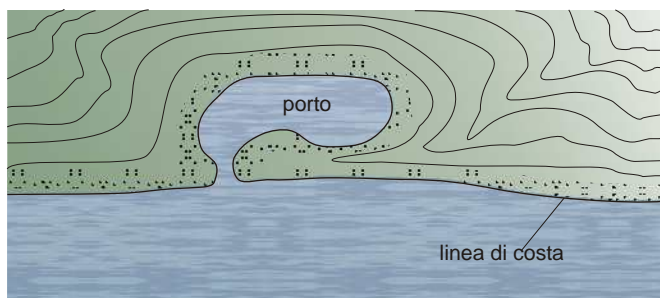


Figura 7.0.5: Taranto, porto del mar Piccolo. Esempio di porto protetto con un unico canale di accesso ed un ampio bacino portuale al proprio interno.

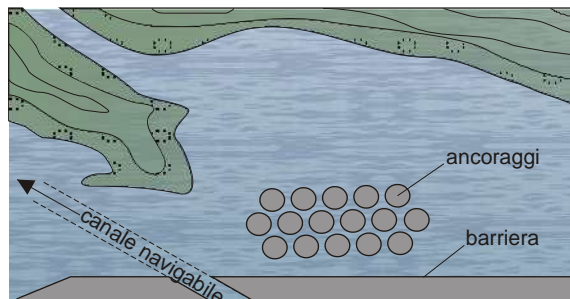
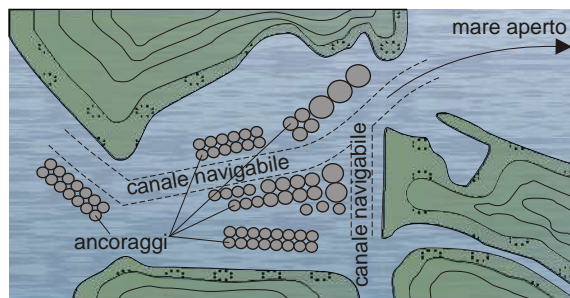


Figura 7.0.4: Esempio di rada. Le rade possono coincidere con baie naturali o essere protette esternamente da dighe e nella loro parte interna sono attrezzate con dispositivi di ormeggio per il riparo di imbarcazioni.

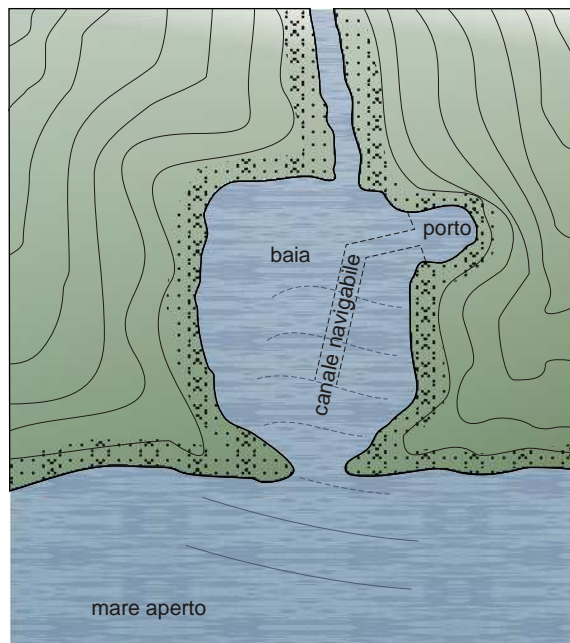


Figura 7.0.6: Esempio di porto con imboccatura parzialmente protetta. Con tale configurazione, per consentire una navigazione in sicurezza anche nelle manovre di attracco e di partenza, occorre realizzare un canale marittimo ed una zona che offra riparo alle navi, all'interno dell'insenatura stessa.

PORTI ARTIFICIALI

Si differenziano da quelli naturali per le modifiche apportate dalle attività antropiche ai siti originali o per la totale artificialità di tutte le strutture di servizio, necessarie a permettere la fruibilità dei siti e la funzionalità del porto stesso.

Non di rado si rende necessaria l'esecuzione di interventi di difesa esterna delle zone di imboccatura e dell'eventuale canale di accesso, che sono generalmente costituiti da dighe o moli.

È assolutamente sconsigliabile realizzare porti artificiali lungo tratti di costa bassa sabbiosa, il cui equilibrio, altrimenti, sarebbe immancabilmente alterato.

I porti artificiali possono essere classificati sulla base della principale opera o unità morfologica che caratterizza lo scalo, fornendo un primo inquadramento nel contesto locale "porto a bacino", "porto-isola", "porto-canale", "porto a marea", "porto a moli convergenti", "porto con diga foranea di protezione". La loro struttura interna risponde alle più svariate esigenze di utilizzo commerciale, turistico, militare e prevede un'articolazione in darsene, banchine, terrapieni, pontili, bacini ecc.

Descrizione e caratteristiche

Porto a bacino

Un porto di questo tipo è usualmente costituito da un bacino difeso da uno o due moli guardiani collegati alla costa: il molo sopraflutto si oppone alle onde dominanti, mentre quello sottoflutto serve a contrastare quelle secondarie. I moli vengono configurati in modo da avere una forma ed una dimensione tali da garantire condizioni di agitazione all'imbocco, compatibili con la sicurezza della navigazione, e all'interno con le operazioni di carico e scarico delle navi.

Figura 7.0.7: Esempio di porto a bacino.

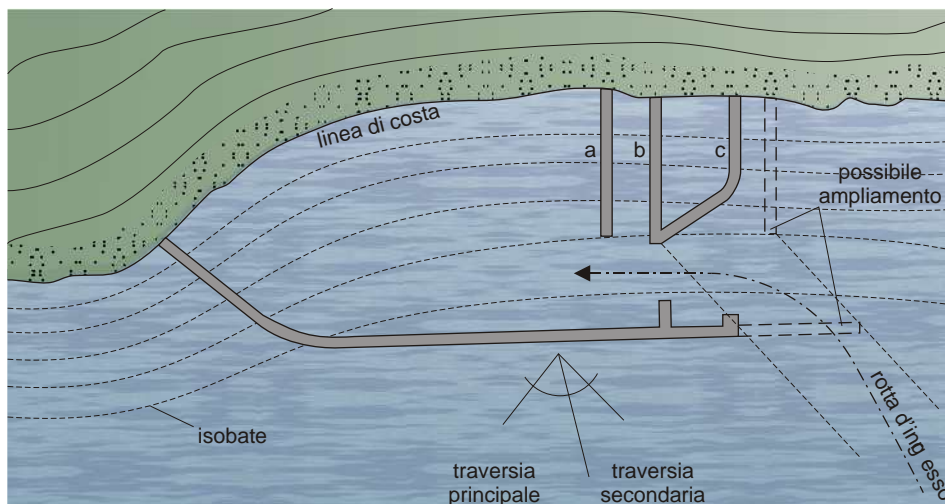


Figura 7.0.8: Costa Ligure. Porto di Arenzano.





Figura 7.0.9: Plastico del progetto del porto turistico in prossimità della foce del fiume Fiora (Montalto marina, Regione Lazio).

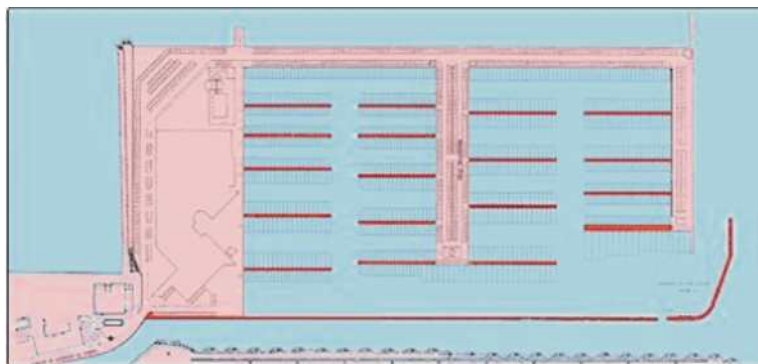


Figura 7.0.10: "Marina" di la Spezia. Il termine marina indica uno specchio d'acqua attrezzato per imbarcazioni da diporto con rifornimento di viveri e carburante, centro riparazioni, servizi igienici, servizio comunicazioni a terra. Il porto turistico di la Spezia è costruito su pali e palancole ed è protetto esternamente da una struttura parzialmente assorbente. Nel corso degli ultimi vent'anni, con l'incremento delle utenze diportistiche, si sono resi necessari ampliamenti e costruzioni di porti turistici che hanno spesso influenzato il regime dei litorali.

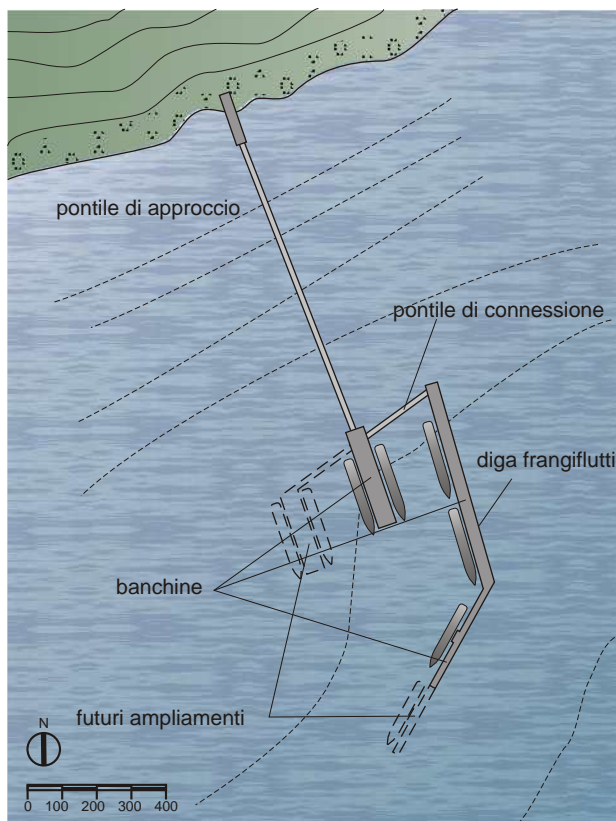
Descrizione e caratteristiche

Porto isola

Si tratta di un'opera costruita al largo della costa, collegata ad essa mediante un pontile di connessione e protetta da una diga frangiflutti. Il porto isola è una soluzione ingegneristica che consente di ridurre i rischi dell'interrimento, di favorire l'agibilità del porto anche in caso di fondali poco profondi sotto costa e di mantenere lontano dalla riva installazioni che possono risultare inquinanti o pericolose, gestendo in modo opportuno eventuali incidenti.

La posizione della diga foranea va attentamente studiata per garantire l'operatività degli accosti ed evitare che fenomeni di interazione con il pontile e correnti litoranee favoriscano un'eccessiva deposizione di sedimenti nelle zone di calma.

Figura 7.0.11: Porto-isola di Manfredonia (prov. FG, Regione Puglia).



Descrizione e caratteristiche

Porto canale

Il porto-canale si delinea come un'evoluzione in senso artificiale degli scali naturali nati alla foce di un fiume o all'interno di specchi d'acqua lagunari.

Le sponde del canale sono protette da dighe, o moli, perpendicolari al litorale, che delimitano l'imboccatura: esse hanno la funzione di raggiungere profondità compatibili con il pescaggio del naviglio utente del porto e limitare l'interrimento dell'accesso dovuto al trasporto solido litoraneo.

Se necessario, vengono realizzati, a lato del canale centrale, piccoli bacini di riserva, chiamati "pialasse" o "piallazze", che servono ad evitarne l'interrimento.

Il sito deve essere caratterizzato da una adeguata profondità dell'alveo fluviale e da discrete escursioni di marea, che favoriscono il ricambio idrico e l'allontanamento dei sedimenti, soprattutto per fiumi con portate ridotte.

Per ridurre l'agitazione residua all'interno del canale, possono realizzarsi lungo le sponde piccole strutture di assorbimento e dissipazione, nonché bacini di smorzamento.

Figura 7.0.12: Porto di Gioia Tauro. Dove non esistono le condizioni naturali, il porto canale può essere completamente artificiale come accade a Gioia Tauro (RC) dove il porto è stato realizzato nel retrospiaggia con andamento parallelo alla costa. Foto Google Earth.



Descrizione e caratteristiche

Porto a marea con chiuse

Le chiuse rappresentano la soluzione per ovviare al problema dell'agibilità degli scali portuali situati in zone con forti escursioni di marea, e prevedono la realizzazione di un sistema di sbarramenti mobili tra mare aperto e porto, che consentono il passaggio delle navi anche in presenza di variazioni significative del livello del mare.

Descrizione e caratteristiche

Porto con moli convergenti

In questo caso l'agibilità del porto viene garantita da due moli convergenti, che hanno l'effetto di attenuare il moto ondoso e di delimitare l'imboccatura.

Tale soluzione si usa quando la distribuzione del moto ondoso individua due direzioni prevalenti e consente una maggior facilità di manovra durante la rotta d'ingresso ed un rallentamento nei processi di interrimento del bacino interno. È opportuno che i moli siano tanto lunghi da raggiungere fondali aventi profondità sufficiente, e impedire alle correnti costiere di deporre sedimenti presso l'imboccatura o all'interno del porto stesso.

Figura 7.0.13: Porto a moli convergenti di Manfredonia . Foto Google Earth.



Descrizione e caratteristiche

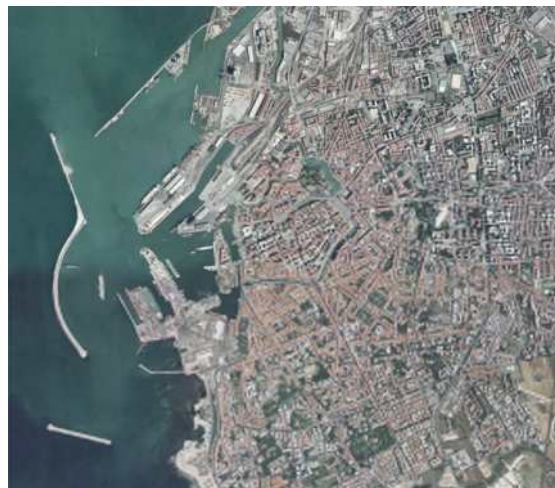
Porto con diga foranea di protezione

Rappresenta una variante delle tipologie precedenti, con l'aggiunta di un'ulteriore protezione all'imboccatura del porto costituita da una diga approssimativamente parallela alla costa.

La particolare configurazione delle opere fa sì che l'unico canale di accesso abbia due imboccature, comporti difficoltà di manovra per navi grandi e possa essere interessato da locali fenomeni di interrimento.

Figura 7.0.14: Esempi di porti con diga foranea di protezione. A destra Livorno, a sinistra La Spezia. Foto Google Earth.

Se la diga foranea viene costruita di fronte all'accesso di un porto canale, si deve porre grande attenzione alle modifiche indotte dalla sua presenza sulla libera diffusione delle acque dolci del fiume.



Generalità

Si tratta di strutture che devono esercitare un'azione di smorzamento o di ostacolo fisico alla propagazione delle onde (impedendone l'entrata nel porto), oppure modificare il trasporto solido litoraneo e ridurre indesiderati effetti di erosione o accumulo di sedimenti. Le principali opere utilizzate per la difesa dei porti sono costituite da dighe e moli. Si parla di diga quando la struttura è distaccata da terra, mentre si parla di molo quando la struttura è radicata a terra. Nel secondo caso l'opera, nel suo lato riparato, può avere anche una funzione di attracco per le imbarcazioni.

Generalità

Dighe e moli

La funzione principale delle dighe marittime è quella di proteggere l'ingresso al porto, o le aree di manovra delle navi, dal moto ondoso, con particolare riguardo alle situazioni di maggiore criticità operativa, come tempeste e forti mareggiate. Esse presentano una forma allungata in direzione sub-parallela alla costa, ed una sezione trapezoidale o rettangolare con altezza e dimensioni relazionate alle condizioni del moto ondoso. L'impatto estetico e ambientale delle dighe e dei moli sulle aree costiere è rilevante e può determinare la perdita di naturalità dei luoghi, la modifica della morfologia dei fondali, l'alterazione dei parametri caratteristici delle acque. Gli impatti estetici e ambientali possono essere mitigati attraverso l'utilizzo di materiali naturali (massi di cava), la minimizzazione degli scavi, dei rinterri e degli altri lavori necessari per la realizzazione delle opere, oppure, in alcuni casi, adottando correttivi che rendano le strutture permeabili. In base agli aspetti strutturali ed alle modalità realizzative e di funzionamento, dighe e moli si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

- a scogliera o a gettata
- a parete verticale o riflettenti

Figura 7.1.1: Porto di Palermo, foto fine ottocento. Molo radicato a scogliera.



Figura 7.1.2: Differenti tipologie di diga marittima. In alto, dighe a scogliera in massi naturali: porto di Andora (SV), a sinistra; porto di Sanremo (IM), a destra. Al centro, porto di Piombino (LI), diga a scogliera in massi tetrapodi (a sinistra); particolare della diga (a destra). In basso, dighe a parete verticale: a sinistra, porto di Vado Ligure (SV); a destra, particolare della testata della diga foranea del porto di Genova.



Descrizione e caratteristiche

Dighe e moli a scogliera

Le dighe a scogliera, o frangiflutti a scogliera, vengono utilizzate prevalentemente su fondali non molto profondi. Tali opere risultano particolarmente indicate per resistere alle intense sollecitazioni ondose che hanno luogo in zona frangente, che risulterebbero, al contrario, eccessivamente gravose per le opere a parete verticale. La dissipazione dell'energia dell'onda incidente e la riduzione dei fenomeni di riflessione vengono ottenuti principalmente ad opera delle asperità e dei vuoti esistenti fra masso e masso; vanno quindi assicurate le corrette condizioni di permeabilità e di stabilità della struttura, nonché il corretto concatenamento degli elementi che la compongono.

In una diga di questo tipo si possono distinguere:

- Un imbasamento o sottostruttura in pietrame, che ripartisce i carichi sul fondo, fornendo un appoggio stabile per tutta la struttura.
- Un nucleo interno, realizzato con materiale di cava tout-venant, protetto da massi disposti a strati successivi.
- Uno o più strati in blocchi naturali o artificiali, le cui dimensioni aumentano verso l'esterno, disposti secondo opportuna pendenza. Lo strato più esterno, lato mare, viene chiamato mantellata (rivestimento), ed è spesso costituito da elementi di forma geometrica particolare (es. tetrapodi) che realizzano il massimo concatenamento ed un'alta percentuale di vuoti.
- Uno o più strati-filtro, posizionati tra il nucleo e il rivestimento, la cui funzione è quella di impedire l'asportazione del materiale dal nucleo stesso. La porosità deve decrescere dall'esterno verso l'interno, per fornire maggior efficacia nell'azione di smorzamento dell'energia delle onde.
- Una protezione al piede, ad incrementare la stabilità dell'opera e ridurre le sollecitazioni.
- Un coronamento in calcestruzzo, comprendente l'eventuale muro, la cui finalità è quella di stabilizzare la sommità e ridurre la tracimazione delle onde più alte (muro paraonde).



Figura 7.1.3: Costruzione di un molo radicato con mantellata in massi naturali.

Se le opere sono isolate in mare, per la loro costruzione risulta indispensabile il ricorso ai mezzi marittimi (bette, pontoni, sbandate, draghe, rimorchiatori) con progressivo aumento dei costi dell'opera.

Si possono realizzare dighe con mantellata in massi naturali o in massi artificiali (Tetrapod, Quadripod, Stabit, Antifer Block, Tribar, Dolos, Cubi modificati, Massi speciali, ecc.).

I materiali naturali devono essere chimicamente inalterabili e meccanicamente resistenti, compatti e con un elevato peso specifico. Per tale impiego sono utilizzabili calcari, basalti, graniti e conglomerati cementati. In base al peso delle unità si distinguono quattro categorie:

- categoria 1: $50 \text{ kg} < P < 1000 \text{ kg}$
- categoria 2: $1 \text{ t} < P < 3 \text{ t}$
- categoria 3: $3 \text{ t} < P < 7 \text{ t}$
- categoria 4: $P > 7 \text{ t}$

Le mantellate in massi artificiali sono caratterizzate da blocchi in calcestruzzo incastrati reciprocamente per formare una struttura omogenea e permeabile al moto ondoso. Variando dimensioni e forma degli elementi l'opera aumenta la propria capacità di resistenza al moto ondoso e si adatta alle diverse condizioni di esercizio.

Figura 7.1.4: Sezione esplicitiva di diga con mantellata di elementi artificiali.

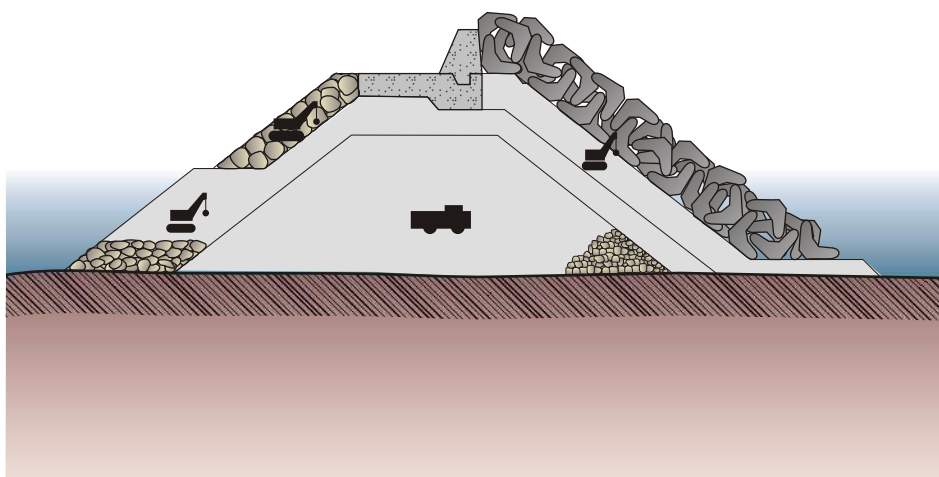
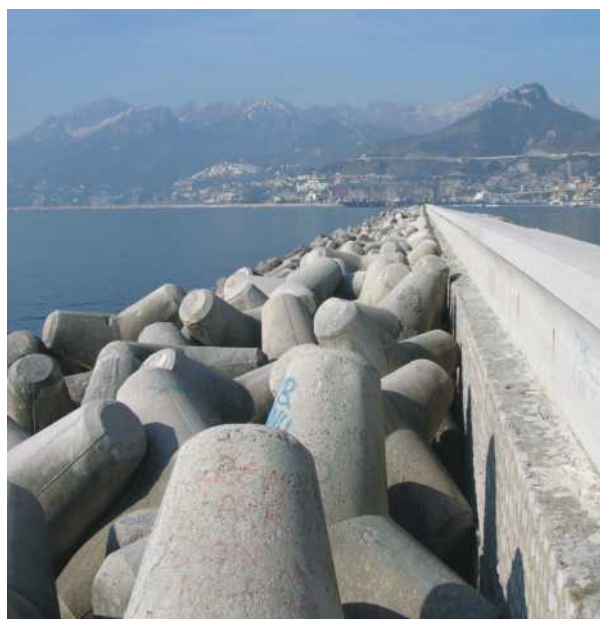
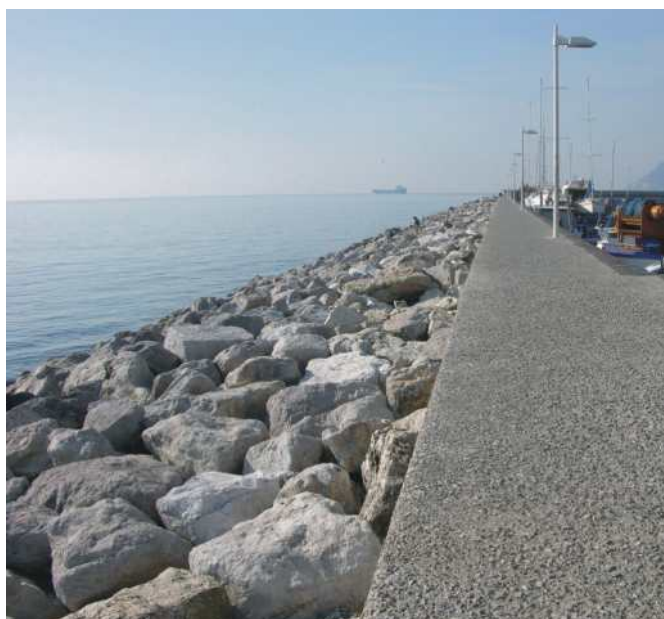


Figura 7.1.5: Esempi di moli. A destra con mantellata artificiale in tetrapodi, si nota il muro paraonde sagomato verso il mare. A sinistra un molo con mantellata in massi naturali.



Descrizione e caratteristiche

Dighe e moli a parete verticale

Tali strutture vengono in genere realizzate su fondali di profondità elevata, e dal lato interno sono sovente attrezzate per permettere l'ormeggio delle imbarcazioni. Dal lato del mare aperto, la struttura si oppone all'azione delle onde incidenti provocandone la riflessione verso il largo. Il comportamento perfettamente riflettente del muro è però assicurato solo quando è possibile escludere il frangimento dell'onda a ridosso o a breve distanza dalla parete.

Si tratta di opere costituite da pareti verticali o sagomate lato mare, appoggiate direttamente sul fondale tramite un imbasamento costituito da uno scanno di materiale lapideo.

Gli elementi fondamentali di una diga a parete verticale sono costituiti da:

- Uno scanno di imbasamento a scogliera.
- Un muro verticale o subverticale, che si eleva al disopra del livello medio del mare, costituito da elementi artificiali prefabbricati (omogenei, cellulari o ciclopici), sovrapposti e collegati fra loro in modo da formare un corpo unico, oppure da cassoni cellulari in conglomerato cementizio armato, riempiti con materiale inerte o calcestruzzo.
- Un coronamento, comprendente una piattaforma di transito con eventuale muro paraonde. L'opera viene completata con la realizzazione di massi guardiani, che hanno il compito di protezione al piede della parete verticale, lato mare. Talvolta, in condizioni di mare particolarmente gravose e in presenza di basso fondale, il paramento lato mare delle opere a parete verticale viene protetto con una struttura a gettata.

Figura 7.1.6: Schemi di dighe a parete verticale.

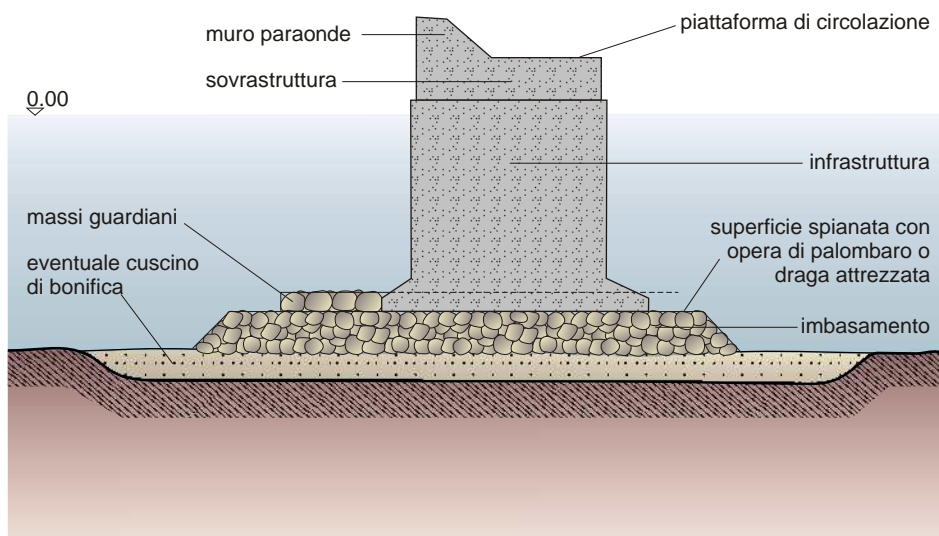
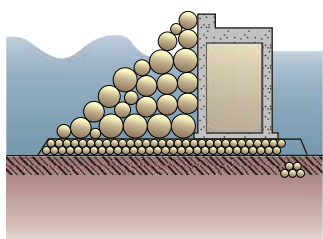
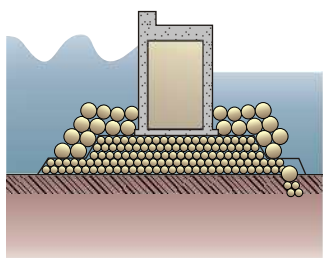
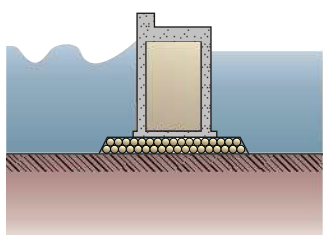


Figura 7.1.7: Cassoni in c.a. Pronti per essere rimorchiati verso il sito di costruzione del molo. Una volta sul luogo le strutture vengono affondate riempiendole con materiale inerte.



Bibliografia

AA.VV. "A guide to coastal erosion management practices in Europe". Prepared by the National Institute of Coastal and marine Management of the Netherlands. Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3. Coastal erosion evaluation of the needs for action. Directorate General Environment, European Commission, EUROSION Programme, January 2004.

R.P.C. Ltd "Basalton concrete revetment columns". Brochure, www.rpcltd.co.uk, 2002.

AA.VV. "Coastal Engineering Manual". USACE, U.S. Army Corps Ed., 2001.

AA.VV. "Environmental engineering for coastal shore protection". Dept. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., 1989.

AA.VV. "Design of coastal revetments, seawalls and bulkheads". EM 1110-2-1614, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., June 1995.

AA.VV. "Environmental recovery and maintenance of eroding littorals with the use of marine sandy deposits". Progetto BEACHMED. Regione Lazio, Direzione regionale Ambiente e Protezione Civile - Area Difesa del Suolo; Osservatorio regionale dei litorali - Centro di monitoraggio. Regione Lazio, Roma, 2004.

AA.VV. "General criteria for waterfront construction". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of MIL-HDBK-1025/6, May 1988. UFC 4-151-10, September 2001.

AA.VV. "Giornata di Studio sulla Difesa delle Coste-27 ottobre 2000. Linee Guida per il Piano Generale di Difesa delle Coste". Assessorato per le Politiche dell'Ambiente. Dip. Opere Pubbliche e Servizi per il Territorio. Regione Lazio. Roma, 2000.

AA.VV. "Guide on sea and lake dikes". TAW, Technical Advisory Committee Flood Defences, The Netherlands, December, 1999.

AA.VV. "La rete mareografica italiana". I Ristampa, Pres. Cons. Ministri, Dip. per i Servizi Tecnici Nazionali, Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 2000.

AA.VV. "Low cost shore protection...A guide for engineers and contractors". U.S. Army Corps of Engineers, 1981.

AA.VV. "Manuale di ingegneria naturalistica Applicabile al settore idraulico". Reg. Lazio. Dipartimento Ambiente e Protezione Civile. Roma, 2002.

AA.VV. "Manuale di ingegneria naturalistica Applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose. Volume 2". Reg. Lazio. Dipartimento Ambiente e Protezione Civile. Roma, 2003.

AA.VV. "Manuale per la difesa del mare e della costa". Fondazione Giovanni Agnelli Ed. Milano, 1990.

AA.VV. "Military harbors and coastal facilities". US. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of NAVFAC Design Manual 26.1 26.2 26.3. UFC 4-150-06, December 2001.

AA.VV. "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici". AIPCN-PIANC, Associazione Internazionale di Navigazione, Sezione Italiana, febbraio, 2002.

AA.VV. "Recuperation environnementale et entretien des littoraux en erosion avec l'utilisation des depots sablonneux marins". Osservatorio sul Mare della Regione Lazio. Progetto BEACHMED. Prevenzione e Gestione dei Rischi Naturali. Regione Lazio. Roma, 2001.

AA.VV. "Salvaguardia di Venezia e della laguna Atlante delle opere". Ministero LL.PP., Magistrato alle Acque di Venezia. Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova, anno VIII, nn. 1/2., gennaio-giugno, Venezia, 2000.

AA.VV. "Seawalls, bulkheads and quaywalls". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. Update report of Design Manual 25.4, July 1981. MIL-HDBK 1025/4, September 1988.

AA.VV. "Traditional techniques for shoreline erosion control in reservoirs". U.S. Army Corps of Engineers, REMR Technical Note GT-SE-1.6, Suppl 5, 1992.

Accordi B., Lupia Palmieri E. "Il globo terrestre e la sua evoluzione". III Ed. Zanichelli, 1991.

Adamo P. "I porti". Università di Palermo, Corso di Tecnica dei Trasporti del Prof. Luigi La Franca, Anno Accademico 2003-2004, Palermo, 2003.

Allsop N.W.H. "Breakwaters, coastal structures and coastlines". Proceedings of the International Conference organized by the Institution of Civil Engineers, London, UK, 26-28 Sept., Thomas Telford, 2001.

American Association of Port Authorities "Port Design and Construction". Washington D.C., 1964 (2nd Ed. Published 1973 under title: "Port Planning, Design and Construction").

Aminti P., Pranzini E. "La difesa dei litorali in Italia". Edizioni delle Autonomie. Roma, 1993.

ANPA Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente - "Atlante delle opere di sistemazione dei versanti". Roma, 2001.

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici - "Atlante delle opere di sistemazione fluviale". Roma, 2004.

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici - "La formazione ambientale attraverso stages IV Raccolta delle tesi elaborate nelle sessioni 2003-2004". Roma, 2004.

ARMORTEC "Armorflex, A-Jacks, Armorloc". Brochure, Armortec Inc., 2004.

Bakker P., van den Belge A., Hakenberg R., Klabbers M., Muttray M., Reedijk B., Rovers I. "Development of concrete breakwater armour units". 1st Coastal, Estuary and Offshore Engineering Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada, June 2003.

Balani R., Sundar V. "Hydraulic performance of double screen breakwaters". Proceedings of 5th International Conference on Hydro-Science & ENGG, Warsaw University of Technology, Theme E, Paper NO. 58, Sept 18-21 2002.

Barnard T. "Coastal shoreline defense structures". Self-taught education unit. Center for Coastal Resources Management, Virginia Institute of Marine Science, Virginia, December 1999.

Berriolo G., Sirito G. "Spiagge e Porti turistici". Hoepli Ed. Milano, 1972.

Benassai E. "Vulnerabilità dell'ambiente costiero ed interventi di difesa dei litorali". Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale "Girolamo Ippolito", Napoli, 2003.

British Standard BS 6349 "Maritime Structures". Part 7, 1991.

Carter R. W. "Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines". Academic Press, London, 1988.

Castiglioni G.B. "Geomorfologia". UTET Ed. Torino, 1991.

Clauss G.F., Habel R. "Artificial reefs-Computation and validation with free water surface". Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering, Berlin University of Technology, Star-CD User Meeting, Berlin, 2000.

CNR-MURST "Atlante delle spiagge italiane". SelCa, Firenze, 1997.

Colombo T. "Manuale dell'Ingegnere". Vol. 2. Hoepli Ed. Milano, 1998.

Cortemiglia G.C., Lamberti A., Liberatore G., Lupia calmieri E., Stura S., Tomasicchio U. "Raccomandazioni tecniche per la protezione delle coste". CNR- Prog. Fin. Conservaz. Del Suolo, Sottoprogetto Dinamica dei Litorali, 156, pp.81.

Cowdell S., Allyn N. "Breakwater Design & Construction: A Case Study". Port Technology International - Edition 9: Section 6: Port Planning Construction & Maintenance, Canada, january, 2004.

Crossman M. "Low cost rock structures for beach control and coast protection - Practical design guidance". DEFRA, Department for Environment Food and Rural Affaire, Hr Wallingford, Environment Agency, may 2003.

Crouch R. "Probabilistic design tools for vertical breakwaters Structural aspects". MAST III PROVERBS project. Vol IIc, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, 140 pp., 1999.

Dean R.G. & Dalrymple R.A. "Water wave mechanics for engineers and scientists". World Scientific Press, Singapore, 353 pp., 1991.

De Falco G. & Piergallini G. "Mare, golfo, lagune studi e ricerche", Studi e Ricerche, 208 pp., 2003.

De Marinis M. "Porto-canale di Pescara: storia del porto di Pescara ed impatto ambientale della diga foranea sull'ecosistema circostante". Ass. Cult. Borgomarina, F.A.B. & A. Spina. Lavoro inedito, Pescara, 2001.

De Pippo T., Pennetta M., Terlizzi F., Vecchione C. "Ipotesi di intervento di ripascimento protetto lungo la spiaggia dei Maronti (Comune di Barano Isola d'Ischia- Napoli)". Geologia Tecnica & Ambientale, n. 1, gennaio/marzo 2000.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Dredging and dredged material disposal". EM 1110-2-5025; CECW-EH-D, Washington D.C., 1983.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of coastal groins and nearshore breakwaters". Engineering Manual NO.1110-2-1617, Washington D:C., 1992.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of coastal revetments, seawalls and bulkheads". Engineering Manual EM 1110-2-1614, Washington D.C., 1995.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Engineering and design of military ports". TM 5 850-1, Headquarters Department of the Army, Washington D.C., 15 february 1983.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Hydraulic design of navigation locks". CECW-EH-D, Engineer Manual EM 1110-2-1604, Washington D.C., june, 1995.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Hydraulic design of small boat harbors". EM 1110-2-1615, CECW-EH-D, Washington D.C., 25 september 1984.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Review of recent geotextile coastal erosion control technology". Technical Letter ETL 1110-2-353; CECW-PF, CECW-EH-D, Washington D.C., 31 december 1993.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Shore Protection Manual". Volumes I and II, U.S. Army Coastal Engineering Research Center. Books for business, New York Hong Kong, 1984.

Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers "Tidal hydraulics". CECW-EH-D, EM 1110-2-1607, Washington D.C., march, 1991.

Douglass S.L., Pickel B. H. "Headland beach construction on bay shorelines". Proceedings of 12th Ann. Nat. Conf. Beach Preservation Technology, Alabama, 1999.

Ferro V. "La sistemazione dei bacini idrografici". McGraw Hill, Milano, 2002.

FORTE S.L. "Arrecife Artificial BeachsaverForte". Brochure, FORTE Hormigones Tecnologicos S.L., 2000.

Gavin N. P., Colin D. C. Design and construction of rubble mound breakwaters". IPENZ Transactions, Vol. 25, No.1/CE, New Zealand, 1998.

Goda Y. "Random seas and design of maritime structures". University of Toko Press, Tokyo, 1985.

-
- Gormitz & Levedeff "Global sea level changes during the past century". In: Warrick R.A., Barrow E.M., and Wigley M.L. (Eds.), 1987.
- Graw K.U., Knapp S., Sundar V., Sundaravadivelu R. "Dynamic pressures exerted on semicircular breakwaters". LACER NO.3, Leipzig (Germany), 1988.
- Hanson H., Kraus N.C. "Chronic Beach Erosion Adjacent to Inlets and Remediation by Composite (T-Head) Groins". ERDC/CHL CHETN-IV-36, U.S. Army Corps of Engineers, June 2001.
- Harris L. E. "Breakwater water attenuation". Brochure, Advanced Coastal Technology Inc., Topton, NC, 2002.
- Harris L. E. "Submerged reef structures for habitat enhancement and shoreline erosion abatement". CETNIIIxx, Coastal Engineering Technical Note, September, 2001.
- Harris L.E., Mostkoff B.J., Zadikoff G. "Artificial reefs: from waste to resources". Oceans'96, Marine Technology Society, Washington D.C., 1996.
- Hiliau W., Philips D. "Artificial surfing reef construction". Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium, Raglan, New Zealand, 22-25 June, 2003.
- Holmes P. "Coastal and offshore structures". A course in coastal defense systems 1 Chapter 10. Professional Development Programme. Coastal Infrastructure Design, Construction and Maintenance. St. Lucia, West Indies, July 18-21, 2001.
- Hsu J.R.C., Silvester R., Xia Y.M. "Applications of headland control". J. waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, ED 395, ASCE, 115 (3), pp. 299-310, 1989.
- Ireeta T. W., Sørstrøm M., Sivertsen A., Steinnes Jensen M. H., Puybaret C., Forslund K. "A comparison of dredging and in situ capping". NTNU, TBA 4820, Professional Report in EiT; village 22 - A Clean and Rich Sea only a vision?, Team 2, Norway, 2004.
- Jarlan G.L.E. "A perforated vertical wall breakwater". The Dock and Harbour Authority, vol.41, No.486, pp.394-398, April 1961.
- Jones C.P., Johnson L.T. "Coastal construction practices". Project No. A/MAP-1, Grant No. NA80AA-D-0038. Marine Advisory Bulletin MAP-23, Florida Sea Grant College Program, January, 1982.
- Liu P.L.-F. "Advances in coastal and ocean engineering". World Scientific Publishing Company, Ithaca, NY, 1995.
- MAFF "Flood and coastal defence project appraisal guidance strategic planning and appraisal". FCDPAG2 A procedural guide for operating authorities, April, 2001.
- Malkoski V. "Artificial reef project". Division of Marine Fisheries, Massachusetts, 2002.
- Mandaglio G. (a cura di) "Ambiente costiero e misure di salvaguardia". Falzea Editore, Reggio Calabria, 2005.
- Matteotti G. "Lineamenti di costruzioni marittime". S.G.Editoriali, Padova, 1994.
- Matteotti G., De Santis M., Marconi V. "Difese di spiaggia con strutture flessibili semipermeabili. Esame del loro comportamento su modello a fondo mobile". Istituto di Costruzioni Marittime e di Geotecnica, Università di Padova. Padova, 1979.
- Minikin R.R. "Winds, Waves and Maritime Structures". Griffin, London, 1963.
- Moffat & Nichol "Low cost shore protection : final report on shoreline erosion control demonstration program (section 54)", U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA, 1981.
- Mondini F. "La coltivazione di cave sottomarine di sabbia di ripascimento". Ricerca effettuata nell'ambito della Convenzione fra Regione Lazio e Dipartimento di Scienze della Terra-Univ. La Sapienza sul tema <Individuazione e caratterizzazione di depositi sabbiosi presenti sulla piattaforma continentale del Lazio e valutazione di un loro utilizzo ai fini di ripascimento dei litorali in erosione>. Roma, 1998.

-
- Moreno L. J., Kraus N. C. "Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design". Proceedings of Coastal Sediments'99, ASCE, Vol. 1, New York, pp. 860-875, 1999.
- Noli A. "Calate portuali e terminali marittimi: criteri generali di pianificazione e di costruzione". Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Ed. ESA, 1988.
- NOMATEC "Electrochemical Reef CONstruction (ERCON)". Brochure, NOMATEC Project, 2002.
- Ogaya S., Ishii T., Kawamura R., Okamoto T., Yamada K. "New steel technologies essential for social infrastructure development". NKK Technical Review No. 88, Japan, 2003.
- Oumeraci H., Kortenhaus A., Allsop N.W.H., e Groot M.B., Crouch R.S., Vrijling J.K. „ Probabilistic design of caisson breakwaters and seawalls- Present status & perspectives". ICCE, 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney (Australia), july, 2000.
- Panizza M. "Geomorfologia". Pitagora Ed. Bologna, 1992.
- Perdock U.H. "Application of timber groynes in coastal engineering". M.SC. Thesis, Section of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of technology, The Netherlands, december 2002.
- Pilarczyk K.W. "Design of low-crested (submerged) structures an overview". 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Sri Lanka, Colombo, 2003.
- Pilarczyk K.W. "Design of revetments". Dutch Public Works Dpt. (RWS), Hydraulic Engineering Division, Delft, The Netherlands, 2001.
- Pilarczyk K.W. "Hydraulic and coastal structures in international perspective". Dutch Public Works Dpt., Road and Hydraulic Engineering Institute, Delft, The Netherlands, 2003.
- Pilarczyk K.W. "Intergrated approach and future needs in coastal engineering: general remarks". International Conference on Estuaries and Coasts. Hangzhou, China, November 9-11 2003.
- Ricci Lucchi F. "Sedimentologia". Parte II, CLUEB Ed., Bologna, 1980.
- Schiereck G. J. "Introduction to bed, bank and shore protection". Delft University Press, july, 2001.
- Seament Shoreline Systems Inc. "Breakwater boxes". Brochure, Seament Shoreline Systems Inc., 2004.
- Shankar N. J., Cheong H. F., Nallayarasu S. "Coastal protection by submerged plate breakwater". Dept. of Civil Engineering, vol. 11, no. 1, National University of Singapore, Singapore, 1996.
- Silvester R., Hsu J. R. C. "Coastal stabilization". Prentice Hall Ed., Englewood Cliffs, 1993.
- Silvester R., Hsu J. "Coastal stabilization, innovative concepts". Prentice Hall Ed.. New Jersey, 1997.
- Simm J., Cruickshank I. "Construction Risk in Coastal Engineering". T. Telford Ed., UK, 1998.
- Skinner P., Bankston D., Reichel C., Baker G. "Using levees for flood protection". Louisiana State University Agricultural Center, Pub. 2744 (10M), july 1999.
- Szedlmayer S. T. "Artificial reefs: design, placement and permitting". ANR-828 MASGP-94-010, Auburn University, Marine Extension & Research Center; Sea Grant Extension, 1994.
- Tomasicchio U. "Manuale di Ingegneria Portuale e Marittima". Bios Ed. Cosenza, 1998.
- Tomasicchio U. ed Altri "Istruzioni tecniche per la progettazione di opere di difesa della costa". Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1991.
- Tomasicchio U. "Istruzioni tecniche per la progettazione e la esecuzione di opere di protezione delle coste in erosione". Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 1991.

U.S. Army Corps of Engineers "Port Construction and Repair". FM 5-480, Headquarters, Department of the Army, Washington D.C., 12 december 1990.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Availability of Concrete Armor Units Forms". CETN III-19, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, september 1994.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Bulkheads Their Applications and Limitations". CETN III-7, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Groin system transitions". CETN III-12, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, june, 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Groins Their Applications and Limitations". CETN III-10, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Revetments Their Applications and Limitations". CETN III-9, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Riprap Revetment Design". CETN III-1, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, june 1985.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Seawalls Their Applications and Limitations". CETN III-8, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, march 1981.

U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station "Use of Gabions in the Coastal Environment". CETN III-31, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, december 1986.

U.S. Department of the Army "Port construction and rehabilitation". Technical Manual TM 5-360, Washington D.C., September 1964.

Wolcott Sample J. "An evolving method of coastal erosion control". Advanced Coastal Technology Inc., Geotechnical Fabrics Report, march 2002.

Yunovich M., Mierzwa A.J. "Waterways and Ports". Article, www.corrosionimpact.com, 2002.

Appendice

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI

ISTRUZIONI TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE E LA ESECUZIONE DI OPERE DI PROTEZIONE DELLE COSTE

Le presenti istruzioni sono state proposte in una prima formulazione dalla commissione di studio nominata con provvedimento della Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 23/03/1990 e confermata con decreto del Ministero dei LL.PP. n. 652 del 05/02/1991. Qui si riportano i nomi dei partecipanti:

U. Tomasicchio: presidente, F. Adamo, E. Benassai, A. Brambati, R. Dal Cin, M. Cipriani, A. Lamberti, G. Liberatore, G. Matteotti, A. Ragone, S. Stura, G. Scarsi, L. Natale: membri, F. S. Campanale: membro segretario.

La suddetta proposta è stata successivamente modificata in base ai suggerimenti scaturiti dalla discussione nelle riunioni della Commissione relatrice e in aula. La discussione in Assemblea Generale è iniziata il 19 aprile 1991 per concludersi il 28 giu-gno dello stesso anno. I

NDICE

1. INTRODUZIONE

- 1.1. Problematiche e obiettivi
- 1.2. Oggetto delle istruzioni
- 1.3. Requisiti generali per la progettazione e l'esecuzione
- 1.4. Problemi di inserimento ambientale
- 1.4.1 Vincoli territoriali

2. RILIEVI ED INDAGINI PRELIMINARI ALLA PROGETTAZIONE

- 2.1. Unità fisiografica
 - 2.1.1 Definizione di unità fisiografica
 - 2.1.2 Identificazione in base alla morfologia della linea di riva
 - 2.1.3 Identificazione in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche
 - 2.1.4 Identificazione in base al regime delle onde e delle correnti
- 2.2. Rilievo dell'assetto attuale e della tendenza evolutiva
 - 2.2.1 Inquadramento del paraggio e definizione del settore di traversia
 - 2.2.2 Linea di riva
 - 2.2.3 Topografia della spiaggia emersa
 - 2.2.4 Topografia della spiaggia sommersa
 - 2.2.5 Sedimenti
 - 2.2.6 Subsidenza ed eustatismo
 - 2.2.7 Maree astronomiche e meteorologiche
 - 2.2.8 Regime dei venti
 - 2.2.9 Regime del moto ondoso
 - 2.2.10 Regime delle correnti
 - 2.2.11 Variazioni stagionali ed eventi eccezionali
 - 2.2.12 Caratteri socio economici dell'area costiera e valutazioni delle infrastrutture
- 2.3. Analisi dei processi costieri
 - 2.3.1 Trasporto litoraneo
 - 2.3.2 Apporti fluviali
 - 2.3.3 Azione eolica
 - 2.3.4 Altri apporti ed asporti
 - 2.3.5 Bilancio dei sedimenti
- 2.4. Monitoraggio delle coste

3. LE OPERE DI DIFESA

- 3.1. Difesa aderenti
 - 3.1.1 Funzioni e limiti
 - 3.1.2 Indicazioni per il progetto
- 3.2. Pennelli
 - 3.2.1 Funzioni e limiti
 - 3.2.2 Indicazioni per il progetto
- 3.3. Frangiflutti distanziati
 - 3.3.1 Funzioni e limiti
 - 3.3.2 Indicazioni per il progetto
- 3.4. Ripascimenti e spiagge artificiali
 - 3.4.1 Funzioni e limiti
 - 3.4.2 Indicazioni per il progetto
- 3.5. Opere per la protezione di porti e canali di accesso
 - 3.5.1 Funzioni e limiti
 - 3.5.2 Indicazioni per il progetto
- 3.6. Dune, argini a mare e foci fluviali
- 3.7. Indicazioni per la scelta del tipo di opere
- 3.8. Il monitoraggio di controllo delle opere

4. ELABORATI DI PROGETTO

- 4.1. Elaborati descrittivi
- 4.2. Elaborati di verifica
- 4.3. Prove su modello
 - 4.3.1 Modelli fisici
 - 4.3.1.1 Modelli di propagazione ondosa
 - 4.3.1.2 Modelli di integrazione con strutture composte di gradi elementi
 - 4.3.1.3 Modelli di spiaggia
 - 4.3.2 Modelli matematici o numerici
 - 4.3.2.1 Modelli della propagazione ondosa
 - 4.3.2.2 Modelli di trasporto dei sedimenti ed evoluzione morfologica della spiaggia

1. INTRODUZIONE

L'erosione costiera è il risultato del complesso dei processi per cui è rimosso più materiale di spiaggia di quanto ne è depositato. L'erosione è prodotta dall'acqua, dal vento, dalla gravità o da agenti biologici e, in particolare, da interferenze antropiche. Le onde e le maree sono gli agenti più frequenti dell'erosione.

Larga parte del litorale italiano è soggetta a erosione. Il problema è critico lungo alcuni tratti. I costi sociali ed economici dell'erosione sono maggiori nelle zone più densamente popolate, su cui insistono infrastrutture urbanistiche, residenziali, industriali e turistiche di alto valore economico. Spesso le erosioni minacciano città o aree abitate.

Dune sovrautilizzate e non sufficientemente fissate da copertura vegetale sono soggette a migrazione e erosione da vento; falesie possono franare dopo essere state scalzate dalle onde.

Le tempeste coincidenti con l'alta marea producono gli effetti più immediati e pericolosi.

1.1. Problematiche e obiettivi

L'erosione naturale è più pronunciata su litorali esposti, caratterizzati da depositi non consolidati, scarsi apporti di sedimenti, da acque profonde vicino a riva, da forti correnti e da intense e frequenti perturbazioni. L'attività dell'uomo può accentuare questi problemi in molti modi. Probabilmente il modo principale è la sottrazione di materiale dagli alvei dei fiumi e dagli arenili e la costruzione di strutture che impediscono l'apporto di sabbia alle spiagge.

Queste comprendono opere di ritenuta sui fiumi, pennelli e moli sulla costa, difese di promontori, che un tempo fornivano sedimenti, e sistemazioni a difesa dei suoli in collina e montagna.

Lo smantellamento della costa da parte del mare è un fatto naturale, a cui naturalmente si oppongono gli apporti fluviali ridistribuiti dall'onda lungo costa. L'erosione è segno di una rottura di questo equilibrio e rende necessario un intervento quando minaccia strutture o beni od opere di difesa degli stessi.

L'intervento di difesa deve rispondere alla richiesta di stabilità e di sicurezza al costo ottimale derivante dalla frequenza ed intensità dell'evento che si vuole affrontare e degli effetti sulle aree adiacenti e in generale dell'impatto ambientale. Quest'ultimo dovrà tener conto sia degli aspetti estetici, sia di quelli ecologici e socioeconomici.

Al fine di non alternare gli equilibri preesistenti, dovranno preferirsi le opere che producono il minimo disturbo alla dinamica costiera, all'utilizzazione futura del territorio e all'aspetto estetico del litorale.

1.2. Oggetto delle istruzioni

Le presenti istruzioni attengono alle opere di ingegneria delle coste destinate alla risoluzione di problemi, quali la stabilizzazione della linea di riva, la protezione dell'area retrostante, la stabilizzazione di passi marittimi (canali di accesso ai porti) e, più in generale, alle opere che interagiscono con il litorale anche senza finalità protettive. Si fa astrazione dai problemi portuali veri e propri.

Ogni problema reale deve essere compreso nella sua dinamica e deve trovare soluzione, eventualmente articolata, scegliendo fra le tecniche di intervento sul litorale al momento disponibili.

Vengono discusse pertanto le indagini che vanno intraprese al fine di comprendere la dinamica del litorale oggetto del problema e le principali soluzioni strutturali.

1.3. Requisiti generali per la progettazione e l'esecuzione.

Il progetto deve comprendere tutti i disegni ed elaborati necessari ad individuare l'opera di cui si prevede l'esecuzione e la sua collocazione nel paraggio circostante, il computo metrico ed estimativo, ed una o più relazioni dalle quali risultino:

- le fonti da cui sono stati desunti i dati impiegati;
- le indagini e i rilievi effettuati nel corso della progettazione;
- le motivazioni che hanno portato alla scelta dell'opera rispetto ad altre alternative;
- la valutazione della risposta dell'opera alle finalità proposte;
- lo studio dell'impatto dell'opera sulla morfologia costiera;
- la valutazione preventiva dei benefici ritraibili dall'opera stessa;
- i calcoli per la verifica della stabilità dell'opera e delle sue parti, con motivata scelta dei parametri di sollecitazione;
- il calcolo dell'energia ondosa trasmessa al di là dell'opera, nonché di quella dissipata sull'opera stessa.

Dovranno essere esposti nella relazione i risultati dei calcoli, delle indagini e degli studi intrapresi ed indicazioni sufficienti a ricostruire la metodica impiegata; i dati e gli elaborati intermedi dovranno essere esibiti ove richiesto.

Le sollecitazioni considerate nei calcoli di stabilità probabile della loro applicazione nel corso della vita presunta per l'opera stessa.

Dovrà essere valutata la possibilità del manifestarsi di erosioni della fondazione della struttura, naturali o indotte dall'opera stessa.

La valutazione del comportamento dell'opera dovrà essere effettuata sia in condizione di sollecitazioni estreme che nelle condizioni più frequenti o prevalenti.

La valutazione dei benefici e dei danni prodotti dall'opera dovrà essere effettuata tenendo conto della utilizzazione attuale del litorale interessato e di quella futura.

I progetti di opere, per le quali sussista dubbio nei riguardi della risposta funzionale, dovranno essere articolati per stralci esecutivi, e la risposta valutazione nel tempo a seguito di ogni stralcio; in sede di esecuzione di queste opere, dovranno essere previsti rilievi, che accertino la rispondenza dell'opera alle previsioni progettuali.

L'idoneità della soluzione progettuale deve comunque essere motivata nella relazione; similmente l'analisi costi-benefici andrà in ogni caso impostata attraverso la valutazione di: costo vivo di realizzazione e manutenzione dell'opera, costi indiretti per prevedibili danni ai litorali adiacenti, benefici diretti ai beni difesi e alle aree limitrofe.

La somma dei costi evidenziati dalla suddetta analisi definisce l'importanza (o rilievo) dell'opera, in proporzione alla quale dovranno risultare sufficientemente approfondite le indagini alla base del progetto.

Nella valutazione dell'importanza dell'opera, al fine di ottenere una voce confrontabile con la "stima dei lavori", si dovrà attualizzare ogni voce di costo al momento della esecuzione (o del suo inizio per opere di lunga realizzazione), utilizzando le valutazioni in atto tale momento ed un congruo interesse annuo.

1.4. Problemi di inserimento ambientale

Il raggiungimento di un razionale assetto urbanistico del territorio litoraneo risulta quanto mai problematico in Italia per gli enormi vincoli che l'urbanizzazione esistente impone.

Tuttavia se ne ravvisa la necessità, e il solo strumento che consente una utilizzazione ragionevole delle risorse è la formulazione di piani a diversi livelli, al fine di evitare lo spreco di interventi contraddittori.

Possono distinguersi, nell'ambito della pianificazione, i seguenti momenti: pianificazione dell'assetto fisico del territorio, pianificazione dell'assetto urbanistico, pianificazione degli interventi.

I tre momenti possono di fatto non susseguirsi, ma compenetrarsi nel tempo e negli elaborati.

La pianificazione dell'assetto fisico del litorale si proietta su un intervallo di tempo piuttosto lungo (50 - 100 anni). Essa dovrà individuare le linee generali di evoluzione del litorale, gli obiettivi che sono perseguibili a questa scala dei tempi, le condizioni fisiche essenziali al raggiungimento dei suddetti obiettivi.

Con riguardo al solo aspetto idrogeomorfico essa dovrà, ad esempio, prevedere la quantità e la granulometria degli apporti fluviali che si ritengono essenziali alla sopravvivenza del litorale, individuare a grandi linee le cave di prestito degli inerti necessari, definire l'ampiezza della fascia costiera, a cui si applica una normativa urbanistica particolare tenuto conto degli specifici fenomeni che in essa si attuano (erosione, subsidenza, frane a seguito dell'erosione, ingressione marina per alta marea).

Dovranno essere previste valli da pesca, stagni e zone umide in genere, in misura tale da garantire, attraverso una normale riproduzione della fauna ittica, l'equilibrio ecologico del mare antistante. Dovranno essere rispettati limiti ai carichi inquinanti e nutrienti versati in mare, previsti dalle legislazioni vigenti, in modo da assicurare un'adeguata qualità delle acque.

Nella fascia costiera dovranno essere individuate le zone a cui possono esternarsi gli effetti dei fenomeni di erosione, subsidenza, ecc. e l'intensità, che in esse possono raggiungere nell'arco di tempo a cui si applica la pianificazione.

A titolo di esempio, dovranno essere previste le ampiezze di oscillazione, a seguito delle alterne vicende climatiche, di spiagge in media stabili e l'evoluzione della linea di riva prevista per il periodo di piano.

La pianificazione urbanistica si applicherà ad un intervallo di tempo assai più breve (20 - 30 anni).

Sulla scorta delle esperienze attuali, possono darsi alcune generiche indicazioni.

La pianificazione dovrà privilegiare, in genere, lo sviluppo di infrastrutture urbanistiche estese in profondità (perpendicolarmente alla riva) rispetto alla costituzione di un insediamento a schiera (lungo riva), che vincolerebbe estesissimi tratti del litorale.

Le vie principali di comunicazione dovranno essere previste ad alcuni chilometri dalla costa.

Lungo riva dovrà comunque essere prevista una fascia non edificabile di rispetto, in cui potranno essere realizzati, in regime di concessione o simile, solo servizi per la pesca, la navigazione minore, il turismo balneare ecc. aventi tipologia costruttiva conforme alla precarietà del sito.

La sua ampiezza andrà determinata in relazione alla situazione dinamica del paraggio.

Dovranno essere individuate le aree in cui, in condizioni di eccezionale alta marea, saranno possibili invasioni marine oltre la suddetta fascia di rispetto.

Infine, i piani di intervento dovranno prevedere il complesso organico delle difese da attuare, valutando gli apporti fluviali e i trasporti litoranei dei sedimenti, individuando i tratti in cui le difese potranno sottrarre sedimenti al trasporto lungo riva, quelli in cui le difese non dovranno alternare i trasporti, i tratti in cui si evidenziano tendenze erosive generalizzate.

Dovranno essere identificanti orientativamente i quantitativi dei materiali richiesti e le cave di prestito a terra o a mare o lungo costa e più in generale le risorse, che possono rendersi necessarie a seguito degli interventi proposti.

Dovrà risultare anche un costo di massima della difesa ed un costo specifico (rapportato all'unità del bene difeso) per ogni tipo di difesa. Ciò al fine, tra gli altri, di identificare il costo o gli oneri che si debbono attribuire al superamento di vincoli (non essenziali) di gestione della costa come l'introduzione di una singolarità (ad es. un porto) nell'equilibrio fisiologico della costa o la coltivazione di cave.

L'amministrazione competente fissa i criteri generali di piano, li propone agli enti locali, affinché essi si dotino di un piano riflettente le condizioni locali, e valuta le conformità dei suddetti piani.

1.4.1 Vincoli territoriali

La fascia di rispetto, il divieto di nuove costruzioni costituiscono vincoli all'uso arbitrario del territorio.

Questi vincoli sono strumenti del piano idro-geo-marino e debbono essere da questo motivati.

In via transitoria, nel periodo di formulazione ed approvazione del piano, potranno essere imposti vincoli di salvaguardia preventiva al fine di evitare la corsa all'accaparramento del bene che si vede compromesso, o la costruzione di situazioni di fatto che possono rendere più onerosa o impossibile la attuazione del piano.

I vincoli possono essere di carattere specificatamente idro-geo-marino, quando hanno per fine la conservazione o difesa del territorio nei suoi aspetti fisici; fra questi vincoli:

- la fascia di rispetto avente per fine la conservazione della spiaggia naturale;
- la limitazione delle estrazioni di acqua o di altri fluidi dal sottosuolo, per limitare la subsidenza;
- le limitazioni alle estrazioni di inerti dagli alvei, al fine di evitare la erosione degli alvei stessi e la riduzione degli apporti al mare;
- le limitazioni ai carichi inquinanti o nutrienti delle acque di scarico e degli scarichi in genere.

Altri vincoli, che il piano potrà recepire dagli strumenti urbanistici o promuovere, sono quelli che si propongono di correggere tendenze ad un disorganico sviluppo degli insediamenti abitativi o produttivi; ad esempio:

- il vincolo a non realizzare nuove costruzioni in aree congestionate (a concentrazione superiore alla ottima o prevista);
- le limitazioni all'edificabilità (rapporto volumi/superfici, altezza);
- le limitazioni all'uso agricolo del suolo.

Ancora ulteriori vincoli potranno derivare dalle leggi di tutela i carattere ambientale, culturale e panoramico paesaggistico, che si propongono di conservare un bene dall'elevato valore intrinseco:

- parchi e riserve;
- edifici o aree di valore storico e architettonico; o dettate dalle esigenze della difesa militare;
- la fascia dei 300 metri dalla battigia, anche per le coste alte, e dei 150 metri dalle foci dei corsi d'acqua pubblici.

Si vuole qui ricordare l'utile contributo che le praterie di Posidonia forniscono alla stabilizzazione e all'innalzamento del fondale, opponendosi così ai processi erosivi.

Le praterie a Posidonia sono molto diffuse sui fondali italiani.

Tuttavia gli squilibri ambientali provocati dall'inquinamento, dalle discariche e dalle opere a mare tendono a far scomparire irreversibilmente le praterie, privando le spiagge di una protezione naturale in genere assai efficace.

Nei programmi di protezione delle coste si dovrà tener conto di quanto sopra, eliminando o attenuando tutti quei fattori che possano portare alla distribuzione irreparabile di questo importante elemento di stabilità e salvaguardia del litorale.

Tutti questi, ed altri probabilmente, sono strumenti che possono e debbono essere impiegati, purché ne risulti chiara la motivazione e la necessità.

2. RILIEVI ED INDAGINI

In questo capitolo si fornisce un quadro delle analisi da considerare prima di dare corso alla progettazione esecutiva di interventi sul litorale. Il livello di approfondimento delle indagini dovrà essere commisurato all'importanza dell'intervento stesso.

Fra di esse dovranno essere di volta in volta effettuate quelle che hanno effettiva rilevanza nel quadro generale del problema in esame.

2.1 Unità fisiografica

Le zone costiere, anche quando rappresentano unità geologiche uniformi in quanto conseguente ad un unico insieme di fenomeni morfostutturali legati alla genesi dello zoccolo continentale (piattaforma e scarpata) a cui appartengono, sono caratterizzate, da un punto di vista della dinamica del litorale, da un'associazione di tratti distinti più o meno ampi chiamati unità fisiografiche.

2.1.1 Definizione di unità fisiografica

Una unità fisiografica è caratterizzata dal fatto che i materiali che formano o contribuiscono a fornire la costa presentano movimenti confinati all'interno dell'unità stessa o scambi con l'esterno in misura non influenzata da quanto accade al litorale.

Il significato ingegneristico deriva dal corollario che gli effetti di un'opera costruita sul litorale non si estendono, a breve termine, al di fuori della unità fisiografica di cui essa viene a far parte.

Se ci si limita a considerare la più piccola area che, comprendendo l'opera, abbia la proprietà di cui sopra, l'unità fisiografica viene a coincidere con l'area di influenza degli interventi in essa attuati.

I limiti dell'area possono non risultare fissi nel tempo a seguito di eventi, naturali o artificiali, che modificando la costa, ne alterino la dinamica; ad esempio, forti erosioni o la costruzione di moli.

L'unità fisiografica rappresenta anche l'area alla quale ha significato estendere i rilievi inerenti al movimento delle sabbie. Dovranno inoltre essere indagati gli scambi fra essa e l'ambiente esterno.

L'identificazione dell'area può essere fatta sulla base delle cause dei movimenti: vento, onde, correnti, azione dell'uomo; oppure sulla base degli effetti dei movimenti: erosioni e depositi.

L'identificazione richiede un'individuazione seppure sommaria degli agenti dinamici (prevalenti), a cui sono connessi i movimenti, e una indicazione se questi sono influenzanti dall'evoluzione del litorale. Può ritenersi, in genere, che gli apporti fluviali e la sottrazione di materiali fini verso il largo non siano influenzati dalla suddetta evoluzione.

Se per litorale si intende la spiaggia emersa e sommersa per un'estensione tale da contenere i movimenti trasversali, l'unità fisiografica è costituita in genere dal tratto di litorale compreso fra due sezioni, entro cui il trasporto longitudinale netto è nullo.

Foci di fiumi o torrenti non interrompono l'unità fisiografica, anche se il verso del trasporto litoraneo è discorde sui due lati, in quanto modifiche anche piccole su un lato della foce inducono una diversa ripartizione degli apporti fluviali e pertanto esercitano influenza anche sul lato opposto.

Ai fini dello studio del comportamento idraulico di un litorale, possono considerarsi unità fisiografiche anche quelle individuabili su brevi intervalli di tempo, ad esempio una mareggiata o una stagione; ma l'uso corrente del termine in ambito progettuale si riferisce ad intervalli di tempo comparabili con la vita delle opere, mentre in ambito geomorfologico di riferisce ad intervalli molto più lunghi.

Al crescere dell'intervallo temporale di osservazione, unità fisiografiche distinte possono fondersi, perché ad esempio si realizza una mareggiata di particolare violenza, che comporta per i sedimenti movimenti prima non realizzati.

I limiti di unità fisiografiche di vasta scala sono determinati dai moti di deriva o trasporti netti quando questi sono significanti, avendo i moti alterni effetto solo a scala inferiore.

2.1.2 Identificazione dell'unità fisiografica in base alla morfologia della linea di riva

Essa si effettua in genere su base cartografica o su rilievi aerofotogrammetrici, in quanto la linea di riva è in essi facilmente identificabile.

Tale identificazione si fonda sulla osservazione di alcune forme indicanti il verso del trasporto litoraneo, di cui le principali sono:

- accumuli-erosioni a seguito della costruzione di opere intercettanti il trasporto litoraneo;
- dissimmetrie nelle spiagge concorrenti ad un capo roccioso;
- deviazione delle foci fluviali nel verso della deriva litoranea;
- forme caratteristiche delle due estremità dell'asse del trasporto;
- cuspidi focali o falesie nelle zone di divergenza dei trasporti litoranei;
- cordoni uncinati (flèches) o spiagge concave, in cui ha termine o converge il trasporto litoraneo;
- erosioni o protendimenti indicativi rispettivamente di divergenza o convergenza dei trasporti litoranei, ove si intenda per divergenza il crescere del trasporto nel verso del trasporto stesso.

2.1.3 Identificazione in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche

Essa viene eseguita attraverso il prelievo di campioni del fondo mobile sui quali si effettuano analisi composizionali e tessiturali.

I campioni dovranno essere prelevati fra il materiale mobile o residente in punti diversi e ben identificati. È opportuno che il punto di prelievo venga ubicato con sufficiente precisione, particolarmente in rapporto alle forme caratteristiche della spiaggia (berma, battigia, truogoli, barre,), fornendo una planimetria con indicazioni dei suddetti punti e forme. I prelievi di materiale mobile dovranno essere eseguiti nei primi (3-5) cm dalla superficie del fondale o della spiaggia.

Il prelievo di campioni potrà permettere di indagare sulla evoluzione temporale della sedimentazione e di caratterizzare i sedimenti che verranno rilasciati in caso di erosione.

La composizione petrografia dei sedimenti, comparata con quella delle possibili fonti, potrà individuare fra queste quella da cui effettivamente il sedimento deriva ed evidenziare pertanto gli spostamenti subiti.

Al trasporto è associata una usura e selezione dei grani e dei ciottoli, che ne altera lungo l'asse di trasporto dimensioni e forma.

L'usura agisce frantumando meccanicamente o disaggregando le rocce e particolarmente la parte più esposta di queste, mentre la selezione è associata al variare della capacità di trasporto al variare delle dimensioni dei sedimenti.

la selezione è trasversale e longitudinale; quella trasversale, che in genere avviene con spostamenti di massa reversibili e piccoli o nulli, tende a portare ogni particella ad una profondità in cui essa si trova in equilibrio statistico; quella longitudinale è invece associata sempre ad un consistente trasporto di massa, ed, essendo la capacità di trasporto in proporzione inversa alla dimensione dei sedimenti, la selezione avviene nel senso che i sedimenti più fini sono soggetti ad un maggiore spostamento rispetto ai più grossolani, venendo erosi più facilmente e depositati più lentamente.

La selezione trasversale avviene concentrando in genere verso riva i sedimenti più grossolani e portando al largo i più fini, ma, per il variare dell'agitazione ondosa e per i cicli deposizionali associati alle barre, non sono infrequenti inversioni locali rispetto alla suddetta tendenza. Per i grandi spostamenti longitudinali in assenza di apporti distribuiti lungo l'asse, la direzione del trasporto è caratterizzata dal diminuire delle dimensioni dei componenti dei sedimenti e dal crescere della loro rotondità. Le zone in erosione manifestano una più accentuata variazione trasversale nelle dimensioni dei sedimenti. I materiali pesanti si comportano come la frazione più grossolana dei sedimenti, forse accentuando per il maggior peso specifico la selezione per trasporto.

2.1.4 Identificazione in base al regime delle onde e delle correnti

Questa linea di ricerca tende a caratterizzare i regimi delle onde e delle correnti efficaci per il trasporto costiero. Vanno in particolare esaminate le correnti lungo riva, secondariamente le correnti di ritorno e il getto di risalita.

Tale regime può essere valutato:

- 1.sulla base di rilevamenti dello stato del mare, fornendo ove possibile, unitamente ai dati rilevati, anche le descrizioni della strumentazione utilizzata, con relativa calibrazione, e della tecnica di elaborazione; quando si utilizzano dati rilevati da ondometri non direzionali, andrà descritto il metodo seguito per attribuire la direzione di provenienza alle onde rilevate;
- 2.sulla base di dati meteorologici elaborati secondo valide metodologie (il progetto dovrebbe contenere, unitamente alle conclusioni raggiunte, i dati utilizzati per l'elaborazione e le quote caratteristiche delle stazioni di misura);
- 3.sulla base di sistematici rilevamenti delle velocità delle correnti, utilizzando appositi indicatori o traccianti, di cui è opportuno venga data precisa indicazione metodologica e di levata dei dati;
- 4.sulla base di individuazioni e rilevamenti sul fondale di morfotipi e di strutture connesse con il regime correntizio.

Il regime ondoso e correntizio dovrà essere convertito in trasporti litoranei associati secondo metodologie valide, di cui si ritiene vadano fornite note esplicative.

Dal regime dei trasporti potrà calcolarsi il trasporto netto. Valendosi limitare al solo verso del trasporto netto, si potrà valutare un valore medio dell'agente del trasporto esaminato, opportunamente pesato per tener conto della sensibilità del trasporto all'agente stesso.

2.2. Rilievo dell'assetto attuale e della tendenza evolutiva

Le indagini di cui al paragrafo 2.1 permettono di evidenziare su di un litorale i limiti di un'unità fisiografica e di stabilirne le linee essenziali di tendenza evolutiva.

Sulla base dell'evoluzione del litorale dedotta a partire da una indagine storica associata all'interpretazione degli effetti provocati da eventi o interventi operati sul litorale stesso, dovrà formularsi una previsione sull'evoluzione futura della spiaggia. A tal fine andranno svolte specifiche indagini sulla linea di riva, sulla topografia della spiaggia emersa e sommersa, nonché sui sedimenti di cui è costituita, così come di seguito descritte.

2.2.1 Inquadramento del paraggio e definizione del settore di traversia

Rappresenta il primo passo dell'indagine volta ad individuare la presenza di tendenze evolutive di un tratto di litorale ed è mirata alla raccolta delle informazioni di base necessarie all'analisi.

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

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

2.2.2 Linea di riva

Lo studio per l'individuazione delle linee di riva dovrà prendere in considerazione i rilievi cartografici ed aerofotografici esistenti ed eventualmente completarli con un'indagine di campagna.

L'indagine inizierà con la sistemazione od individuazione di opportuni caposaldi (quotati) lungo il litorale, di cui andranno fornite le monografie, in modo che essi possano essere utilizzati nel tempo per effettuare rilevamenti periodici della linea di riva.

Le relative rappresentazioni cartografiche, per poter essere paragonate tra loro, vanno riferite al medio mare.

2.2.3 Topografia della spiaggia emersa

La topografia della spiaggia emersa rappresenta un altro dato fondamentale per lo studio della tendenza evolutiva in atto e può essere individuato o con il metodo della levata topografica o fotografica (con tracciamento di isoipse ad equidistanza non superiore a 50 cm) o con il metodo del rilevamento dei profili trasversali alla linea di riva ad interasse idoneo a fornire una corretta rappresentazione del profilo.

Per studi di vasta scala l'interasse potrà scegliersi dell'ordine del chilometro, mentre per studi più localizzati esso andrà congruamente ridotto.

Il tracciamento dei profili è opportuno che parta da un caposaldo quotato, di cui va fornita la relativa monografia per consentire la possibilità di ripetizione e di raffronto.

Si raccomanda che sul profilo, realizzato trasversalmente alla linea di riva a partire dal caposaldo, venga riportata anche la sua direzione azimutale, e siano evidenziate tutte le irregolarità o rotture di pendenza significative.

Al rilievo topografico, eseguito col metodo delle isoipse o con quello delle sezioni trasversali alla linea di riva, è spesso opportuno correlare le caratteristiche tessiturali dei sedimenti secondo le indicazioni riportate al paragrafo 2.2.5.

Il limite superiore della spiaggia emersa è fissato ordinariamente dalla massima estensione dell'azione dell'onda.

2.2.4 Topografia della spiaggia sommersa

Fra gli obiettivi dell'indagine topobatimetrica è essenziale quello di reperire informazioni sulla evoluzione della morfologia costiera, sia nello spazio che nel tempo, di evidenziare le eventuali modificazioni indotte dalle opere e di fornire i dati necessari all'impiego dei modelli matematici.

L'indagine, come è noto, consiste nel rilievo topografico della spiaggia emersa e sommersa (spiaggia attiva) mediante l'esecuzione di una serie di rilevamenti a maglia, con allineamenti trasversali e paralleli alla linea di riva.

Il passo della maglia verrà scelto di dimensioni piuttosto ampie, lì dove le integrazioni delle onde con i fondali sono minori, mentre verrà infittito nella zona in cui i fondali sono più bassi e dove sono presenti particolari situazioni evolutive.

La topografia della spiaggia sommersa andrà rilevata per sezioni trasversali alla linea di riva possibilmente con uno scandaglio di accertata attendibilità.

Le sezioni andranno opportunamente raccordate da alcuni profili di controllo condotti parallelamente alla riva.

Dovrà essere sempre ed esplicitamente indicato il riferimento altimetrico assunto per la valutazione delle profondità.

Quando le profondità siano misurate rispetto al livello medio mare, dovrà essere indicata la procedura seguita per la correzione di marea.

Per consentire la ripetibilità delle rilevazioni, le coordinate dei punti di scandaglio devono essere riferite a caposaldi fissi; andrà descritto anche il tracciamento dei dati batimetrici, di cui vanno fornite dietro richiesta le strisciate originali.

I profili della spiaggia sommersa andranno correlati con le caratteristiche tessiturali dei sedimenti secondo le indicazioni svolte ai paragrafi 2.2.5 e 2.3.4.

2.2.5 Sedimenti

I sedimenti che costituiscono la spiaggia emersa e sommersa vanno studiati nelle loro caratteristiche tessiturali cioè dipendenti dalla dinamica litoranea.

I campioni dei sedimenti, posizionati come indicato al paragrafo 2.1.3, andranno prelevati preferibilmente in corrispondenza di variazioni morfologiche o tessiturali così da risultare rappresentativi della zona campionata.

È consigliabile che le analisi granulometriche portino ad individuare i limiti dimensionali stabiliti da Wentworth.

Le dimensioni potranno essere espresse in mm, oppure, più opportunamente in ϕ (dove $\phi = -\log$ in base 2 del diametro espresso in mm.).

Gli intervalli delle classi dimensionali non dovranno superare 1 ϕ se il sedimento è ghiaioso o sabbioso, 1/2 ϕ se fangoso.

Le analisi granulometriche potranno essere fatte con strumentazioni diverse, purché di accertata attendibilità, in relazione al tipo di sedimento:

-ghiaie (setacci, calibro, sistemi fotografici, ecc.);

-sabbie (setacci, bilancia di sedimentazione, sedimentometri laser);

-fanghi (sedimentometri a raggi laser o pipetta, coulter counter, ecc.).

si dovrà naturalmente tener presente che i dati ottenuti con strumenti diversi non sono sempre direttamente confrontabili tra loro.

È opportuno che le analisi vengano condotte in modo da ricavare tutti quegli indici e parametri granulometrici, in primo luogo il diametro medio, che forniscono elementi per determinare la dinamica ed il bilancio dei sedimenti.

Si consiglia di fornire, almeno per le sabbie, oltre alla curva granulometria, i diametri corrispondenti alle seguenti percentuali: 5, 16, 25, 50, 75, 84, 95.

Insieme ai dati granulometri, vanno determinati anche il peso specifico medio e la velocità di sedimentazione.

Altre indagini tessiturali, come la morfometria dei ciottoli, posso dare interessanti indicazioni sulla dinamica costiera.

Assai utili per il bilancio dei sedimenti sono anche le indagini sul consumo per abrasione dei grani sabbiosi e dei ciottoli. I risultati di tali analisi possono essere correlati con la granulometria, la composizione del sedimento, le onde e la morfologia della battigia e della spiaggia sommersa.

Sulla base dei risultati ottenuti è opportuno vengano forniti gli elaborati cartografici atti a rappresentare le caratteristiche tessiturali dei sedimenti del fondo mobile, ed in modo particolare la loro granulometria, l'andamento dei parametri e degli indici sedimentologici, la distribuzione delle frazioni bioclastiche, limosa e argillosa.

Dovranno essere accuratamente descritte in allegato o rinviate ad una bibliografia descrittiva le tecniche analitiche e i metodi di elaborazione impiegati.

2.2.6 Subsidenza ed eustatismo

Significativa, ai fini della programmazione delle opere di difesa costiera, è la valutazione della tendenza evolutiva del territorio da proteggere entro i limiti delle possibili modificazioni positive o negative delle quote del livello del mare o del terreno.

Le modificazioni delle quote del mare sono legate al fenomeno dell'eustatismo (fenomeno generalmente a lunga scala temporale) e a fenomeni consegnati a maree astronomiche e meteorologiche (fenomeni generalmente a breve scala temporale).

Le modificazioni delle quote del terreno sono legate ai fenomeni di subsidenza naturale, di subsidenza antropica e di bradisismo (fenomeni sia a lunga che a breve scala temporale).

Per acquisire dati e notizie, si può procedere nel modo seguente:

1. Valutare la possibilità che esista una sensibile subsidenza in base ai seguenti elementi:

a) natura spiccatamente alluvionale della costa in esame;

b) presenza di forme cuspidate o lobate di origine deltizia;

c) esistenza di opere di bonifica idraulica lungo la costa o nell'immediato entroterra;

d) esistenza di sensibili ed estesi emungimenti idrici dalle falde sotterranee, anche per estrazioni di idrocarburi a terra o nella piattaforma marina antistante;

e) area ad alto rischio sismico.

Gli elementi elencati possono essere appurati mediante informazioni assunte sul luogo o desumibili da documentazione cartografia.

2. Verificare l'ipotesi di subsidenza, acquisendo dati quantitativi:

a) di stazioni mareografiche ubicate nell'area o molto vicine ad essa;

b) di livellazioni altimetriche e batimetriche di precisione ripetute sui medesimi caposaldi, eseguite con metodi per quanto possibili omogenei e "appoggiate" a caposaldi di riferimento, per i quali esiste un buon grado di certezza che siano stabili;

c) dalla letteratura specialistica sull'area.

In aree subsidenti, le strutture di progetto devono avere caratteristiche tali da consentire la sopra-elevazione o l'innalzamento o la "ricarica" dopo un certo numero di anni.

2.2.7 Maree astronomiche e meteorologiche

Le maree rappresentano oscillazioni del livello marino con periodi approssimativamente compresi tra un'ora e un anno.

Esse si distinguono in maree astronomiche, dovute all'attrazione gravitazionale degli astri (luna e sole) e maree meteorologiche, dovute a disuniformità della pressione atmosferica e all'azione del vento.

Il sollevamento del pelo libero medio, che si ha nella zona dei frangenti, di cui si tratta al paragrafo 2.3 (innalzamento da onda), costituisce un fenomeno localizzato alla stretta fascia litoranea e non si fa qui riferimento ad esso parlando di maree.

Nei mari italiani le maree non costituiscono in genere un fenomeno dinamico rilevante, se si eccettua l'Adriatico settentrionale, dove le maree sono esaltate dalla geometria del particolare bacino marino.

La prevalente importanza ingegneristica delle maree consiste, comunque, nelle variazioni indotte sulla elevazione del pelo libero medio rispetto ai fondali e alle opere civili.

La marea è rilevata mediante mareografi; il tracciato è analizzato in modo da separare le maree astronomiche, aventi periodicità ben definite e note a priori attraverso le analisi astronomiche, dalle maree meteorologiche che non hanno questa proprietà.

La marea astronomica, una volta che l'ampiezza e il ritardo rispetto alla causa perturbatrice delle diverse componenti di essa siano determinati mediante analisi armonica, può essere prevista per il futuro con grande esattezza.

Si potrà fare riferimento alla ricca bibliografia sull'argomento e alle previsioni di marea per le principali località costiere edite annualmente dal Servizio Idrografico della Marina.

La marea meteorologica si ottiene sperimentalmente per differenza fra la marea reale e la marea astronomica, dedotta la tendenza eventuale a lunghissimo termine che è dovuta a subsidenza e/o eustatismo.

Essa si compone di variazioni stagionali ed eventi di più breve durata, che si manifestano in stretta relazione con le perturbazioni meteorologiche.

La previsione o ricostruzione della marea meteorologica può essere fatta in base alla dinamica di generazione e costituisce un problema di rilevante complessità.

Quando nel paraggio in esame non sia presente un mareografo, si dovrà a seconda della precisione richiesta nella determinazione dei livelli, o:

i. installare un'asta mareografica e collegarla al livello medio mare tramite una livellazione (di precisione) fino al più vicino punto geodetico, o collegarla tramite il confronto dei livelli medi osservati per un medesimo intervallo di tempo sufficientemente lungo (30 gg. o più al crescere della distanza) sull'asta in oggetto e ai mareografi più vicini, oppure

ii. interpolare fra le misure dei mareografi più vicini (tendono conto che la marea è un'onda che trasla lungo costa); questa seconda procedura non pare consigliabile se il ritardo fra i mareografi supera 2-3 ore.

L'analisi della marea nel paraggio dovrà comunque arrivare a determinare il livello medio mare e il livello medio delle alte maree e basse maree. Per strutture più importanti e per opere che non debbano essere tracimate, si dovrà determinare il livello massimo raggiunto con un tempo di ritorno comparabile con la vita presunta della struttura, sulla base di una serie storica di lunghezza non molto inferiore.

Per opere in Alto Adriatico, il fenomeno della "acqua alta", che può superare ivi i due metri, dovrà essere esaminato con particolare attenzione.

2.2.8 Regime dei venti

L'importanza del vento per quanto riguarda il regime dei litorali è dovuta sia ai suoi effetti diretti che a quelli indiretti.

Gli effetti diretti consistono principalmente nella deflazione, cioè nel sollevamento ed asportazione delle sabbie che costituiscono le spiagge emerse, mentre gli effetti indiretti sono quelli della generazione del moto ondoso, di correnti di deriva e dell'innalzamento del livello marino per effetto di venti che spirano da mare aperto.

Il regime dei venti in una data località costiera può essere definito mediante distribuzioni di frequenza per settori direzionali e campi di velocità, con riferimento a periodi di osservazione possibilmente pluriennali (20 anni).

Possono essere utili anche rappresentazioni mediante diagrammi polari di distribuzione della frequenza, del vento filato (velocità per frequenza) o della prevalenza (velocità elevata al quadrato per frequenza).

Come dati di base per la definizione del regime del vento vanno assunti quelli forniti da stazioni anemografiche presenti nella zona in esame o in zone limitrofe, previo l'accertamento della significatività delle misure in base all'ubicazione degli anemometri.

Per la ricostruzione del moto ondoso mediante metodi indiretti è necessaria invece una caratterizzazione mediante successioni temporali di velocità e direzione del vento.

Per quanto riguarda i dati di vento necessari per la valutazione indiretta delle caratteristiche del moto ondoso, è da tener presente che i valori richiesti sono quelli del vento sul mare e non quelli rilevati a terra; quando non si disponga di dati di vento registrati direttamente sul mare (anemografi installati in piattaforme artificiali, isole, navi) sarà opportuno procedere alla correzione dei valori misurati a terra mediante opportuni fattori correttivi.

Nell'utilizzazione degli stessi dati, va tenuta presente sia la quota di rilevamento della velocità orizzontale del vento, (in quanto tali dati devono essere ragguagliati alla quota anemometrica standard), sia la differenza di temperatura tra acqua di mare e vento (in quanto tale differenza può condizionare il trasferimento di energia tra vento e mare).

2.2.9 Regime del moto ondoso

L'esposizione al moto ondoso assume un ruolo certamente primario sulla dinamica dei sedimenti costieri e, quindi, sulla evoluzione di un litorale.

L'azione delle onde, infatti, si esplica nella capacità di sollevare, selezionare, trasportare e disperdere i sedimenti di fondo.

Per poter individuare e quantificare la dinamica dei processi fisici in gioco risulta, quindi, essenziale ricostruire il clima ondoso del paraggio.

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

Come valori caratteristici delle altezze e dei periodi si possono prendere quelli corrispondenti o all'onda media o a quella significativa, la cui altezza è pari all'altezza media del terzo delle onde più alte e il cui periodo è il periodo medio di tali onde.

Nelle determinazioni dei valori suddetti dalle registrazioni è frequente il ricorso al metodo cosiddetto "dell'attraversamento dello zero", consistente nel considerare come onda quanto compreso fra due attraversamenti di zero nello stesso verso, essendo "zero" il livello medio della registrazione.

Per quanto riguarda singoli eventi di particolare interesse, una caratterizzazione più completa può essere ottenuta mediante rappresentazione spettrale.

I dati di base per la definizione del regime del moto ondoso possono essere ottenuti da rilievi diretti, o in assenza, mediante osservazioni visive o stime indirette che forniscono i dati significativi sui flutti, partendo dagli eventi meteorologici.

Il ricorso a queste ultime è spesso inevitabile per avere informazioni sulla direzione di provenienza del moto ondoso, nonché informazioni a lungo termine sugli eventi estremi, poiché gli strumenti di uso corrente non rilevano generalmente la direzione di provenienza delle onde e la durata dell'intervallo di tempo coperto dalle registrazioni è attualmente troppo breve, in genere, per fornire informazioni statistiche attendibili.

Facendo uso di valutazioni indirette in casi in cui siano disponibili anche misure dirette, sia pure per intervalli di tempo limitati, si dovrà verificare la congruenza delle due fonti di informazione e calibrare opportunamente il procedimento di ricostruzione indiretto adottato.

Per quanto riguarda le valutazioni indirette del moto ondoso, esse possono essere effettuate sulla base della conoscenza del vento spirante sul mare adottando metodi previsionali di uso corrente, come il metodo di Sverdrup, Munk e Bretschneider o altri proposti in tempi più recenti (vedi ad esempio SPM 1984).

Si ricorda che indagini relative agli eventi estremi assumono in genere scarsa rilevanza per il dimensionamento di opere su bassi fondali come le opere di difesa costiera, quando l'onda si presenta frangente con frequenza sensibile.

In ogni caso, la conoscenza del clima ondoso sulle basse profondità riferito ai diversi livelli medi del mare riveste una fondamentale importanza nello studio della dinamica litoranea.

Sia le valutazioni indirette che, in generale, le misure dirette forniscono le caratteristiche del moto ondoso al largo.

Per la valutazione delle condizioni di incidenza nelle zone di interesse, è necessario trasportare i dati stessi sotto costa mediante analisi dei fenomeni associati alla propagazione del moto ondoso in acque basse (shoaling, rifrazione, fenomeni dissipativi, frangimento), per individuare il clima ondoso anche in tali situazioni.

2.2.10 Regime delle correnti

Le correnti possono essere schematicamente suddivise in:

- correnti da moto ondoso
- correnti di marea
- correnti generate dal vento
- correnti di densità.

Queste ultime sono raramente significative nel Mediterraneo per ciò che riguarda le opere costiere.

Le correnti di marea hanno importanza nei paraggi interessati da forti escursioni di marea e, anche per modeste escursioni, quando l'effetto dell'onda di lungo periodo è accentuata da particolari condizioni geometriche dei fondali e delle coste.

Ciò si verifica nel caso di fondali a dolcissima acclività, nel caso di particolari topografie del fondo e, più frequentemente, nel caso di bocche di accesso a lagune o a specchi portuali interni di considerevole estensione.

Le velocità delle correnti di marea variano con continuità durante i cicli di marea; esse possono presentare valori opposti durante la giornata.

Ad esse sono generalmente associate velocità residue conseguenti agli spostamenti orizzontali netti delle masse d'acqua alla fine dei predetti cicli.

Tali velocità residue sono in generale modeste, ciò non toglie che esse possano essere importanti, data la loro persistenza, nello studio relativo alla dispersione a mare di inquinanti e nutrienti, specialmente su bassi fondali o in prossimità delle coste dove esse possono risultare esaltate.

Le correnti da vento sono generate dalle tensioni tangenziali esercitate dal vento sugli strati superficiali del mare; il movimento di massa si propaga agli strati sottostanti principalmente per effetto di mescolamento turbolento.

Nel mare aperto il ritorno di massa può realizzarsi negli strati più profondi; sulle basse profondità possono invece instaurarsi trascinamenti globali di massa con conseguenti innalzamenti del livello medio nella zona sottocosta e flussi di ritorno localizzati.

Per tale motivo, le correnti da vento devono essere accuratamente studiate soprattutto nei bracci di mare chiusi, dove l'innalzamento del livello medio e il conseguente abbassamento nella zona prossima all'imboccatura possono significativamente influenzare l'evoluzione del moto ondoso e determinare l'instaurazione di oscillazioni stazionarie longitudinali.

Le correnti da moto ondoso sono decisamente le più importanti per quanto riguarda il regime dei litorali.

Esse interessano sia la zona dei frangenti sia la fascia esterna.

In considerazione dell'importanza che le correnti da moto ondoso rivestono nella dinamica della spiaggia e sul trasporto dei sedimenti, è necessario che il relativo regime venga accuratamente studiato ed individuato per acquisire gli elementi indispensabili per la progettazione di opere costiere.

La misura diretta delle correnti da moto ondoso è operazione che presenta non poche difficoltà.

In linea delle correnti messo in evidenza dalla torbidità, da oggetti galleggianti di massima si individua preliminarmente, mediante osservazione da punti possibilmente panoramici, il generale sistema direzionale appositamente lanciati, dalla configurazione delle linee di frangimento e da altre caratteristiche morfologiche della linea di riva.

Successivamente, determinate le posizioni più interessanti, si effettuano vere e proprie misure di corrente, mediante correntometri per la zona esterna alla fascia dei frangenti, o mediante lancio di un congruo numero di galleggianti o traccianti per la zona interna.

2.2.11 Variazioni stagionali ed eventi eccezionali

Tutti i fenomeni meteorologici e di conseguenza il moto ondoso e le evoluzioni di spiaggia evidenziano delle periodicità stagionali.

Nell'effettuare confronti fra situazioni rilevate in tempi diversi non si potrà in genere, a meno che l'intervallo di tempo fra di essi superi circa 20 anni, prescindere da queste fluttuazioni.

Quando esistano rilievi sufficiente sarà sufficiente confrontare rilievi fatti a distanza di anni interi; in caso contrario, sarà necessario individuare la componente ciclica stagionale, e separare nel confronto la differenza dovuta alla ciclicità dalla tendenza evolutiva.

Ancora, alcuni eventi di eccezionale intensità possono produrre effetti, che non vengono riassorbiti prima di uno o due anni.

Potranno definirsi eccezionali gli eventi che abbiano un tempo di ritorno di 5 anni o più.

In ogni caso i rilievi dovranno essere messi in correlazione con il ciclo stagionale e con gli eventi di intensità particolare (tempo di ritorno superiore a 1 anno).

2.2.12 Caratteri socio economici dell'area costiera e valutazioni delle infrastrutture

Appare necessario che qualunque piano di interventi a difesa della costa venga concepito e progettato tenendo in considerazione un complesso di fattori inerenti le attività umane che hanno luogo sul territorio costiero; fattori che qui brevemente vengono indicati come "socioeconomici", tra i quali vanno soprattutto considerati l'uso, presente e previsto, del territorio interessato dagli interventi ed il valore economico di delle infrastrutture che a quell'uso sono necessariamente connesse.

Nel caso di interventi singoli, che non si inseriscono in un piano o in un progetto di più vaste dimensioni che li giustifichi, vanno comunque considerati i fattori sopraindicati, potendosi limitare però l'analisi a quanto necessario per determinare, con approssimazione proporzionata alla importanza dell'intervento, il valore dei beni che possono essere interessati dall'intervento stesso.

Fra le infrastrutture più frequenti, possono essere identificati i seguenti tipi:

- linee di difesa della costa dalla erosione, dalla azione diretta delle onde e dalla ingressione marina;
- spiagge ad uso turistico balneare;
- infrastrutture per la pesca, la navigazione minore e da diporto.

La valutazione dell'uso futuro dovrà essere fatta prendendo in considerazione: i piani urbanistici esistenti, le tendenze rilevabili ed i livelli di saturazione prevedibili.

Si osserva che i piani urbanistici rappresentano elaborati progettuali delineanti norme sull'uso del territorio predisposte ad una certa data; la presenza di questi, anche recenti, non dispensa dal rilievo dell'uso effettivo valore economico degli oggetti (beni immobili infrastrutture, ecc) potrà essere stimato:

1) sulla base del costo di costruzione rivalutato, per beni pubblici di costruzione recente (in via di ammortamento).

2) sulla base del valore commerciale, quale rilevabile per es. dalla registrazione di compravendite, o sulla base del reddito catastale, per i beni privati.

3) sulla base del reddito netto annuo delle attività che questi (edifici, aree, infrastrutture) contribuiscono a produrre, per quegli oggetti a cui non possono essere applicati i procedimenti precedenti e per quella parte del reddito che ad essi può pensarsi ascritta.

Esistono, inoltre, valori non traducibili con alcuna oggettività in termini economici, che converrà evidenziare, senza fornirne il corrispettivo.

Mentre il reddito derivante dalle attività, che hanno luogo sulla spiaggia, può essere totalmente ascritto alla spiaggia stessa, restano forti dubbi sulla quota parte del reddito, ad essa ascrivibile, derivante dalla attività alberghiera e commerciale dell'area costiera.

Per spiagge di località balneari, in mancanza di una determinazione diretta, che pare altresì opportuna in casi di importanza più che modesta, potrà assumersi orientativamente in 1/3 la frazione suddetta.

Una spiaggia protettiva ha la duplice funzione di spiaggia e di linea di difesa, e pertanto dovranno sommarsi le due valutazioni.

L'arretramento della riva non comporta necessariamente la perdita della spiaggia come forma, perdita che invece si produce generalmente quando si costruisca su una spiaggia in erosione una difesa radente; in tal caso al valore della difesa andrà sottratto in misura adeguata il valore della spiaggia.

Similmente, per i porti ad uso turistico, potrà aggiungersi, ai redditi derivanti dalle attività portuali, una parte (1/3 circa) della frazione del reddito turistico ascrivibile agli utenti del porto (utenti porto/presenze alberghiere nello stesso periodo di tempo).

Con reddito si è sempre inteso il reddito netto; esso potrà essere determinato dall'apporto monetario lordo del turismo, più facilmente determinabile (somma per le diverse categorie identificabili dei prodotti presenze per spesa giornaliera media procapite), attraverso un coefficiente di redditività determinato per campione.

Nel caso di porti impiegati anche per la pesca e la navigazione minore, dovrà essere valutato anche il reddito derivante da questa attività.

Pare infine opportuno che i beni ed i valori non monetizzabili vengano elencati espressamente in aggiunta a quelli monetizzabili per:

- facilitare la valutazione della convenienza a realizzare l'intervento,

- evidenziare il formarsi nel tempo, attraverso la capitalizzazione delle somme spese per la difesa di questi beni o valori, di una valutazione degli stessi, che li sottragga in qualche misura agli umori del momento.

Nei casi di opere di difesa, spiagge e porti, dovrà inoltre indicarsi il valore specifico assunto per la infrastruttura, essendo questo il rapporto fra il valore e la lunghezza della difesa, la superficie della spiaggia e del porto.

Infine, anche se non è in genere facile quantificarne le conseguenze, dovrà essere posta attenzione agli effetti che l'aspetto estetico dell'ambiente marino e la qualità delle acque possono avere sul turismo e le altre attività dell'area costiera.

2.3. Analisi dei processi costieri

Il tipo di problema costiero che si deve esaminare condiziona la scelta del tipo di indagine, scelta dei dati già disponibili, od eventualmente reperibili, adatti ad essere utilizzati.

È necessario inquadrare lo studio del problema in una visione ampia che consideri gli aspetti principali che intervengono alla scala spaziale delle unità fisiografiche, i quali, da un lato possono condizionare la risoluzione del problema stesso, dall'altro possono essere a loro volta influenzati dall'intervento locale che si intende effettuare.

L'indagine deve iniziare con l'interpretazione della dinamica della linea di riva dalla quale ricavare, a diverse scale temporali, gli avanzamenti o arretramenti della predetta linea (con corrispondenti processi erosivi o accrescitivi) e la direzione del trasporto litoraneo netto.

Particolarmente utile a questo scopo è l'esame comparativo di rilievi cartografici e di fotografie aeree, eseguiti in tempi successivi; tale esame può fornire infatti informazioni sia sull'evoluzione globale della linea di riva sia sui processi erosivi o accrescitivi locali dovuti alle opere litoranee via via realizzate.

L'indagine deve quindi proseguire analizzando i dati che possono condurre ad una valutazione quantitativa delle "voci" (attive e passive) del bilancio dei sedimenti, riferite ad un volume di controllo opportunamente individuato nella zona litoranea considerata.

Qui di seguito si ricordano le voci che generalmente intervengono nel bilancio:

- asporti ed apporti dovuti al trasporto litoraneo longitudinale e a quello trasversale;

- apporti fluviali;

- azione eolica;

- altri apporti ed asporti specifici

2.3.1 Trasporto litoraneo

Il trasporto litoraneo longitudinale e trasversale è conseguenza dell'azione del moto ondoso ed è in gran parte localizzato nella zona dei frangenti.

Esso è principalmente correlato agli attacchi obliqui del moto ondoso rispetto alle batimetriche sottocosta, ma può aversi anche per attacchi frontali quando le altezze d'onda lungo i fronti risultano modulate.

La valutazione quantitativa del trasporto longitudinale, sia al fondo (generalmente il più importante) sia in sospensione, può essere effettuato a partire da modelli teorici ed empirici riportati nella letteratura specializzata sull'argomento e in manuali di largo impiego.

Tali modelli richiedono, per la loro pratica utilizzazione, la conoscenza del clima ondoso locale e, in generale, delle caratteristiche sedimentologiche del materiale di fondo.

Per assicurare la loro adattabilità alla situazione locale sotto osservazione, può talora essere necessario ricorrere a tarature dirette, monitoraggio d'opere opportunamente predisposte allo scopo.

La valutazione quantitativa del predetto trasporto può essere effettuato anche a partire da stima numerica su zone limitrofe e trasferite alla zona in esame dopo averle esaminate e quindi adeguate alla luce di eventuali situazioni specifiche locali.

L'adeguamento richiede una sicura sensibilità ingegneristica nel valutare come tali situazioni locali possano modificare l'entità del trasporto.

Il profilo trasversale della fascia di spiaggia attiva si differenzia nel tempo in relazione alle modifiche stagionali del clima ondoso locale; esso può essere individuato in base a relazioni di uso ormai comune.

Il trasporto trasversale, sia al fondo sia in sospensione, oltre ad essere dovuto all'azione diretta del moto ondoso (trasporto "onshore-offshore"), può anche essere conseguenza della presenza di correnti di solcatura ("rip currents", correnti a getto verso il largo) alimentate dal trasporto longitudinale.

La valutazione quantitativa del trasporto trasversale netto risulta di difficile precisazione diretta.

Tale valutazione può essere effettuata per via indiretta, quando sia nota la distribuzione longitudinale del trasporto solido litoraneo, il comportamento nel tempo della linea di battigia e gli eventuali apporti e asporti.

2.3.2 Apporti fluviali

Gli apporti fluviali costituiscono la voce attiva generalmente più importante nei bilanci sedimentari di tratti di costa estesi. La frazione più grossolana (sabbie e ciottoli) si deposita nell'area di foce ed alimenta il trasporto litoraneo.

La frazione fine (limi e argille) si disperde al largo, depositandosi di regola sulla piattaforma continentale, e, pur essendo in genere la frazione preponderante nel totale dei sedimenti trasportati, ha sulla spiaggia effetto di non grande importanza e, soprattutto, molto ritardato e dilazionato nel tempo.

Il trasporto di sabbia e ciottoli avviene in genere come trasporto al fondo dei corsi d'acqua, in stretta correlazione con le condizioni idrauliche. Il trasporto di limi e argille avviene prevalentemente sotto forma di torbide; l'entità del trasporto è determinata dagli apporti da monte e non dallo stato idrometrico locale.

Le torbide si muovono con velocità media poco inferiore all'acqua, mentre forme di deposito o erosione del fondo si muovono (verso valle in alvei fluviali) con velocità di alcuni ordini di grandezza più piccola (da 10 elevato alla 3ª a 10 elevato alla 5ª in genere).

La misura del trasporto viene fatta generalmente mediante il prelievo di campioni con trappole, campionatori e bottiglie.

Mancando una precisa normativa, la modalità seguita per le misure e la elaborazione, i campionatori impiegati e i coefficienti di taratura assunti per questi dovranno essere espressamente descritti nella relazione.

L'entità del trasporto così determinato e le sue caratteristiche tessiturali dovranno essere messe in correlazione con le condizioni idrometriche e la portata.

Essendo il trasporto rapidamente crescente con la portata liquida, le misure dovranno essere eseguite in corrispondenza di stati d'acqua rappresentativi del regime idrologico con particolare attenzione agli eventi di piena.

Ove siano disponibili invasi lungo il corso in esame e previa valutazione dell'efficienza di trappola dell'invaso stesso, potranno ricavarsi stime generalmente attendibili del trasporto medio attraverso la misura dei volumi depositati nel lasso di tempo compreso fra due rilievi del fondo dell'invaso stesso.

Stime dei trasporti medi e della ripartizione granulometrica possono essere eseguite sulla base della conoscenza dei suoli costituenti il bacino e dell'uso a cui vengono sottoposti.

Altre stime possono essere desunte dall'analisi quantitativa dei reticoli idrografici (densità di drenaggio, pendenze, erodibilità dei versanti ecc...).

Tali stime dovranno essere confortate dal confronto con quelle ricavate con altri metodi.

Stime del trasporto di fondo possono farsi, sulla base della conoscenza del regime idrologico, dei caratteri morfometrici dell'asta in esame (pendenza, larghezza, ecc...) e dei caratteri tessiturali e sedimentologici dei sedimenti costituenti il letto, con l'impiego di formule semiempiriche per il trasporto solido di fondo descritte nei manuali; la stima è più attendibile se è disponibile una scala di deflusso.

Poiché l'entità del trasporto di fondo e le caratteristiche dell'alveo variano lungo l'asta fluviale, le misure ad esso relative dovranno essere eseguite non lontano dalla foce.

2.3.3 Azione eolica

La deflazione comporta la sottrazione di sabbie che possono essere trasportate verso il largo o nell'entroterra, la selezione granulometrica delle stesse (dato che vengono più facilmente asportate le frazioni più fini) e la formazione di dune (condizionata alla disponibilità di sabbie in quantità sufficiente e di idonee barriere, naturali o artificiali, che consentano l'intrappolamento delle sabbie in movimento)

Effetti indiretti dovuti all'azione del vento consistono invece, come si è visto in precedenza, oltre che nella generazione del moto ondoso, nella generazione di correnti superficiali (correnti di deriva) e nell'innalzamento del livello marino prodotto dai venti che spirano da mare aperto.

Alle correnti superficiali generate dal vento, ed aventi direzione in genere concorde con quest'ultimo, corrispondono nelle zone costiere correnti di ritorno sul fondo aventi verso opposto, dando luogo a sistemi di circolazione, che hanno qualche influenza nel trasporto di sedimenti nella zona litoranea.

2.3.4 Altri apporti ed asporti

Possono essere determinati da:

- versamenti artificiali e discariche;
- frane o erosioni del retrospiaggia (dune e falesie) e dai fondali rocciosi;
- produzione bioclastica (es. coralli, alcuni tipi di alghe ecc).

Tra gli asporti da considerare sono:

- il dragaggio e prelievi dalla spiaggia;
- il trasporto verso specchi d'acqua interni, porti o lagune;
- la rimozione di materiali a seguito di costruzioni civili;
- il trasporto nell'entroterra provocato dai bagnanti.

L'insabbiamento dei porti è valutabile attraverso i quantitativi dragati; non costituirebbe una perdita per il litorale a lungo termine se la risulta del dragaggio fosse restituita al litorale.

2.3.5 Bilancio dei sedimenti

Il bilancio dei sedimenti applicato ad una zona di litorale fornisce utili indicazioni sullo stato e sul prevedibile futuro del litorale stesso, ponendo soprattutto in evidenza l'importanza relativa delle voci di bilancio attive e passive. Quest'ultimo aspetto costituisce l'elemento più significativo del computo, in quanto dà al progettista di opere costiere una più approfondita sensibilità circa l'importanza della voce sulla quale le opere in progetto potranno incidere. Talvolta, un accurato bilancio, associato a misure di variazione areale della spiaggia sommersa ed emersa, può essere utilizzato al fine di valutare per differenza la voce o l'insieme di voci non altrimenti quantificabili.

Le voci attive e passive (apporti ed asporti) del bilancio sono già state singolarmente descritte nei punti che precedono. Vale qui la pena di riassumerle in un unico elenco.

Tra gli apporti da terra compaiono i materiali forniti dai corsi d'acqua e dall'erosione delle falesie e delle dune del retrospiaggia, le sabbie che entrano nel volume di controllo rispetto al quale si valuta il bilancio o per l'azione del vento e i versamenti artificiali.

Tra gli apporti da mare i materiali convogliati verso riva dalle correnti trasversali, e gli apporti bioclastici.

Tra gli asporti verso terra si dovranno considerare lo stoccaggio più o meno reversibile del materiale che fuoriesce dal volume di controllo per effetto dei venti di mare, le sabbie che formano le dune di retrospiaggia, quelle che le onde di tempesta spingono in condizioni di alta marea oltre linee di possibile ritorno o in specchi acquei interni e i materiali definitivamente persi prelevati da cave sul litorale.

Tra gli asporti verso mare: il trasporto dei sedimenti, particolarmente i più fini che si perdono al largo in correnti di ritorno o in solcature sottomarine (canyons), le perdite di materiale bioclastico, le perdite per soluzione di sedimenti.

Tra gli asporti verso specchi acquei interni: il materiale che entra attraverso le bocche portuali e lagunari e le sabbie che il mare trasporta tracimando sulle dune litoranee.

Tra gli asporti ed apporti debbono ascriversi infine, ma non ultimi per importanza, i trasporti longitudinali attraverso le sezioni estreme del volume di controllo.

Particolare cura dovrà essere posta nella scelta del volume di controllo, la cui estensione dipenderà dal tipo di studio che si deve condurre; una intera unità fisiografica per indagini di carattere generale, il tratto di spiaggia oggetto dell'intervento e le aree limitrofe per singole opere.

I progetti di opere a mare vanno comunque corredati da un accurato bilancio dei sedimenti relativi al volume di controllo che comprende le opere in progetto, e possibilmente da quello dei volumi di controllo delle spiagge adiacenti, il cui bilancio può essere in qualche modo influenzato dalle opere stesse.

2.4. Monitoraggio delle coste

Per una efficace politica di protezione costiera, indispensabile che i litorali siano oggetto di monitoraggio sistematico, che consenta di tenere sotto controllo il loro comportamento nel tempo.

Il monitoraggio potrà consistere in rilievi idoneamente sistematici del tipo suddescritto.

Nel sottolineare e ribadire l'importanza del monitoraggio agli effetti della conoscenza della tendenza evolutiva della spiaggia, occorre aggiungere che anche l'osservazione schematica della linea di riva fatta con semplici metodi topografici da terra e con riprese fotografiche consente informazioni utili e spesso sufficienti per lo scopo.

3. LE OPERE DI DIFESA

E' possibile distinguere le opere di difesa d'una costa in naturali o artificiali. Fra le prime vanno ricordate le spiagge e le dune.

Possiamo poi classificare le seconde in opere la cui principale funzione è quella di impedire l'azione erosiva dell'onda mediante il rivestimento e di sostenere il terreno a tergo (difese aderenti come muri di sponda, paratie a mare, rivestimenti), e opere di rifornimento artificiale di sabbia alla spiaggia per controbilanciare le perdite causate dai processi naturali o da interventi dell'uomo.

Le barriere frangiflutti foranee, comunemente indicate con il termine di difese parallele distaccate, e i pennelli, se usati per sottrarre materiale litoraneo al trasporto lungo riva, possono considerarsi rientranti in questa seconda categoria. I frangiflutti, quali opere che riducono l'azione dell'onda sulla riva, rientrano anche nella prima categoria.

Un intervento di difesa limitato ad un breve tratto di una riva in erosione si rivela quasi sempre antieconomico. Peraltro, non va dimenticato che una protezione, così limitata, potrà aggravare i fenomeni erosivi in atto o addirittura innescarne di nuovi sulle rive adiacenti non protette, il cui bilancio di apporti e asporti di sedimenti dovrà registrare in negativo il mancato arrivo del materiale non più eroso nel tratto protetto e quindi sottratto alla naturale dinamica del trasporto lungo riva.

Una tale considerazione, che un progettista non dovrà mai trascurare, suggerisce di coordinare ogni intervento di protezione di un'area costiera in un programma, che valuti i processi erosivi e le reciproche influenze su tutta l'intera unità fisiografica. Un tal modo di operare si rivelerà, a lungo e termine, molto più efficace ed economico.

3.1. Difesa aderenti

Strutture aderenti di vario tipo vengono impiegate a difesa di una riva non adeguatamente protetta da una spiaggia naturale.

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

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

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

I rivestimenti sono costituiti da semplice opera di protezione superficiale della scarpata della spiaggia, senza una precisa funzione statica di sostegno del terreno a tergo.

3.1.1 Funzioni e limiti

Le paratie, quali opere di breve durata, la cui costruzione si presenta spesso economica e veloce, potranno essere realizzate come opere provvisorie e provvisionali. In alcuni casi, esse vengono utilizzate come primo stadio della costruzione di un muro di sponda.

I muri di sponda, che proteggono e sostengono il terreno retrostante, provocano come le paratie l'approfondimento locale dei fondali. Infatti, l'azione delle onde, che frangono o si riflettono sulla parete, rimuove rapidamente la sabbia o altro materiale e, rodibile al piede della parete, modificando la situazione statica del muro, che può diventare instabile.

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

Le difese in massi (scogliere radenti) danno in genere luogo ad un approfondimento dei fondali al piede ancora più limitato, in quanto, essendo permeabili, permettono alla massa d'acqua frangente di penetrare al loro interno, dissipando una rilevante aliquota dell'energia in moti turbolenti. Queste opere, inoltre, possono essere considerate di tipo flessibile o elastico, nel senso che sono possibili anche sensibili spostamenti relativi dei massi che le compongono, senza che venga compromessa la loro stabilità, al contrario dei muri di sponda, rivestimenti, paratie ecc., che si comportano invece come rigidi ed impermeabili.

Le strutture aderenti possono essere utilizzate quali opere di protezione di una riva di cui si vuole interrompere l'arretramento, nei casi in cui manca un apporto di materiale litoraneo e la spiaggia protettiva è minima o inesistente, oppure nei casi in cui si voglia escludere la formazione di una spiaggia.

Un esempio del primo caso è rappresentato da un promontorio in erosione, uno del secondo da un lungomare cittadino.

Un chiaro limite delle strutture aderenti è quello di proteggere solo il territorio ad esse retrostante e non anche le aree adiacenti sopra o sottoflutto.

Inoltre, come s'è visto, mentre l'azione di approfondimento dei fondali al piede della struttura può intensificare la tendenza all'asportazione del materiale dalla spiaggia antistante, provocandone l'arretramento, l'interruzione dell'erosione del terreno retrostante sottrarrà del materiale alle spiagge adiacenti.

3.1.2 Indicazioni per il progetto

Quest'ultima considerazione fa risaltare l'utilità di alcune indagini preliminari, che faranno parte del progetto.

Fra queste, quelle circa l'evoluzione della linea di riva, la direzione del trasporto netto lungo riva, la valutazione della quantità di materiale di spiaggia sottratto al rifornimento delle spiagge adiacenti.

Il progetto conterrà, inoltre, insieme al calcolo statico della struttura e al calcolo della altezza di risalita dell'onda e della tracimazione su di essa, una ragionevole motivazione della scelta fatta.

La seguente discussione potrà servire come orientamento di larga massima per detta scelta.

Fattori di progettazione delle strutture aderenti sono: la scelta di una adeguata forma delle strutture, la sua ubicazione in relazione alla linea di riva, la lunghezza, l'altezza, la stabilità del terreno e il livello del mare. I tipi di profili in uso sono i più vari: verticali o quasi verticali, a scarpata, a curva convessa, a curva concava, a gradoni ad ognuno di essi potrà associarsi una certa funzione.

Una parete verticale, per esempio, ben si presta all'uso come banchina, posto di ormeggio o di attracco. Viceversa, una parete a curva concava, con la sommità sporgente all'esterno, è più efficace di una verticale contro la tracimazione.

Una simile struttura può quindi risultare una buona soluzione per una strada litoranea o una passeggiata a mare.

Anche efficaci nel ridurre la risalita dell'onda e la tracimazione, nonché nel dissipare l'energia dell'onda, sono le pareti e i rivestimenti inclinati ad alta scabrezza.

D'altro verso, l'uso di pareti verticali o quasi verticali, in genere esalta il pericolo di scalzamento per effetto dell'erosione al piede. Se il materiale del fondo è erodibile, sarà necessario prevedere una adeguata protezione al piede. Un rimedio può essere quello di realizzare un taglione o disporre, a protezione del fondo, del pietrame o un materasso contenente pietrame o altra simile protezione. Il pietrame dovrà avere dimensione tale da evitare lo spostamento, e la distribuzione granulometrica tale da funzionare da filtro per prevenire l'asportazione del materiale di fondazione ed il conseguente cedimento, per assestamento, del pietrame.

Il pericolo di scalzamento è generalmente inferiore per le strutture con pareti a scarpata, specie se la pendenza è bassa.

Nel caso di una scogliera, che in genere si abbasserà, slittando, per riempire l'affossamento creato dall'onda al piede fino a raggiungere una nuova posizione stabile, il cedimento risultante può essere compensato, sovrapporzionando la sezione trasversale o ponendo pietrame in eccesso, che possa andare a colmare la fossa. A titolo orientativo, converrà ricordare che la prevedibile profondità della fossa, sotto il fondo naturale, all'incirca dell'ordine dell'altezza della massima onda compatibile con il fondale originario.

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

Agli estremi delle strutture aderenti occorrerà sempre prevedere opportuni muri d'ala di raccordo per prevenirne aggiramento ai fianchi o comunque la progressiva avaria.

Converrà ricordare, infine, che, nel valutare il costo dell'opera; non potrà trascurarsi la stima del prevedibile danno alle rive adiacenti.

3.2. Pennelli

Sono strutture trasversali che in generale si estendono dal retrospiaggia (a partire da un punto sufficientemente radicato a terra perché il pennello non venga aggirato dal getto di risalita) alla prima linea dei frangenti di normale mareggiata (oltre la quale il trasporto litoraneo è insignificante). Sono stati costruiti pennelli di varia forma, in massi naturali o artificiali, in calcestruzzo o ferro o legno, fissi o modificabili.

I pennelli possono essere isolati o far parte di un "sistema di pennelli".

3.2.1 Funzioni e limiti

L'effetto di un pennello è quello di intercettare una parte o la totalità del trasporto lungo riva e formare un cumulo sul lato sopraflutto. Con riferimento al profilo altimetrico e planimetrico di detto cumulo e alla percentuale di trasporto litoraneo trattenuto, i pennelli vengono classificati alti o bassi, lunghi o corti, permeabili o impermeabili.

Nel caso di pennelli "alti", l'altezza del cumulo aumenta progressivamente finché la sua pendenza trasversale è compatibile con la stabilità della frazione più grossa dei granuli dei sedimenti. Raggiunta tale situazione, tutto il trasporto solido oltrepassa il pennello e, se il pennello è ben proporzionato, raggiunge l'area sottoflutto. Un pennello "basso" può invece consentire al materiale di scavalcare la sua sommità durante le mareggiate più forti e alimentare le aree sottoflutto. In ogni caso, l'altezza del tratto a terra di un pennello alto è quella della massima onda che risale la spiaggia durante le mareggiate; l'altezza del tratto a terra di un pennello basso è almeno pari a quella della berma della spiaggia che si intende realizzare.

L'altezza del tratto di pennello a mare rispetto alla futura spiaggia può essere congruamente minore, e ciò per motivi economici e per esigenze balneari ed estetiche.

La lunghezza di un pennello va determinata in base all'allineamento che si vuole attribuire alla futura spiaggia, tenuto presente che la linea di riva tenderà a disporsi perpendicolare alla risultante annua dell'attacco ondoso.

La lunghezza dipende inoltre dall'estensione della zona dei frangenti e dal fatto che si voglia intercettare la totalità o solo una parte del trasporto litoraneo.

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

Come precedentemente detto i pennelli possono essere singoli o far parte di un sistema. Pennelli singoli vengono utilizzati per aumentare localmente la larghezza della spiaggia sopraflutto, per la difesa di imboccature portuali o lagunari, per delimitare le estremità di difese radenti o di ripascimenti artificiali, per realizzare la chiusura di una nuova unità fisiografica o migliorare la definizione di una esistente, per individuare con maggior precisione, dal punto di vista della perdita longitudinale dei sedimenti, una spiaggia a tasca, ecc. Un sistema di pennelli è solitamente adottato quando si intende costruire o proteggere una striscia di spiaggia estesa, sia che si intenda formarla con il naturale trasporto litoraneo, sia che si preveda di realizzarla con versamento artificiale. In quest'ultimo caso i sistemi di pennelli diventano un'opera complementare per diminuire i versamenti o ridurre la frequenza; la loro economicità dovrà essere cautamente valutata e confrontata con la soluzione di solo ripascimento e ricostruzione della spiaggia.

I pennelli singoli o i sistemi di pennelli vengono adottati come opere di difesa quando la spiaggia in considerazione è interessata da predominante trasporto longitudinale e quando le forze attive sono esuberanti per la effettiva quantità di materiale in transito. La loro adozione è più consueta, ai fini della protezione del litorale, quando le forze che generano il trasporto sono spiccatamente più intense in una direzione (in tal caso saranno più probabili forti erosioni lungo il lato sottoflutto). Nel caso invece di paraggi, in cui il trasporto ha frequenti inversioni, una spiaggia potrà formarsi anche sui lato sottoflutto, nella zona riparata dal pennello stesso. In tal caso il pennello, pur non avendo funzione di ricostruzione della spiaggia, può ridurre l'entità degli spostamenti della linea di riva.

3.2.2 Indicazioni progettuali

Prima di procedere alla progettazione di un pennello o di un sistema di pennelli è indispensabile individuare le caratteristiche qualitative e quantitative della dinamica trasversale e longitudinale della spiaggia esistente e della spiaggia futura e determinare in particolare la distribuzione spaziale del transito dei sedimenti. Su tali caratteristiche infatti il pennello può avere intensi effetti in quanto esso altera la circolazione correntizia con la possibilità di formazione di nuove correnti di ritorno aderenti al pennello stesso. Nello studio si dovrà tenere conto dell'escursione di marea e di sopralzi d'onda che possono significativamente influire sulla dinamica litoranea.

A tale proposito è molto importante l'esperienza che deriva dall'osservazione del comportamento di opere a mare esistenti sulla spiaggia stessa o su spiagge in analoghe situazioni. Qualora non sia possibile fruire di tale esperienza, si suggerisce di far precedere alla progettazione definitiva l'esecuzione di opere parziali aventi scopo di indagine, sfruttando una delle caratteristiche peculiari del pennello, particolarmente utile anche durante il normale funzionamento, che particolarmente utile anche durante il normale funzionamento, che è quella di poter essere modificato con l'evolversi della spiaggia.

Se il pennello non è ben proporzionato, ad esempio un pennello impermeabile, alto e troppo lungo, il materiale che lo oltrepassa può andare perso sia per la profondità del mare in cui si viene a trovare, sia per la menzionata corrente di ritorno che spesso si realizza in corrispondenza del pennello stesso.

Nel caso di un sistema di pennelli, la lunghezza e la spaziatura tra i pennelli devono essere determinate in funzione dell'allineamento di spiaggia che si vuole realizzare e della portata solida in transito. Si dovrà in ogni modo fare sì che il filetto di sabbia che abbandona la testata del pennello sopraflutto possa essere catturato dalla spiaggia o dal pennello sottoflutto con sufficiente margine di sicurezza. In linea generale la spaziatura fra pennelli è due o tre volte la lunghezza dei pennelli stessi.

È praticamente inevitabile, salvo interventi particolari, che la spiaggia sottoflutto venga danneggiata dalla riduzione del trasporto solido che la alimentava. L'erosione di tale spiaggia, se questa esiste ed ha importanza turistica o come elemento di protezione del litorale, può essere evitata, provvedendo al riempimento artificiale degli spazi tra pennello e pennello per consentire il transito della deriva naturale.

Nella realizzazione di un pennello singolo, una volta che ne sia stata stabilita la lunghezza in sede progettuale, è consigliabile costruire in una fase un pennello di lunghezza (o anche altezza) apprezzabilmente minore, per poter constatare gli effetti da esso provocati sul litorale sia sopraflutto che sottoflutto, in modo da poter decidere, a seconda di tale effetti, se è opportuno prolungare o meno il pennello stesso.

In sostanza, si consiglia di realizzare il pennello in fasi successive, in maniera che esso possa avere una lunghezza definitiva ritenuta idonea dall'esame sperimentale del suo comportamento, lunghezza che potrà quindi risultare sia maggiore che minore rispetto a quella prevista originariamente in progetto.

Dovendo realizzare un sistema di pennelli in presenza di forte deriva litoranea, nella sequenza temporale di costruzione si proceda in verso opposto alla deriva stessa, in perfetta analogia con quanto è pratica corrente nell'imbrigliare torrenti montani.

Inoltre, anche in questo caso, è senz'altro consigliabile procedere nella realizzazione per fasi, costruendo inizialmente dei pennelli di lunghezza (o anche altezza) minore e procedere successivamente nell'esecuzione, dopo aver seguito sperimentalmente i loro effetti, in modo da giungere ad una lunghezza (o altezza) definitiva ottimale dei vari pennelli.

3.3. Frangiflutti distaccati

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

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

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

In relazione agli scopi sopra accennati, i varchi costituiscono una necessità per un sistema di barriere emergenti, mentre al crescere della tracimazione-sommergenza essi non sono necessari e possono divenire dannosi per le violente correnti che attraverso di essi ritornano al mare.

Barriere sommerse sono impiegate spesso come opere di contenimento e sostegno di spiagge artificiali o ripascimenti. Quando la sommergenza è forte questo effetto di contenimento è prevalente rispetto all'azione frangiflutti.

3.3.1 Funzioni e limiti

I frangiflutti dissipano l'energia dell'onda frangente su di essi creando sul lato terra una zona di bassa agitazione o d'"ombra".

Il materiale trasportato lungo riva dalla azione combinata dell'onda e delle correnti viene depositato in detta zona protetta.

La dissipazione dell'energia dell'onda avviene lontano dalla riva e dai beni che si vogliono difendere.

Un frangiflutti isolato ed emergente genera una zona di "calma" che è delimitata dalle zone di diffrazione aventi origine nelle due testate; tale zona di calma ha forma triangolare circa equilatera in condizioni di incidenza frontale; il lato che si appoggia al frangiflutti è più corto di questo di 1 - 2 lunghezze d'onda.

Le sabbie, che, mosse lungo la riva, si depositano dietro la barriera, formano dapprima un bassofondo, che poi evolve in una estroflessione della linea di riva fino a raggiungere eventualmente il frangiflutti formando così un tombolo, se la distanza del frangiflutti dalla battigia primitiva è circa pari alla sua lunghezza. Nel caso in cui la distanza sia molto minore o molto maggiore, si formano nell'ordine due tomboli o nessuno. La saldatura del tombolo al frangiflutti è ostacolata se la tracimazione dell'onda è frequente.

Quando si realizza un sistema di frangiflutti, la formazione del deposito è rapida sul lato sopraflutto alimentato dal trasporto litoraneo. A tergo delle seguenti barriere e fino a che il riempimento delle precedenti non è tale, da permettere al trasporto litoraneo di sorpassare le barriere, il riempimento è molto più lento, in quanto avviene per trasporto trasversale alla spiaggia come adeguamento del profilo alla minor altezza di onda che interessa l'area protetta.

La formazione del tombolo dietro il frangiflutti ha l'effetto di impedire il transito lungo riva delle correnti litoranee e rende la barriera funzionalmente simile ad un pennello.

In presenza di una forte deriva litoranea, il deposito a tergo della barriera induce un avanzamento della riva sopraflutto, che nel tempo si estende a grande distanza; a questo fa riscontro un'erosione comparabile sul lato sottoflutto.

In assenza di trasporto netto derivante da un equilibrio fra i trasporti nei due versi, il riempimento avverrà a partire da entrambe le estremità; il materiale depositato non viene rimosso in eguale misura da un'ondazione generante trasporto in verso opposto, in quanto il deposito è protetto dalle barriere stesse.

Un sistema di barriere produce in genere una sottrazione di sedimenti alle rive adiacenti, come ogni opera che produce ripascimenti di spiaggia alimentandosi dei trasporti litoranei.

Un sistema di barriere può catturare anche materiali che, muovendosi trasversalmente alla riva, entrano attraverso i varchi o sopra la barriera, e può risultare efficace anche in assenza di trasporto litoraneo.

Un sistema, che si estenda al tratto compreso fra due sezioni in cui il trasporto litoraneo sia sicuramente nullo, non potrà sottrarre sabbie alle aree adiacenti.

Quando il frangiflutti è sommerso, l'attenuazione dell'onda è solo parziale, ma, non essendo necessaria la presenza dei varchi, non sempre ciò comporta una maggior energia incidente sulla riva, rispetto ad una barriera emergente; per contro l'attenuazione dell'onda è proporzionalmente maggiore sulle onde più alte.

Ad equilibrio raggiunto, a ridosso dei frangiflutti il profilo trasversale della spiaggia risulterà più ripido a seguito della minore ripidità delle onde, mentre davanti ad essi è presente una fossa associata alla riflessione prodotta dal paramento esterno.

I volumi depositabili (depositati dopo un certo tempo se d1 sponlDlii, potranno essere determinati attraverso le valutazioni della diffrazione dell'onda attraverso i varchi e dei profili trasversali di equilibrio, risultando le isobate all'equilibrio circa parallele ai fronti d'onda.

Un sistema di frangiflutti surdimensionato come opera di difesa (varchi insufficienti ecc.) produce la sedimentazione anche di materiali molto fini e degrada la qualità delle acque negli alveoli che si formano in corrispondenza dei varchi.

Un frangiflutti foraneo adeguato può essere impiegato come trappola da sabbie, ad esempio sul lato sopraflutto di una imboccatura; se abbinato ad una draga che può trovar riparo a ridosso dello stesso, può costituire un efficace sistema di bypassing delle sabbie verso la spiaggia sottoflutto.

L'acqua che tracima sulla barriera ritorna al largo per la via di minor resistenza; per un sistema di barriere poco emergenti si concentrano nei varchi delle forti correnti (del tutto analoghe alle correnti di ritorno) che possono essere pericolose per i bagnanti inesperti, oltre a costituire un mezzo molto attivo di trasporto dei sedimenti verso il largo.

Su fondali cospicui ed in paraggi molto esposti, potranno ottenersi economie anche significative realizzando barriere sommerse, che hanno rispetto alle emergenti minore sezione e sviluppo della mantellata, essendo inoltre questa meno esposta all'impatto diretto dei frangenti.

In mari eutrofici o ricchi di alghe potrà risultare opportuna la piccola riduzione che le barriere sommerse esercitano sulle onde minori, al fine di evitare il formarsi di depositi non sempre igienici.

Similmente il congiungersi al tombolo delle barriere emergenti pare un fenomeno non favorevole, poiché in tal caso si viene a generare un alveolo quasi chiuso, distaccato dalle correnti longitudinali ed avente modeste capacità di scambio con l'esterno soprattutto per le onde minori non tracimanti, così da costituire una situazione igienicamente pericolosa.

L'attenuazione dell'onda e le tracimazioni, e quindi l'efficienza del sistema difensivo da essi costituito, dipendono sensibilmente dalla quota sul mare del coronamento. Il sistema di difesa, in particolare se costituito da barriere sommerse, non è pertanto consigliabile in paraggi a forte escursione di marea.

I frangiflutti paralleli possono risultare un sistema di difesa antieconomico su spiagge ripide, ove, per disporle ad una certa distanza da riva diviene necessario costruirli su fondali eccessivi.

Il sistema non si presta a seguire nel tempo le variazioni della linea di riva e necessita quindi di una meditata progettazione.

Può risultare sgradevole esteticamente e disagiata per i bagnanti, specialmente se realizzato con barriere emergenti e in grossi massi di calcestruzzo.

3.3.2 Indicazioni per il progetto

Dovranno essere condotte preliminari indagini sull'escursione dei livelli di marea sul regime ondoso e correntizio e sul regime dei trasporti litoranei: in particolare necessita conoscere il trasporto litoraneo netto e lordo e come questo risulti distribuito sulla spiaggia sommersa. Infine dovrà essere valutata la capacità portante e la resistenza all'erosione del fondale su cui si imbase la struttura.

I principali parametri che debbono essere determinati sono quota del coronamento e fondale (distanza da riva) su cui realizzare l'opera. Essi determinano: l'attenuazione dell'onda e la tracimazione, la frazione del trasporto totale litoraneo che può essere trattenuto, la sezione e quindi il costo dell'opera.

La distanza da riva determina anche il volume delle sabbie che può essere trattenuto ed eventualmente sottratto alle aree adiacenti.

La lunghezza di ogni elemento è in generale proporzionata alla distanza da riva; ai fini dell'attenuazione dell'onda è preferibile che essa non sia troppo piccola perché le testate, oltre ad essere in proporzione più costose, per effetto della diffrazione riducono l'efficacia dell'elemento rapportata alla lunghezza dello stesso.

La lunghezza percentuale dei varchi (rapporto tra lo sviluppo dei varchi e quello complessivo della difesa) controlla la frazione dell'energia che raggiunge in media la riva.

La pendenza del paramento verso largo e la sua scabrezza determinano la riflettanza della struttura e la profondità della fossa che si forma al piede.

La larghezza della berma è determinata prevalentemente dalla stabilità statica della mantellata per scogliere emergenti; per barriere sommerse, al crescere della larghezza di berma, aumenta l'attenuazione dell'onda e la selettività di tale attenuazione, anche se ai soli fini di aumentare l'attenuazione risulta in genere più conveniente sollevare la berma anziché allargarla.

Come per le difese aderenti, si verificano spesso degli assestamenti della struttura che derivano dallo scalzamento del piede verso il largo e dalla compenetrazione fra il frangiflutti e la sabbia sottostante. E' opportuno, in questi casi, prevedere un telo di geotessile o altro filtro fra i due ammassi a granulometria molto diversa e un rivestimento del fondo in prossimità del piede delle scarpate.

All'usura del pietrame possono essere dovuti solo assestamenti che avvengono in tempi molto lunghi.

Frangiflutti di grandi dimensioni possono dare luogo ad instabilità statica della fondazione, se essa è costituita o sovrasta strati argillosi.

Nel caso di assestamenti avvenuti o previsti per il frangiflutti, al fine di ripristinarne la efficienza originaria, si dovrà fare il ricarico della mantellata, che costituisce un intervento di costo a volte comparabile con quello della struttura.

In sede di progettazione, si potranno prevedere gli assestamenti e realizzare la struttura più alta, o con sezione maggiorata.

In sede di esecuzione, si potrà esporre il nucleo sovradimensionato; ad alcune mareggiate che ne causino l'assestamento, e solo in un secondo tempo realizzare la mantellata.

In sede di manutenzione, si potrà invece valutare la opportunità di ridurre la sezione dei varchi con una barriera sommersa, in alternativa al ricarico della struttura esistente.

In assenza di un mare dominante fortemente obliquo, converrà disporre le barriere allineate, altrimenti orientate come i fronti d'onda del mare dominante.

Si assiste spesso ad una progettazione in serie dei frangiflutti (da non confondersi con progettazione di una serie). Ciò non sembra vantaggioso né all'economia della costruzione, che non sfrutta la peculiarità dei luoghi, né al progresso delle conoscenze. Si ritiene opportuno che si ritorni a progettare, cioè a scegliere meditatamente tecnologie realizzative, materiali e dimensioni del manufatto, in modo che risponda ai requisiti funzionali con sicurezza e basso costo.

Infine, dovendo realizzare una successione di barriere in presenza di deriva litoranea, si costruisca per prima quella sottoflutto (sottoflutto alla quale dovrà trovarsi un tratto di litorale che non soffra la mancanza d'apporti) e poi via via le altre contro deriva; viceversa si otterrà solo di spostare sottoflutto, esaltandola, quell'erosione che naturalmente si forma sottoflutto alla prima barriera.

In assenza di deriva litoranea, le stesse considerazioni portano a consigliare la costruzione intercalata degli elementi.

Nel primo caso, in particolare, la strategia corretta è esattamente contraria a quella derivante dall'ascolto passivo delle lamentele di chi subisce il danno; ovvero l'intervento non va fatto seguendo le pressioni dei danneggiati, ma prevenendole.

3.4. Ripascimenti e spiagge artificiali

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

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

Le spiagge sono parte del sistema naturale delle coste e il loro effetto di dissipazione dell'onda si ha generalmente in modo graduale, cosicché esse vengono classificate quali strutture di difesa morbida.

E poiché la maggioranza dei problemi di erosione si ha quando vi è una deficienza nel rifornimento naturale di sabbia, il versamento di materiale di prestito sulla spiaggia va considerato come una misura di stabilizzazione della spiaggia e quindi di difesa della costa.

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

3.4.1 Funzioni e limiti

Funzione del ripascimento artificiale e quella di agire sul bilancio dei sedimenti di un dato tratto di litorale, rendendolo positivo o nullo, a seconda che l'obiettivo sia quello all'ampliamento ovvero della stabilizzazione della spiaggia.

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

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

È consigliabile studiare la fattibilità di distribuire meccanicamente o idraulicamente la sabbia direttamente su una spiaggia in erosione, per riparare o formare, e successivamente conservare, una adeguata spiaggia protettiva, e considerando anche altre misure di rimedio ausiliarie a quella soluzione.

Quando vi sono le condizioni per un ripascimento artificiale, lunghe zone di spiaggia possono essere protette a costi relativamente bassi rispetto a quelli di strutture di difesa alternativa.

Sotto certe condizioni, un sistema di opere accessorie può incrementare l'effetto di difesa; tuttavia, se una spiaggia è ripasciuta o allargata dal naturale apporto di materiali di spiaggia, deve prevedersi, in conseguenza della costruzione delle opere di contenimento (pennelli e soglie), una corrispondente diminuzione di rifornimento naturale alla zona sottoflutto con la risultante espansione del problema.

Gli effetti negativi delle opere accessorie di contenimento possono usualmente ridursi, ponendo materiale di riempimento artificiale in adatte quantità correntemente con la costruzione dei pennelli, per permettere il bypass verso valle del materiale naturale; questo stoccaggio viene chiamato "riempimento dei pennelli".

Opere ausiliarie di contenimento possono essere incluse in un progetto di difesa di una spiaggia mediante ripascimento per ridurre la quantità della perdita e quindi la necessità di più frequenti ricarichi.

Quando si prevede l'uso delle opere di contenimento in uno con il riempimento artificiale, i loro benefici devono essere attentamente valutati per giustificare l'impiego.

I limiti dell'intervento sono legati esclusivamente alla disponibilità, a costi economici, di materiali adatti per il ripascimento. Valutazioni economiche che possono farsi egualmente per l'equilibrio biologico dei fondali.

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

3.4.2 Indicazioni per il progetto

Un progetto di ripascimento artificiale, sia che si tratti della realizzazione di una nuova spiaggia, che del mantenimento o ampliamento di una spiaggia esistente, richiede sempre una precisa conoscenza della dinamica del litorale su cui si interviene, specie per quanto riguarda la direzione del trasporto litoraneo ed il deficit dei sedimenti.

Fondamentale anche la conoscenza delle caratteristiche granulometriche e tessiture originarie della fascia costiera, da ottenersi in base ai risultati delle analisi di un sufficiente numero di campioni prelevati dalla spiaggia emersa e dalla spiaggia sommersa.

La scelta del materiale di riporto dovrà essere effettuata tenendo conto delle caratteristiche originarie dei sedimenti costieri.

Anche i quantitativi di progetto dei materiali di ripascimento dovranno essere stabiliti in base alle caratteristiche granulometriche del materiale di riporto rispetto al materiale originario.

In particolare, per spiagge relativamente stabili o in leggero arretramento, sarà opportuno che il materiale di riporto abbia la stessa granulometria del materiale originario o, meglio, che sia leggermente più grosso; in queste ipotesi i quantitativi di progetto potranno essere stabiliti considerando trascurabili le perdite di materiale di riporto dovute a diversità di comportamento sotto l'azione del moto ondoso (processi di rimozione e selezione dei sedimenti) rispetto al materiale originario.

Sedimenti a granulometria leggermente più grossa dovrebbero risultare stabili in condizioni normali e dar luogo a profili di spiaggia più ripidi.

L'utilizzo di materiale più fine comporterà invece, sotto l'azione del moto ondoso, la perdita di quantità anche considerevoli e non stimabili con precisione di sedimenti subito dopo il ripascimento.

Di tale fatto si dovrà tener conto, maggiorando adeguatamente i quantitativi di apporto stabiliti nell'ipotesi di uniformità di caratteristiche fra materiale di ripascimento e materiale originario mediante opportuni fattori correttivi, detti anche "fattori di riempimento".

Per una valutazione orientativa di questi ultimi, si potrà fare riferimento, una volta note le caratteristiche granulometriche dei sedimenti originari e di quelli ottenibili dalle cave di prestito, a metodi teorici come quelli di Krumbein-James, James e Dean.

Un programma di ripascimento artificiale richiede la preventiva definizione delle caratteristiche geometriche di progetto in particolare: quota, larghezza della berma e profilo, che prevedibilmente assumerà la spiaggia sotto l'azione del moto ondoso.

La quota della berma potrà essere fissata tenendo conto delle prevedibili altezze di risalita del moto ondoso e dell'altezza di berma della spiaggia originaria, nonché di quella di spiagge in condizioni di esposizione simili.

La larghezza della berma andrà definita a seconda della finalità della spiaggia (spiaggia protettiva, spiaggia per usi ricreativi).

La definizione del profilo di progetto potrà avvenire basandosi sui profili trasversali rilevati all'interno della fascia costiera in esame o dei tratti adiacenti, tenendo conto delle eventuali diversità delle caratteristiche granulometriche dei materiali di apporto rispetto ai materiali originari (Dean).

E da precisare che la definizione del profilo di equilibrio di una spiaggia prevedibile a seguito di un intervento di ripascimento interessa esclusivamente ai fini del computo preliminare dei volumi di apporto, mentre nella pratica la modellazione del profilo sarà affidata agli agenti naturali.

Un ultimo aspetto da considerare nel progetto consiste nelle modalità di alimentazione della spiaggia, in particolare per quanto riguarda la scelta fra un unico o più punti di alimentazione, nonché la ubicazione e le dimensioni più opportune del o dei depositi di alimentazione.

Nel caso di una spiaggia facente parte di un'unica unità fisiografica, il ripascimento potrà ottenersi mediante la realizzazione di un deposito di alimentazione all'estremità sopraflutto, in modo che l'alimentazione della spiaggia sottoflutto possa avvenire ad opera del trasporto litoraneo.

La previsione di più punti di alimentazione è consigliabile quando sia richiesto un ripascimento rapido ed uniforme su tutta la spiaggia.

Da tener presente che un deposito di alimentazione non dovrà mai essere spinto a profondità eccessive, tali da impedire un'efficace movimento da parte del trasporto litoraneo.

Spesso il costo per metro cubo di sabbia per piccoli progetti è abbastanza alto, a causa dell'alta spesa richiesta per mobilitare l'attrezzatura necessaria, mentre, per grandi progetti di ripascimento, la stessa spesa costituisce una parte minore dell'impegno economico di progetto.

Inoltre, il ripascimento artificiale può risultare abbastanza costoso per piccole spiagge, a causa della rapida erosione che interessa una spiaggia più estesa verso il largo rispetto alla costa adiacente, il cui materiale erodibile sarà più facilmente trasportato anche per effetto della focalizzazione su di essa dell'energia ondosa.

L'uso di materiale di ripascimento più grosso di quello naturale, e conseguentemente più stabile, può ridurre le richieste di rifornimento, ma può essere meno adatto per l'habitat naturale o per la balneazione.

A volte può essere utile disperdere una certa quantità di materiale fino come copertura artificiale su quello più grosso, per meglio emulare le condizioni naturali.

Il progetto dovrà contenere, anche al fine di una più corretta valutazione del suo costo e di un confronto con soluzioni alternative, attendibili indicazioni sulla evoluzione nel tempo della spiaggia artificiale.

A tal fine, utili e necessarie sono le informazioni sulla dinamica del trasporto e sulle caratteristiche dei sedimenti di spiaggia più volte richiamate.

3.5. Opere per la protezione di porti e canali di accesso

Si tratta di opere aventi lo scopo di consentire alle navi di manovrare in condizioni di sicurezza nel canale di accesso o porto.

Esse vengono qui esaminate, non per le finalità proprie della loro costruzione, ma per gli effetti che tali opere inevitabilmente comportano sui litorali adiacenti.

Esse comprendono: moli di armatura di foci lagunari o fluviali, moli di protezione dei porti, escavazioni e sistemi di bypassing.

I moli sono strutture aventi la funzione di proteggere lo specchio d'acqua fra essi compreso dall'agitazione ondosa e nel contempo rendere stabile la differenza di quota del fondale fra lo specchio navigabile e la spiaggia adiacente. Essi vengono realizzati in forma di frangiflutti emergenti radicati a terra o di pennelli, quando lo specchio compreso si riduce al solo canale.

Essi si differenziano dalle corrispondenti strutture per la difesa dei litorali soprattutto per le dimensioni e per i fondali che raggiungono.

Le escavazioni possono essere sia escavazioni di nuove darsene portuali, che escavazioni nello specchio portuale insufficientemente "protetto" dai moli, sia infine escavazioni di un canale marittimo non difeso; le ultime sono opere di manutenzione ordinaria o straordinaria necessarie all'ufficiosità delle strutture.

Infine i sistemi di bypassing sono sistemi che consentono alle sabbie di oltrepassare artificialmente una imboccatura portuale o lagunare, evitando cioè l'interrimento del bacino e ripristinando il trasporto litoraneo interrotto.

3.5.1 Funzioni e limiti

I moli raggiungono lo scopo di non fare entrare le sabbie nelle aree navigabili in genere impedendo la tracimazione e il transito delle sabbie davanti alla bocca, fenomeni per cui, con significante probabilità, si verifica la cattura da parte del porto.

In questa ottica, i moli vengono costruiti con coronamento a quota tale da non essere tracimati (se non per eventi talmente rari da non comportare un significativo onere a seguito dei volumi di sabbia entrati e della agitazione prodotta) e la loro testata viene portata ad una distanza da riva prossima a quella, a cui il fondale naturale nelle spiagge adiacenti eguaglia il fondale richiesto per la navigazione.

Se costruiti in questa ottica, i moli, salvo quelli a protezione di bassissimi fondali, finiscono per arrestare completamente o quasi il trasporto litoraneo.

In presenza di deriva litoranea, si formerà un accumulo sopraflutto ed erosione sottoflutto, potendo risultare assai più evidente l'erosione dell'accumulo, se parte delle sabbie fluenti prima lungo riva entra nello specchio protetto e/o parte viene deviata verso il largo, risultando in tutto o in parte perduta per la riva sottoflutto.

Quando i moli non vengono protesi fino al fondale richiesto dalla navigazione, questo deve essere mantenuto dragando un canale e mantenendolo dragato, perché la sabbia in transito si deposita, incontrando profondità maggiori. La presenza della incisione costituita dal canale tende a concentrare in esso le correnti di ritorno se queste possono alimentarsi dalla zona dei frangenti, disperdendo verso il largo parte dei sedimenti.

Se le sabbie dragate dal canale vengono scaricate al largo, si avranno per la spiaggia sottoflutto gli stessi effetti che se i moli fossero protesi più al largo.

In presenza di deriva litoranea, sempre che i danni diversamente prodotti sottoflutto lo giustifichino economicamente, si dovrà provvedere ad un sistema di bypass. Al sistema costituito da una condotta fissa, viene oggi generalmente preferito un sistema con trappola per sabbie e trasporto artificiale saltuario.

La trappola di sabbie può essere costituita da un pennello o molo, da un frangiflutti foraneo o da una depressione del fondale a cui le sabbie arrivano. Il deposito prodotto nei primi dei suddetti casi è prevalentemente accessibile da terra e il trasporto si farà in questi casi con mezzi terrestri, mentre nei secondi si preferisce l'uso di draghe; in entrambi i casi si fa uso di mezzi di trasporto che non sono dedicati esclusivamente allo scopo.

L'uso del prodotto delle escavazioni per il ripascimento di spiagge non è esente da problemi; infatti esso è spesso ricco in fanghi, organici e non, che verrebbero messi in circolo all'atto della scarica, arrecando degrado alla qualità delle acque e danno all'ambiente biologico. A tal riguardo giova osservare che l'inquinamento delle sabbie avviene, in genere, all'interno dei porti, e sarà sufficiente intrappolarle prima dell'ingresso nel sorto per poterle impiegare per ripascimenti artificiali. Depositi di sabbia limosa anche non inquinata possono, se mossi liberare notevoli quantità di nutrienti, per cui il loro impiego, su spiagge adiacenti a corpi d'acqua tendenzialmente eutrofici, dovrà essere fatto con attenzione e scegliendo il periodo adatto nel corso dell'anno.

Il problema dei danni provocati al litorale da moli e canali di accesso non può e non deve essere scisso dalla progettazione del porto stesso, non perché esso stravolga l'analisi costi-benefici e pertanto la fattibilità della struttura, ma perché, se il sistema di bypass viene analizzato e, ove opportuno, progettato e realizzato in coordinazione con le strutture portuali, esso risulta assai più economico e non comporterà la necessità di riparare i danni diversamente arrecati.

3.5.2 Indicazioni per il progetto

Per la progettazione di moli dovranno essere condotte, oltre alle indagini già descritte circa i livelli di marea, il regime delle onde, il trasporto dei sedimenti, anche indagini geognostiche per assicurare la stabilità statica della fondazione.

Per ridurre l'ingresso di sabbie nel porto e mantenere in qualche misura dragato naturalmente il canale di accesso, si può fare un uso attento della riflessione prodotta da parte delle strutture e delle correnti di ritorno derivanti dalla tracimazione (di acque non cariche di sabbia).

Il mantenimento dei fondali alla bocca, quando esista un bacino di espansione all'interno, può essere affidato alle correnti di marea. In corrispondenza di foci fluviali, le correnti indotte dalle piene possono essere prevalenti. In entrambi i casi si determina un fondale a cui sono associate correnti di velocità tali da produrre il trasporto di sedimenti necessario (circa nullo per bocche lagunari).

3.6. Dune ed argini a mare

Le dune possono essere mobili o fisse; le prime sono costituite da sabbia incoerente mossa dai venti, le seconde sono fissate dalla vegetazione che in parte con le radici, in parte con l'humus prodotto, dà coerenza e capacità di trattenere umidità alle sabbie.

Il passaggio da un tipo all'altro è reversibile, avendosi in genere dune mobili in ambienti molto ventosi ed aridi e dune fisse in ambienti più favorevoli; esso è però difficile nel senso che ognuno dei due tipi, una volta che si è instaurato, genera delle situazioni che inibiscono l'altro. Le dune fisse hanno benefici effetti sul retrospiaggia:

- costituiscono un argine alle acque alte;
- costituiscono un accumulo di sabbia che alimenta la spiaggia occasionalmente in erosione;
- costituiscono una barriera frangivento che trattiene le sabbie e il salmastro, proteggendo il retrospiaggia.

Gli argini a mare sono un sostitutivo artificiale delle dune e realizzano praticamente solo il primo dei suddetti benefici, essendo in genere, quando esposti sulla spiaggia, difesi sul lato mare da un rivestimento in pietrame con o senza bitume.

L'efficienza come argine idraulico è determinata dalla minima quota della sommità, e pertanto a parità di quota media o volume, sarà maggiore per un argine che non per una duna che ha sommità più irregolare. Nei nostri climi le dune si mantengono naturalmente, senza oneri se non quelli derivanti dalle limitazioni all'uso del suolo.

Non vi è dubbio che, dove le dune esistono ancora, per proteggere il retrospiaggia dall'acqua alta convenga, ove insufficienti, provvedere alla manutenzione di queste, colmando qualche avvallamento, ecc.. Dove sono state rase per costruire insediamenti edilizi, esse possono risultare forse troppo ingombranti o poco efficaci, se ricostruite a tergo di questi.

La manutenzione della duna deve comprendere, oltre alle operazioni che ne determinano la integrità come argine (quota e consistenza del coronamento), anche quelle che ne assicurano la sussistenza come sistema ecologico, a carattere prevalentemente vegetazionale; queste ultime sono: mantenere pingue la falda di acqua dolce sottostante le dune, evitando il prelievo da pozzi superficiali, e facilitando la percolazione delle acque piovane (non paiono opportune le usuali fognature per acque bianche, che drenando e allontanando rapidamente le acque ne impediscono la percolazione), conservare la struttura di barriera naturale, anche e soprattutto nelle sue parti meno appariscenti ma più esposte che fronteggiano il mare, come la zona erbacea che fissa le sabbie (vegetazione colonizzatrice, caratterizzata in genere dalla presenza di *Ammophila arenaria*) e quella cespugliosa retrostante (caratterizzata in genere dalla presenza di ginepro e/o livello spinoso, vegetazione schermante).

La struttura vegetazionale della duna può essere usata anche come indicatore di erosioni in atto. Infatti, in fase regressiva della spiaggia vengono a trovarsi esposte sulla riva associazioni che non hanno funzione colonizzatrice o schermante.

Particolare attenzione dovrà essere riservata alle foci fluviali.

Le indagini effettuate negli ultimi decenni hanno dimostrato, senza possibilità di dubbio, che sono proprio queste le aree dove si sono manifestate nel dopoguerra le erosioni più intense.

Le foci, un tempo molto prominenti, stanno nettamente spostandosi su di una posizione più arretrata di maggior equilibrio, a causa del diminuito apporto solido fluviale di fondo.

Così, la linea di riva tende sempre più ad avvicinarsi ad una retta per il forte arretramento delle parti prominenti (foci) rispetto alle zone concave (aree interfocali).

Le foci, d'altro canto, sono praticamente l'unica fonte di rifornimento delle spiagge alimentate dai corsi d'acqua, sia perché da esse si diffondono gli apporti solidi fluviali e sia perché il materiale proveniente dalla loro erosione va a rifornire le aree interfocali.

Impedire l'arretramento delle foci o addirittura voler recuperare spiaggia con scogliere foranee o con pennelli è estremamente dannoso per l'equilibrio dei litorali.

Gli apporti solidi fluviali verrebbero in gran parte intrappolati da tali difese; inoltre una maggior percentuale di essi verrebbe dispersa verso il largo, perché questi manufatti prolungherebbero in qualche modo le foci verso fondali più profondi.

Le difese, inoltre, impedendo l'erosione delle foci, eliminerebbero un'essenziale fonte di rifornimento alle spiagge adiacenti, innescando l'erosione nelle aree interfocali o aggravandola se già in atto.

D'altra parte, proteggere aree con così forte tendenza all'arretramento sarebbe costoso e darebbe, per lo più, mediocri risultati.

Ciò vale non solo per gli interventi di tipo "tradizionale" (scogliere foranee, pennelli ecc.), ma anche per i ripascimenti artificiali.

Analoghe negative conseguenze si avrebbero qualora venissero costruiti moli fluviali in corrispondenza o in prossimità di una foce.

Alle aree di foce, dunque, dovrà essere permesso di evolversi liberamente, a meno che, naturalmente, l'erosione non porti alla distruzione di importanti beni economici, naturali o storico-artistici.

Arretrando, esse si collocheranno su una linea di maggior equilibrio, più facilmente difendibile.

A quel punto si potrà eventualmente intervenire con difese "leggere" che servono a bloccare o attenuare la residua tendenza all'arretramento, senza impedire il trasporto dei sedimenti lungo riva.

Questa strategia è possibile, naturalmente, solo in quelle foci che non sono ancora state urbanizzate fino a pochi metri dal mare.

In tali aree non si dovrà assolutamente costruire se non ad una opportuna distanza di sicurezza, superiore a quella adottata per le spiagge interfocali.

Se in qualcuna delle foci non ancora urbanizzate alcuni singoli edifici si trovassero troppo vicini a riva, tanto da venir distrutti dall'arretramento del litorale, sarà necessario lasciarli al loro destino, qualora sia più conveniente per la vita delle spiagge ricostruirli più all'interno che proteggerli.

3.7. Indicazioni per la scelta del tipo di opera

Premesso che la scelta strategica fondamentale deve essere "non preconstituire quelle situazioni di fatto che plausibilmente richiederanno interventi riparatori di urgenza", i fattori determinanti il tipo di opere possono essere:

- l'urgenza;
- il tipo di regime dei trasporti longitudinali;
- l'importanza della marea;
- la stabilità morfologica del paraggio;
- la finalità dell'intervento.

L'urgenza porta a scegliere quelle opere che non hanno grosse controindicazioni, per cui possono essere attuate senza approfonditi studi, e che coinvolgono piccoli volumi di materiale e quindi piccoli costi in genere.

L'urgenza, anche la più estrema, non deve essere addotta a giustificazione di interventi palesemente antieconomici, in quanto, pur se frettolosa, una stima dei beni difesi e dei costi può sempre essere fatta e ciò indipendentemente dalla salvaguardia della vita umana, che è garantita assai più da provvedimenti di sgombero che non da opere di difesa, le quali di necessità coinvolgono tempi che si misurano in giorni.

Poiché, per ottenere la difesa duratura del bene in oggetto, si dovrà intervenire in seguito con altre opere, l'urgenza non dovrà condurre alla realizzazione di difese di costo superiore al 30% circa del valore dei beni difesi dall'erosione, che potrebbe manifestarsi nel lasso di tempo necessario per progettare e realizzare un intervento più meditato.

Si distinguono qui i seguenti tipi di urgenza:

- a) estrema; l'intervento deve essere iniziato subito (entro 15 giorni), in assenza di un formale progetto;
 - b) media; l'intervento deve essere iniziato entro 1 anno, ma possono essere programmate ed eseguite parte delle indagini necessarie alla corretta progettazione;
 - c) generica; possono essere eseguite tutte le indagini necessarie, pur nei tempi imposti dall'urgenza dell'intervento.
- Come tipi di regime del trasporto litoraneo sono stati schematicamente individuati i seguenti:
- d) trasporto litoraneo assente o insignificante rispetto ai movimenti trasversali alla spiaggia;
 - e) deriva litoranea (trasporto netto) assente o insignificante rispetto ai trasporti lordi;
 - f) deriva litoranea modesta ma ben definita;
 - g) trasporti litoranei importanti ma con deriva mal definita;
 - h) trasporti litoranei importanti e deriva ben definita.

Per l'importanza della marea si distinguono due classi:

- i) insignificante; escursioni di livello contenute in mezzo metro circa;
- l) importante; escursione di marea abituale dell'ordine di mezzo metro o più e/o possibilità d'acqua alta di altezza superiore al metro

Convien, infine, osservare che la instabilità morfologica del pareggio, è inversamente legata alle dimensioni spaziali delle grandi forme caratterizzanti la riva ed alla altezza della spiaggia attiva nella sua più ampia accezione, e direttamente alla erodibilità della costa; si distinguono le seguenti classi:

- m) insignificante; ad es. falesie;
- n) modesta; ad es. spiagge sottili di grande estensione e spiagge a tasca (pocket beach);
- o) importante; ad esempio cuspidi focali e piccole unità fisiografiche con forti trasporti. Il tipo di regime del

L'importanza della marea porta a scegliere strutture, la cui risposta funzionale sia poco sensibile alle variazioni del livello del mare, mentre l'instabilità morfologica dovrebbe orientare il progettista verso la scelta di strutture con costo iniziale e vita presunta limitati.

Infine è necessario distinguere fra opere di difesa della spiaggia, a cui si richiede la conservazione o il protrimento della spiaggia stessa, dalle opere di difesa della costa, in cui, vedi il caso delle difese parallele, la finalità può essere raggiunta anche a scapito della conservazione della spiaggia.

In particolare possono darsi le indicazioni seguenti.

-I pennelli sono consigliabili dove la deriva litoranea è ben definita per ridistribuire lungo il litorale gli apporti fluviali in ragione diversa da quella derivante dal regime ondoso e dalla configurazione attuale del litorale; ad es. per la stabilizzazione di apparati focali andati in erosione per il ridursi, senza annullarsi, degli apporti solidi sabbiosi. Essi risultano abbastanza insensibili alla marea, ma debbono essere ben radicati a terra ed impiegati con prudenza in litorali morfologicamente labili.

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

-Rivestimenti e soprattutto muri di sponda sono in genere da sconsigliare per la stabilità della spiaggia, ad eccezione di opere di modesto rilievo, che vengono interessate dall'onda solo in condizione di acqua alta eccezionale o quasi.

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

-I ripascimenti artificiali sono da consigliare su piccola scala dove il trasporto è modesto; si prestano ottimamente sia dove l'escursione di marea è forte sia dove la morfologia è labile.

Dove il trasporto litoraneo è consistente, i ripascimenti potranno essere abbinati ad opere di contenimento al fine di ridurre gli oneri di manutenzione.

Interventi a difesa delle dune possono consigliarsi dove, per la presenza di forti venti foranei, sono temibili perdite significative di sabbia verso il retrospiaggia e dove, essendo il retrospiaggia basso, sono particolarmente temibili gli effetti dell'acqua alta.

Il complesso è riassunto nel quadro seguente dove, al variare della caratterizzazione fisica del paraggio, viene indicato il grado di idoneità di ciascun tipo di intervento; l'idoneità è indicata nel modo seguente:

3 soluzione consigliabile

2 soluzione idonea

1 soluzione accessoria

+ soluzione idonea o accessoria per qualche forma del tipo, inefficiente per altre

0 soluzione inefficiente

* soluzione sconsigliabile.

Quadro schematico per la scelta del tipo di opera per difese di spiaggia.													
Caratterizzazione del paraggio													
Tipo di intervento	urgenza			trasporto litoraneo					marea		instabilità morfologica		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l	m	n	o
Pennelli	*	1	2	0	1	3	2	2	1	2	2	1	*
Frangiflutti foranei	*	0	2	2	3	+	2	+	2	1	2	1	0
Difese aderenti	2	+	*	1	0	0	*	*	1	2	2	1	*
Ripascimenti	3	3	2	3	2	2	1	1	2	2	1	2	3
Conservazione dune	1	2	2	1	2	0	2	0	2	2	0	2	2

Si fa esclusivo riferimento in esso ad opere di difesa della spiaggia e del retrospiaggia, che sono le più diffuse.

La suddivisione delle opere per tipi è in larga misura schematica; esistono strutture e interventi che hanno caratteristiche proprie di tipi diversi, o risultano dal combinato di tipi diversi.

Così è, per esempio, di pennelli, consigliati da taluni, aventi la testa rivolta sottoflutto e formante un angolo non grande rispetto alla riva, o frangiflutti disposti obliqui e non distanti da riva, sì che una delle teste viene di fatto a radicarsi a terra. Oppure il caso di ripascimenti contenuti fra pennelli e/o barriere foranee.

Pare opportuno chiarire che la differenza fra un ripascimento e un rivestimento in massi gettati alla rinfusa, consiste soprattutto nella dimensione dei granuli-massi impiegati in rapporto ai grani-ciottoli della spiaggia. La forte preferenza, che viene data ai ripascimenti rispetto ai rivestimenti, deriva dalla constatazione dei problemi di stabilità del fondo che si riscontrano in prossimità e sotto la struttura, quando questa è costituita di grossi massi (stabili su pendenze elevate). Ciò non toglie che, per interventi di urgenza, considerato il minor volume del versamento, possa convenire impiegare massi anche grossi; in tal caso, però, non sembra opportuno versare solo massi grossi, ma un misto graduato che possa vagamente costituire un filtro rovescio e, passata l'urgenza estrema, versare ancora del materiale intermedio, per consentire un passaggio di dimensioni più graduale dalla spiaggia sommersa alla zona di versamento di massi.

3.8. Il monitoraggio di controllo delle opere

Si torna a ribadire che per una efficace politica di protezione costiera, e' indispensabile che i litorali siano oggetto di un monitoraggio sistematico, idoneo a tenere sotto controllo la loro evoluzione. E ciò soprattutto per verificare l'efficacia delle opere realizzate per la difesa delle coste.

A tale scopo, il monitoraggio dovrà essere finalizzato al rilevamento:

- delle caratteristiche significative dello stato del mare e delle correnti litoranee prodotte dal moto ondoso nella fascia costiera compresa fra i primi frangenti e le linea di riva;
- della configurazione del fondo, nella zona prima citata, e della spiaggia emersa;
- delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti costieri;

La scansione temporale e la durata dei suddetti rilievi dovranno commisurarsi all'importanza dei fenomeni e, in ogni caso, dovranno essere tali da consentire l'interpretazione e la quantificazione dei fenomeni di idrodinamica costiera e le modificazioni in atto.

Nella impossibilità di poter eseguire i rilievi anzidetti, una indicazione sulla tendenza evolutiva del litorale può essere fornita dall'osservazione sistematica della linea di riva, eseguita con semplici rilievi topografici da terra o con riprese fotografiche.

4. ELABORATI DI PROGETTO

L'approfondimento delle indagini e il dettaglio e l'attenzione nelle verifiche di progetto debbono essere proporzionati all'importanza dell'opera, in misura da garantire la convenienza a realizzare l'opera stessa. Essi cioè debbono essere approfonditi fino a che il costo marginale derivante da questi risulta inferiore all'analogo costo derivante dal rischio di un insuccesso dell'opera; l'approfondimento è opportuno che sia diretto a quelle voci che risultano critiche in quanto caratterizzate da un elevato rapporto rischio/costo.

Il suesposto principio va concretizzato nella relazione di progetto, ad evitare che diversamente, per l'ampia soggettività del concetto di rischio, possa prestarsi ad interpretazioni diverse.

Si deve rilevare, peraltro, come alcune indagini che paiono opportune trovano giustificazione in un'ottica che trascende il singolo intervento e quindi il succitato criterio di approfondimento.

Si richiamano qui espressamente, per quanto applicabili le vigenti disposizioni per la compilazione di progetti di opere pubbliche (D.M. 29/5/1895 modificato con D.P.C.M. 15/7/1947 n. 763) e, inoltre, le leggi 2/2/1974 n. 64 con i successivi DD.MM. 3/3/1975 e 26/1/1981 (norme antisismiche) e D.M. 11/3/1988 (norme geotecniche), le leggi 10/5/276 n. 319 e 24/12/79 n. 650 con le successive modificazioni (legge Merli), la legge 431/85, la legge 183/89 (legge per la difesa del suolo) e successivo regolamento.

4.1. Elaborati descrittivi

In particolare si ritiene che ogni progetto debba essere corredato della corografia, estendentesi all'unità fisiografica di cui il sito previsto per l'opera fa parte. Similmente esso dovrà essere corredato di una (o più) planimetria del retroterra, in cui siano evidenziate infrastrutture ed uso del suolo, con particolare riguardo a quelle sulle quali sono possibili effetti e/o dalle quali trae ragione l'opera stessa, e di una (o più) batimetria aggiornata ed estendentesi a profondità adeguata, comprendente la spiaggia, le opere esistenti o in corso di realizzazione e le opere previste dal progetto.

Il rilievo della situazione dei luoghi antecedente la costruzione della opera è essenziale sia per affiancare la contabilità dei lavori, sia per valutare gli effetti dell'opera stessa e, a lungo termine, razionalizzare gli interventi. Esso è atto inderogabile e deve essere affidato ad ente o persona che dia garanzia di obiettività.

Qualora nel progetto si faccia riferimento a dati non recentissimi, il rilievo va ripetuto prima dell'inizio dei lavori.

Ogni progetto dovrà contenere informazioni circa il regime meteomarinico del paraggio interessato con dettaglio e profondità adeguati all'importanza dell'opera. Da tale regime devono desumersi le condizioni prevalenti e le condizioni estreme di funzionamento dell'opera, per quanto riguarda livello del mare, agitazione ondosa e vento.

Dovrà essere individuata l'unità fisiografica nella sua estensione e nella dinamica essenziale, almeno come indicato al par 2.1.

Dovranno essere prodotti i piani d'onda (diagrammi di rifrazione e diffrazione) relativi alla zona interessata dalla struttura nel caso di frangiflutti foranei emergenti e moli e, limitatamente ai casi di una certa importanza, nel caso di pennelli, difese radenti, ripascimenti e barriere sommerse. I suddetti piani dovranno essere prodotti per le ondatazioni prevalenti e, limitatamente ad opere di maggiore importanza, dominanti.

L'analisi della dinamica della spiaggia (dinamica trasversale e longitudinale, trasporti litoranei e distribuzione sulla spiaggia sommersa) dovrà essere condotta in maniera qualitativa per pennelli e frangiflutti foranei, sia in assenza che in presenza dell'opera, evidenziando i segni presenti in natura a conferma di tale analisi.

La stessa deve essere condotta anche in via quantitativa per tutte le opere di una certa importanza.

Infine dovranno essere prodotti tutti i disegni individuanti l'opera, e, ove rilevanti, le modalità costruttive nonché la documentazione relativa ad opere, interventi e sistemazioni finalizzate alla mitigazione dell'impatto visivo-percettivo sulla componente paesistico-ambientale.

4.2. Elaborati di verifica

Dovrà essere valutato il bilancio sedimentario dell'area interessata dall'opera in assenza e in presenza della stessa. Per opere di modesto rilievo e che incidono solo su alcune voci del bilancio stesso, sarà sufficiente valutare queste voci o le alterazioni indotte su di esse.

Dovranno essere condotte valutazioni della risalita, della tracimazione dell'onda, della stabilità degli elementi singoli, della statica dei muri di sostegno, della stabilità globale della fondazione e ogni altra verifica necessaria ad assicurare la stabilità dell'opera per tutte le sollecitazioni che la interessano.

I profili di equilibrio assunti per la spiaggia dovranno derivare da profili rilevati nel paraggio per similitudine o per interpretazione con modelli dinamici accreditati.

Ogni progetto dovrà contenere infine un'analisi della sua giustificazione economica, condotta valutando costi e benefici con dettaglio proporzionato all'importanza dell'opera, ed in particolare:

- costo di costruzione dell'opera e della sua manutenzione;
- costo dei danni arrecati ai litorali adiacenti;
- benefici derivanti alle spiagge protette;
- benefici indiretti derivanti ad aree limitrofe o alla comunità sociale.

Costi e benefici dovranno essere attualizzati al momento della costruzione.

Ove i costi superassero i benefici manifesti, dovrà essere fatta esplicita menzione della finalità, economicamente non quantificabile, giustificante l'opera.

4.3. Prove su modello

Per accertare il funzionamento delle opere, sia ai fini della stabilità delle stesse che ai fini degli effetti sulla costa, si realizzano spesso modelli fisici o matematici (e talvolta entrambi).

Questi altro non sono che strumenti di valutazione degli effetti, quando questi effetti non sono valutabili tramite semplici formule e brevi calcolazioni.

Un fenomeno è modello di un'altro, detto prototipo, se esiste fra di loro similitudine meccanica.

Nei modelli fisici in scala i fenomeni in modello e prototipo sono gli stessi, mentre differiscono essenzialmente le dimensioni.

Nei modelli matematici o numerici, ai fenomeni nel prototipo corrispondono relazioni fra le grandezze coinvolte, evidenziate in forma matematica o numerica.

Lungi dall'essere una panacea, i modelli in sede preventiva richiedono la identificazione:

- dei fenomeni fisici rilevanti ai sensi di quanto si vuole evidenziare: i modelli infatti sono sempre modelli parziali, essi rappresentano in modo fedele alcuni fenomeni, mentre distorcono o cancellano altri fenomeni; ci si dovrà pertanto accertare che tutti i fenomeni rilevanti in prototipo siano rappresentati in modello e che non siano eccessivamente amplificati fenomeni irrilevanti nel prototipo;

- dei dati necessari per l'esecuzione del modello: un modello, essendo un mero strumento di elaborazione o trasformazione dei dati, non fornisce risultati più attendibili dei dati su cui è basato, aggiungendosi all'incertezza dei dati la incertezza sulla esattezza del modello.

Nota l'attendibilità dei dati disponibili ed il programma delle prove necessarie ad accertare quanto desiderato, si sceglierà il modello parziale più idoneo, cioè quello che per affidabilità dello strumento e per capacità di convincimento, per tempi e costi di esecuzione risulta ottimale.

A favore dei modelli fisici può addursi la capacità di rappresentare fenomeni complessi come la turbolenza o il frangimento delle onde, la cui rappresentazione analitica è difficile e spesso solo approssimativa.

Per converso la necessità pratica di realizzare il modello in scala fortemente ridotta comporta sistematicamente effetti scala legati alla viscosità dell'acqua ed alla tensione superficiale all'interfaccia acqua-aria di fatto non riprodotte nel modello.

Di conseguenza, gli spettri dell'onda e della turbolenza in modello risultano tagliati alle alte frequenze, modificato a volte il regime del moto in prossimità della parete, ridotta in genere la mobilità di particelle al fondo e l'areazione dell'acqua.

Per ogni particolare effetto scala, come vengono usualmente chiamate queste distorsioni, esistono accorgimenti compensatori, che a loro volta però inducono altri effetti scala.

Ad esempio, l'uso di sedimenti leggeri e di maggior diametro per ovviare ai problemi legati alla viscosità, determinano un incremento della permeabilità del fondo e, usando materie plastiche di piccole dimensioni, altri fenomeni legati alla diversa affinità elettrochimica per l'acqua.

I modelli matematici sono particolarmente indicati per rappresentare fenomeni, la cui dinamica è ben nota, ad esempio la propagazione ondosa, e che si svolgono intrinsecamente in spazi di grande estensione, talché risulta estremamente onerosa la realizzazione di un modello fisico affidabile.

Possono ancora fornire un valido supporto, anche nei casi in cui la eliminazione di ogni effetto scala rilevante in modello fisico è impossibile, come ad esempio per la movimentazione di sedimenti molto sottili; in questi casi entrambi i modelli hanno un carattere più qualitativo che quantitativo ed una calibrazione appare necessaria.

Molte delle perplessità connesse all'uso dei modelli risultano, tuttavia, attenuate, quando i modelli stessi vengono impiegati per confrontare fra loro comportamenti di opere differenti ed alternative e non già per riprodurre gli effetti di un singolo intervento.

Nel seguito si forniscono alcune indicazioni per la scelta ed il controllo della esecuzione del modello.

4.3.1 Modelli fisici

Per modelli fisici si intendono i modelli in scala, cioè combinazioni prototipo-modello, in cui si realizzano gli stessi fenomeni di rilievo a meno di fattori di scala.

Il modello rappresenta in questo caso una immagine ridotta, ma fedele, del prototipo, almeno per quanto attiene agli elementi giudicati rilevanti.

4.3.1.1 Modelli di propagazione ondosa

I modelli sono normalmente realizzati secondo la regola di similitudine di Froude (scala dei tempi e delle velocità pari alla radice della scala delle lunghezze)

Si sconsiglia l'uso in modello di onde di lunghezza sensibilmente inferiore ad 1 m., per gli effetti scala legati alla tensione superficiale ed alla viscosità.

Quando il fenomeno prevalente che si desidera rappresentare è costituito dalla rifrazione dell'onda su fondali lentamente e regolarmente variabili in ampi specchi d'acqua, è d'uso distorcere le scale orizzontali e verticali del modello, riducendo maggiormente le orizzontali rispetto alle verticali.

In questo caso, la fedele rappresentazione delle celerità dell'onda in tutto il campo delle profondità relative possibili richiede che il periodo dell'onda (e di conseguenza la lunghezza) sia ridotto secondo la regola di similitudine di Froude relativa alla scala delle verticali.

I fenomeni di diffrazione risultano distorti, non risultando in scala la lunghezza dell'onda rispetto alle distanze orizzontali.

Anche la riflessione delle scarpate risulta distorta, nella fattispecie incrementata, similmente la posizione e la forma dei frangenti risentono in qualche misura della distorsione delle pendenze dei fondali.

Per tutti questi motivi, una distorsione geometrica fino ad 1:2 può essere accettata con una certa tranquillità risultando anche benefica per compensare gli effetti di scala legati alla capillarità ed alla viscosità.

Distorsioni geometriche più forti richiedono una attenta valutazione degli effetti indotti.

Quando i fenomeni prevalenti sono costituiti dalla riflessione e dalla diffrazione, di norma non si distorce geometricamente il modello, o, in presenza di una piccola distorsione, la lunghezza d'onda è ridotta nella scala delle orizzontali.

Secondo questi criteri sono normalmente realizzati i modelli in vasca di opere adottando una scala di norma non inferiore a 1:100. La rifrazione può essere dovuta anche a correnti. Lo studio sul modello dei fenomeni associati è però raro, per lo più a causa della mancanza di precise indicazioni sulle correnti.

Nei casi in cui la corrente in prototipo possa raggiungere intensità dell'ordine di 1 m/s (equivalente alla alterazione del fondale di circa un metro) gli effetti di tali correnti dovranno essere valutati e, ove opportuno, le correnti riprodotte in modello.

I dati necessari sono costituiti da:

- batimetria dell'area;
- scabrezza equivalente dei fondali;
- clima ondoso al largo, ovvero il complesso di onde (altezza, periodo, direzione ed, eventualmente, spettri in frequenza e direzione associati) di cui si desidera rappresentare la trasformazione;
- sovrizzo di marea concomitante alle onde;
- eventuali correnti concomitanti.

4.3.1.2 Modelli di interazione con strutture composte di grandi elementi

Si fa riferimento a frangiflutti od altre opere a mare i cui elementi principali sono, in prototipo e modello, sufficientemente grandi da escludere per essi rilevanti effetti della viscosità e della capillarità.

Finalità principale di questi modelli è di regola accertare la resistenza dell'opera progettata agli attacchi ondosi previsti.

Le prove vengono condotte secondo la regola di similitudine di Froude con scala delle densità (masse specifiche) fissata.

Spesso si considera che il fluido nel prototipo e nel modello abbiano la stessa densità, trascurando la maggiore densità dell'acqua salata (+2.5%) nel prototipo rispetto a quella dolce impiegata in modello.

Si raccomanda di verificare comunque la densità effettiva dei solidi impiegati in modello in quanto scarti di alcuni punti percentuali rispetto ai valori usuali non sono infrequenti e possono risultare di qualche importanza.

Per modelli di strutture complesse, risultando a volte difficile ottemperare esattamente alla scala delle densità, si segnala che le caratteristiche essenziali che debbono essere accuratamente ridotte sono la sezione d'urto esposta all'onda ed il peso della struttura nelle condizioni effettive di immersione; si potrà pertanto operare sugli spessori delle menbrature in modo da ottenere in scala le caratteristiche sopra menzionate.

Effetti scala si hanno di regola nel nucleo e nella fondazione per le ridotte dimensioni dei meati in essi presenti.

Di regola si distorcono leggermente le dimensioni dei granuli di questi elementi della struttura, così che la permeabilità risulti ridotta in scala.

Effetti scala di fatto ineliminabili rimangono in relazione ai fenomeni di aerazione dell'acqua (inibita in modello rispetto al prototipo) e di resistenza strutturale degli elementi (esaltata in modello).

In particolare questo secondo effetto riveste notevole importanza per grandi elementi snelli (esempio dolos di peso superiore a 20 t).

Per questi elementi, il modello accerta soltanto la stabilità idraulica dell'elemento, cioè accerta che l'elemento non venga rimosso dall'onda, dato per certo che esso rimanga integro, mentre la resistenza strutturale alle sollecitazioni a cui viene sottoposto deve essere accertata per altra via.

Risulta opportuno in questi casi registrare durante le prove eventuali ondeggiamenti degli elementi, che, pur non portando alla rimozione dell'elemento, possono determinare negli urti di fine corsa sollecitazioni assai gravose per l'elemento.

Quale che sia l'onda di progetto prevista, e bene che le prove vengano condotte in condizioni di sollecitazione crescente fino al completo danneggiamento dell'opera.

Normalmente l'altezza d'onda incidente è un parametro idoneo ad ordinare le condizioni di attacco ondoso secondo la sollecitazione indotta.

Fa eccezione il caso, peraltro non infrequente, di onde frangenti con frequenza apprezzabile sui fondali antistanti l'opera; in questo caso sia il periodo dell'onda che, soprattutto il livello medio dell'acqua, rivestono un ruolo importante.

Il periodo dell'onda e l'associata forma dei frangenti hanno sempre un certo effetto sulla stabilità dei massi di una gettata; al crescere del periodo, a parità di pendenza del paramento e di altezza dell'onda incidente, la stabilità dei massi decresce per frangenti di tipo a cascata ("plunging") e cresce per frangenti di tipo a risalto ("surging"), il primo comportamento verificandosi quando il numero di Iribarren (rapporto fra la pendenza della scarpa e la radice della ripidità dell'onda al largo) non supera 2,5 circa.

Acquista importanza, nel caso di onde irregolari la durata della mareggiata, in relazione alla quale cresce la probabile onda massima che investe l'opera. L'attacco ondoso, sia in termini di durata effettiva sia in termini di onde indipendenti, dovrà essere commisurato alla presunta durata della mareggiata di progetto.

Molti fra questi modelli vengono effettuati in canaletta con attacco ondoso rigorosamente ortogonale.

Il dispositivo sperimentale, preferito per ovvie ragioni di economia, non consente peraltro di evidenziare fenomeni intrinsecamente tridimensionali, quali quelli che si verificano ad esempio alla testata di un molo.

Anche per strutture a gettata dinamicamente stabili (in cui l'equilibrio corrisponde ad un bilanciamento statistico dei movimenti dei massi e non alla immobilità degli stessi) si dovranno valutare attentamente gli effetti della obliquità degli attacchi ondosi.

In questi casi, per le strutture più importanti, sarà opportuno affiancare a prove in canaletta, finalizzate a definire la sezione corrente dell'opera, prove in vasca per la configurazione finale di progetto o per le testate.

I dati necessari per questo tipo di prove sono:

- progetto completo dell'opera;
- statistica delle onde estreme: caratteristiche della massima ondatazione (altezza e periodo, nonché eventualmente forme spettrali presunte in frequenza e direzione) per ogni settore di provenienza ed al variare del tempo di ritorno dell'evento.

4.3.1.3 Modelli di spiaggia

Le piccole dimensioni dei granuli componenti la spiaggia non consentono generalmente di rappresentare fedelmente tutti i processi che compongono il trasporto dei sedimenti.

Poiché gli attacchi ondosi sono di regola ridotti in modello, secondo il criterio di similitudine di Froude, la scelta dei sedimenti da impiegare nelle prove viene effettuata così che risultino riprodotte in scala o la velocità dell'acqua che dà inizio al movimento o la velocità di sedimentazione, secondo che il moto dei sedimenti sia incipiente o sviluppato.

Per sedimenti fini, i due criteri portano a risultati alquanto diversi, a riprova della impossibilità di ottenere una similitudine completa.

Si dovranno comunque utilizzare sedimenti di dimensioni non così fini da far insorgere fenomeni di coesione anche appena percettibili.

Per ovviare a questi problemi sono stati impiegati in modello sedimenti leggeri.

L'esperienza si è dimostrata non sempre soddisfacente, manifestandosi sovente effetti scala legati vuoi alla imperfetta riduzione delle forze di inerzia, vuoi alla diversa affinità elettrochimica per l'acqua.

La riduzione dei sedimenti non in scala, entro ragionevoli limiti, ha come principale effetto l'alterazione delle pendenze trasversali della spiaggia, effetto che è stato osservato e quantificato ed è pertanto prevedibile.

Si può pertanto operare con un modello geometricamente distorto, con le orizzontali maggiormente ridotte rispetto alle verticali, così da avere un modello più piccolo in pianta e sedimenti non troppo fini.

Come si è accennato dianzi la distorsione geometrica ha effetti non trascurabili sulle onde e ne vanno valutati attentamente gli effetti quando supera il rapporto di 2:1.

Per questo tipo di modelli sono necessari i dati seguenti:

- batimetria (topografia della spiaggia emersa e sommersa) dell'area di studio,
- natura e composizione granulometrica dei fondali,
- clima ondoso,
- livelli di marea concomitanti.

Nei modelli di spiaggia, che risentono in varia misura di tutte o quasi le onde incidenti, è importante riprodurre in modello un complesso di attacchi ondosi rappresentativo del clima, tenuto conto della intensità degli effetti prodotti e della durata di ognuno di questi.

4.3.2 Modelli matematici o numerici

Per modelli matematici si intendono un complesso di variabili e di relazioni fra queste, sufficienti a determinare univocamente una soluzione. La ricerca della soluzione può farsi in diversi modi: in forma analitica quando si ricavano valori o funzioni che soddisfano esattamente al problema, in forma numerica, quando viene identificato un algoritmo che fornisce con una sufficiente approssimazione la soluzione.

Il grande sviluppo degli elaboratori ha reso quest'ultima forma di soluzione di gran lunga la più frequente.

4.3.2.1 Modelli della propagazione ondosa

Possono distinguersi fra modelli di rifrazione e modelli di diffrazione pura o combinata con la rifrazione (fondali variabili).

I modelli di rifrazione pura sono i più semplici ed adatti a descrivere la propagazione su vasti spazi.

Essi si basano sulla ipotesi-approssimazione che le caratteristiche del mezzo e dell'onda siano lentamente e regolarmente variabili, cioè che fondale, corrente, ampiezza e numero d'onda siano quasi costanti nello spazio di una lunghezza d'onda.

Ogni gruppo d'onde si propaga in modo coerente lungo traiettorie dette raggi, ortogonali alla direzione locale dei fronti d'onda.

Le regole che descrivono queste traiettorie sono quelle note dell'ottica geometrica:

- leggi della rifrazione e riflessione.

I diversi modelli differiscono principalmente per i fenomeni collaterali alla rifrazione che sono in grado di rappresentare: la dissipazione di energia per attrito al fondo, per frangimento, la dispersione in frequenza e direzione dello spettro effettivo, le correnti.

I fenomeni di dissipazione dell'energia per attrito sono importanti soprattutto su piattaforme continentali estese e per onde di lungo periodo.

Il frangimento rappresenta un fondamentale fenomeno limitante l'altezza d'onda, quando i fondali sono a questa comparabili.

La dispersione in frequenza e direzione determina una accentuata regolarizzazione della soluzione ed un modo elegante e rispettoso della fisica del fenomeno per ovviare al problema delle caustiche; considerando diverse armoniche indipendenti, le caustiche, ognuna di intensità infinitesima, si formano in posizioni diverse estendendo ad una zona l'effetto di concentrazione che per l'onda monocromatica è concentrato in un punto.

Quando la dispersione non sia rappresentata è necessario provvedere ad una regolarizzazione dei fondali utilizzati nel calcolo per evitare il formarsi di numerose caustiche non rispondenti alla realtà fisica.

La presenza di correnti modifica alquanto la teoria ed i modelli della rifrazione, sia perché la relazione di dispersione ne risulta influenzata, sia perché si verifica un trasferimento di energia fra campo d'onda e corrente.

Modelli alquanto sofisticati, attualmente in fase di sviluppo più che di applicazione professionale, evidenziano il legame ciclico onde-frangimento-correnti e rappresentano le correnti litorali da onda, importanti per la rappresentazione del trasporto litoraneo in ambienti morfologicamente complessi.

Variazioni rapide del fondale o, più spesso, punti prominenti del contorno che limita lo specchio d'acqua, quali restate di moli e sporgenti, determinano le condizioni, per cui, almeno localmente, l'approssimazione della rifrazione non risulta attendibile.

In questi casi, che si presentano con frequenza particolare negli studi della penetrazione ondosa in bacini portuali o dietro difese di riva, non si può prescindere dal tenere conto del fenomeno della diffrazione, cioè della dispersione della energia radiante sia lungo i raggi che lungo i fronti d'onda.

Esistono quantomeno tre categorie di modelli a questo scopo, citati in ordine di complessità e generalità decrescenti:

- i modelli iperbolici tridimensionali (2H-1T), rappresentanti la propagazione ondosa nel suo effettivo evolvere nello spazio e nel tempo, rimanendo libera la forma della oscillazione nel tempo;
- i modelli ellittici bidimensionali (2H), in cui viene assunta un'oscillazione sinusoidale nel tempo, ma senza alcuna particolare ipotesi sulla distribuzione spaziale del campo d'onda (presenza di importante riflessione dei contorni);
- i modelli parabolici derivanti dalla combinazione di uno schema rifrattivo lungo i raggi con uno schema diffrattivo lungo i fronti (schema non adatto a rappresentare la riflessione dei contorni ma particolarmente tagliato per rappresentare la propagazione dell'onda su fondali rapidamente variabili o l'espansione dell'onda dietro ostacoli).

4.3.2.2 Modelli di trasporto dei sedimenti ed evoluzione morfologica della spiaggia

Essi rappresentano in modo più o meno completo sia la propagazione ondosa, che le correnti indipendenti od indotte, sia, infine, il ciclo di erosione-trasporto-sedimentazione dei sedimenti e la conseguente evoluzione dei fondali.

Nelle forme più complete, sono modelli assai complessi ancora in fase di messa a punto, poco adatti per un utente professionale, ma che probabilmente a breve risulteranno disponibili.

I modelli possono essere distinti in ragione delle dimensioni spaziali dei fenomeni rappresentativi e del dettaglio con il quale i singoli fenomeni vengono rappresentati.

Rispetto alle dimensioni, si possono distinguere i modelli ad una o più linee rispetto ai modelli bidimensionali (nello spazio).

Nei primi i fenomeni che si manifestano in sezioni trasversali alla spiaggia sono trattati in forma globale (modelli ad una linea) o con una discretizzazione limitata e forma della soluzione preassegnata (modelli a 2 o più linee).

Questi modelli sono idonei a simulare il comportamento di lunghi tratti di litorale per lunghi intervalli di tempo, non solo perché l'economia di calcolo derivante dalla dimensione condensata è in questi casi sensibile, ma anche perché alcune delle ipotesi implicite in questi modelli (forma trasversale della sezione invariabile o variabile entro forme preassegnate) sono verificate solo mediamente nello spazio e nel tempo.

Nei modelli ad una linea, il cui prototipo è lo schema di Pelnard-Considère, tutta la fascia attiva della spiaggia si suppone traslata coerentemente.

I modelli differiscono per la forma della relazione caratterizzante il trasporto longitudinale.

I più semplici utilizzano formule, come quella del CERC, che presuppongono un equilibrio locale fra l'azione motrice, l'onda, e l'azione resistente, l'attrito al fondo, associata all'effetto, il trasporto di sedimenti, e condensano la complessità del clima in un'onda equivalente: un'onda di caratteristiche e durata da determinarsi, i cui effetti sono approssimativamente equivalenti a quelli del complesso delle onde componenti il clima.

Modelli ad una linea più complessi possono evidenziare in varie forme il bilanciamento non locale, ma mediato attraverso la formazione delle correnti litoranee con la loro inerzia a stabilirsi, fra la forzante ondosa ed il trasporto di sedimenti.

Inoltre, possono rappresentare la variabilità del clima attraverso un complesso di onde rappresentative.

Per stabilire la equivalenza fra un'onda ed un complesso di onde, si usa abitualmente il criterio energetico, fondatesi sulla proporzionalità, valida almeno in prima approssimazione, fra trasporto e "longshore power", unita alla considerazione che la fascia in cui il trasporto si verifica è orientativamente costituita dalla zona dei frangenti, di ampiezza circa proporzionale alla altezza d'onda.

Un buon criterio di equivalenza consiste di conseguenza nello scegliere le caratteristiche dell'onda in corrispondenza a valori centrali (media o mediana) della distribuzione del cumulo nel tempo del longshore power delle onde elementari nel complesso considerato (proporzionale al volume movimentato).

La durata dell'attacco ondoso sarà poi determinata in modo da produrre lo stesso trasporto complessivo (o longshore power cumulo).

Modelli a due o più linee debbono essere di preferenza utilizzati o quando le caratteristiche della spiaggia sono fortemente disomogenee (ad es. ghiaia in prossimità della battigia e sabbie sulla barra) o quando le opere di cui si vuole valutare l'effetto non coinvolgono l'intera fascia attiva della spiaggia, sicché risulta essenziale nella dinamica del fenomeno la modificazione del profilo trasversale della spiaggia indotta dall'opera, modificazione non rappresentabile in un modello ad una sola linea.

Modelli bidimensionali completi sono al momento in fase di sviluppo, per cui non è possibile né descriverli con precisione né tanto meno classificarli.

Nella scelta del modello occorre dapprima far mente locale a:

- i fenomeni principali che si verificano nel prototipo,
- i dati disponibili sul clima ondoso,
- i dati disponibili sui sedimenti di fondo,
- la conoscenza delle condizioni al contorno relative al tratto di litorale da simulare,
- la conoscenza dei livelli di maree concomitanti alle onde,
- la disponibilità di rilievi idonei per una calibrazione del modello.

Di conseguenza si determineranno le caratteristiche del modello e si programmerà una campagna di acquisizione dei dati del prototipo necessaria a complemento di quelli esistenti.

Si sceglierà un modello semplice e robusto, o già verificato in casi simili, quando i dati disponibili a seguito della campagna sono di qualità non eccelsa, riservando a casi ben documentati in prototipo i modelli più complessi.

Sono rari i casi in cui conviene spendere più nel modello che nella campagna di acquisizione dati e di rilievi finalizzati alla calibrazione del modello stesso.



L'Atlante delle opere di sistemazione costiera intende presentare ad un ampio pubblico il panorama completo degli interventi che vengono utilizzati per sistemazione e la difesa delle coste italiane, evidenziandone la funzionalità e la compatibilità paesaggistica e, più in generale, ambientale.

La descrizione delle tipologie delle opere sarà preceduta da alcuni capitoli introduttivi che consentiranno di comprendere il significato della necessità di progettare tali interventi, soprattutto quelli di prevenzione, alla scala di unità fisiografica a causa dell'interdipendenza dei numerosi processi che vi si svolgono; a tal fine saranno utili anche alcuni richiami alla legislazione europea, nazionale e regionale in materia di gestione delle aree costiere.

Questo Atlante completa una serie di pubblicazioni che descrivono, in forma divulgativa, le opere strutturali e non strutturali in uso per la sistemazione dei versanti, delle aste fluviali e delle coste. Il progetto di questa collana è stato sviluppato dal Dipartimento difesa del suolo dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici APAT (ex ANPA). In particolare il presente volume è stato redatto in collaborazione con il Dipartimento tutela delle acque interne e marine.

