

## 16. INTERVENTI DI PROTEZIONE DELLA COSTA IN EROSIONE

### 16.1. Generalità

### 16.2. Interventi strutturali per bloccare l'erosione

#### 16.2.1. Muri a mare

#### 16.2.2. Rivestimenti

#### 16.2.3. Paratie

### 16.3. Interventi strutturali per contenere l'erosione

#### 16.3.1. Pennelli

#### 16.3.2. Scogliere parallele emergenti e soffolte

##### 16.3.2.1. Opere longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo emergente ed ubicate al largo della zona dei frangenti

##### 16.3.2.2. Opere longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo emergente ed ubicate tra la linea di riva e la zona dei frangenti

##### 16.3.2.3. Opere di difesa longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo sommerso (barriere soffolte)

#### 16.3.3. Promontori artificiali

### 16.4. Ripascimento

#### 16.4.1. Evoluzione di un ripascimento artificiale

#### 16.4.2. Compatibilità del materiale da riporto

#### 16.4.3. Calcolo del coefficiente di overfill

#### 16.4.4. Calcolo del coefficiente di ripascimento

#### 16.4.5. Risorse di materiali per il ripascimento

##### 16.4.5.1. Cave

##### 16.4.5.2. Riciclo e dragaggi portuali

##### 16.4.5.3. Altre fonti

### 16.5. Soluzioni miste

### 16.6. Naturalizzazione e stabilizzazione delle dune

## 16.1 Generalità

Prima di illustrare le tipologie di intervento per la difesa dei litorali, è opportuno ricordare come qualsiasi opera realizzata lungo la costa costituisca un ostacolo al libero propagarsi del moto ondoso, e pertanto essa può indurre alterazioni della costa in zone limitrofe a quella di intervento. Da tali semplici considerazioni appare evidente che è necessario pensare gli interventi non come singole opere ma come parte integrante di un sistema di difesa che consenta di assicurare l'integrità dell'intera fascia litoranea.

Per contrastare l'erosione delle spiagge si possono utilizzare diversi sistemi di protezione, di seguito più ampiamente descritti, che possono suddividersi in *passivi* e *attivi*. Mentre i primi assicurano una semplice protezione del territorio costiero, i secondi producono anche un incremento localizzato della spiaggia. Le difese possono ancora suddividersi in *rigide*, *morbide* e *miste* in relazione alla deformabilità offerta all'azione del mare. Le opere sono anche distinte per le caratteristiche geometriche funzionali in *continue* e *discontinue*, *permeabili* e *impermeabili*.

In Tabella 16.I è presentato un breve sommario delle tipologie di opere di protezione costiera e per ognuna di esse vengono specificati le finalità e gli obiettivi specifici.

## 16.2 Interventi strutturali per bloccare l'erosione

Alla categoria dei sistemi *passivi-rigidi* appartengono le opere *aderenti* disposte parallelamente alla riva nella parte emersa della spiaggia a diretta difesa di abitazioni, strade e ferrovie lungomare. Sono realizzate con semplici rivestimenti a scogliera, con massi talvolta

cementati con bitume o con piastre di calcestruzzo interconnesse, con gabbioni o materassi articolati ovvero con muri e pareti verticali a palanca, a paratia o a gravità. Queste strutture sono adatte per lo più a interventi di emergenza e di breve durata data la loro economicità, rapidità di esecuzione e immediata protezione garantita dall'opera, di contro però non garantiscono alcuna protezione alla spiaggia antistante addirittura accelerando, in alcuni casi, il processo di erosione al piede dell'opera causandone il crollo.

Trattandosi di opere aderenti a terrapieni, uno dei principali parametri di progetto è la spinta esercitata dal terreno sull'opera stessa.

Table 16.I Tipi di strutture costiere (adattamento dal Coastal Engineering Manual, 2004)

Tipo di struttura	Finalità	Obiettivo specifico
Dighe a mare	Prevenire o alleviare l'inondazione marina nelle zone costiere basse	Separazione della linea di costa dall'entroterra attraverso una struttura impermeabile alta
Muri a mare	Proteggere terreni e strutture da inondazioni e tracimazione	Rafforzamento di alcune parti del profilo di spiaggia
Rivestimenti	Proteggere la linea di spiaggia dall'erosione	Rafforzamento di alcune parti del profilo di spiaggia
Paratie	Trattenere il pendio e prevenire la frana del terreno retrostante	Rafforzamento del terreno circostante che insiste sulla spiaggia
Pennelli	Prevenire l'erosione di spiaggia	Riduzione del trasporto solido litoraneo
Frangiflutti distaccati	Prevenire l'erosione di spiaggia	Riduzione dell'altezza d'onda sul lato riparato e riduzione del trasporto solido litoraneo
Scogliere frangiflutti	Prevenire l'erosione di spiaggia	Riduzione dell'altezza d'onda incidente sulla spiaggia
Soglie sommerse	Prevenire l'erosione di spiaggia	Ritardare il trasporto dei sedimenti verso il largo
Drenaggi di spiaggia	Prevenire l'erosione di spiaggia	Accumulo di materiale sulla porzione drenata della spiaggia
Ripascimento e ricostruzione della duna	Prevenire l'erosione di spiaggia e proteggere dalle inondazioni	Versamento artificiale di materiale della spiaggia e della duna, che possa essere erosa dalle onde e dalle correnti in luogo del ripascimento naturale
Frangiflutti	Protezione dei bacini portuali, degli ingressi dei porti dall'azione di onde e correnti	Dissipazione dell'energia del moto ondoso e/o riflessione dell'energia ondosa verso il largo
Moli	Stabilizzare i canali di navigazione alle foci dei corsi d'acqua e nei bacini mareali	Confinamento dei fiumi e del flusso mareale. Protezione contro le tempeste e le correnti ortogonali
Muri di contenimento	Prevenire sedimentazione o erosione indesiderata e proteggere gli approdi dalle correnti	Indirizzamento delle correnti naturali o prodotte dall'uomo, forzando il flusso dell'acqua lungo la struttura
Barriere	Proteggere gli estuari contro l'innalzamento del livello del mare	Separazione dell'estuario dal mare attraverso paratie mobili o chiuse
Condotte di scarico	Trasportare i fluidi	Stabilità basata sulla gravità
Strutture su pali	Fornire banchine per la movimentazione dei mezzi, per il passaggio delle condotte, ecc., e offrire possibilità di approdo	Trasferimento delle peso delle banchine sul fondo

### 16.2.1 Muri a mare

Si tratta di opere massicce, la cui principale funzione è quella di resistere all'azione delle onde, fornendo una protezione lungo coste in cui sono presenti infrastrutture civili e beni immobili di elevato valore.

Possono essere fondate a gravità oppure su pali a seconda della natura dei suoli e vengono usualmente realizzati in calcestruzzo o in pietrame.

Particolare attenzione viene usualmente rivolta alla progettazione della sezione del muro lato mare. Si possono avere infatti paramenti curvi, le cui principali funzioni sono la riduzione dell'impatto del moto ondoso, la realizzazione di un fenomeno di run-up sulla struttura e l'allontanamento del moto ondoso dalle aree protette dalla struttura (l'onda impatta sul muro, il moto viene forzato a seguire la superficie curva, per cui l'onda è costretta a ricadere indietro). Un'altra tipologia è quella con il paramento a gradini, per la riduzione del fenomeno del run-up e della tracimazione. Esistono anche delle sezioni a gradini curvate, che cercano di coniugare i benefici effetti delle due tipologie precedenti. Infine, esistono dei muri a scogliera, che grazie all'effetto della superficie porosa consentono una dissipazione dell'energia del moto ondoso e una conseguente riduzione della riflessione e dell'erosione al piede.

#### 16.2.2 *Rivestimenti*

I rivestimenti consistono nella ricopertura delle parti da proteggere dall'erosione come scarpate, argini o altre parti della spiaggia con materiale caratterizzato da una resistenza maggiore di quello nativo. Di solito vengono usati massi, naturali o artificiali, o calcestruzzo.

Il rivestimento è di solito composto da tre parti: lo strato di protezione, che deve resistere all'azione delle onde, il filtro, che supporta lo strato di protezione soprastante e consente il deflusso delle acque dal terrapieno verso l'esterno, prevenendo quindi il dilavamento del terreno retrostante, e la protezione al piede del rivestimento, che consente di evitare spostamenti della struttura dovuti ad erosione al piede.

#### 16.2.3 *Paratie*

Si tratta di strutture verticali di contenimento del terrapieno retrostante, che in alcuni casi può essere costituito anche da materiali di riporto. Le paratie sono anche in grado di fornire una moderata protezione nel caso di attacco ondoso non eccessivamente gravoso. Le tipologie che vengono usualmente adottate sono varie (palancole, pali, etc).

Vengono utilizzate qualora sia necessario avere una profondità notevole direttamente lungo la linea di riva (ad esempio nei porti e negli approdi), oppure per la protezione al piede o infine nel caso in cui si voglia estendere considerevolmente la parte di terreno rispetto alla linea di riva esistente.

### 16.3 Interventi strutturali per contenere l'erosione

Tra le opere di difesa *attive-rigide* sono comprese sia quelle pressoché parallele alla riva, dette *barriere frangiflutti distaccate*, sia quelle ad essa ortogonali, dette *pennelli*.

#### 16.3.1 *Pennelli*

I *pennelli* sono strutture trasversali e vengono utilizzati nei litorali in erosione con forte trasporto solido longitudinale: sono strutture più o meno permeabili ortogonali alla riva, che trattengono parte del materiale in transito creando in genere un avanzamento della spiaggia soprafflutto e un arretramento sottoflutto. I pennelli sono in genere posti ad una distanza di 2÷3 volte la loro lunghezza e si estendono dal retrospiaggia, a partire da un punto sufficientemente radicato a terra perché il pennello non venga aggirato dal getto di risalita, fino alla prima linea dei frangenti (in genere -2÷-3 m s.l.m.). All'estremità foranea può a volte presentare un allargamento a "T" in modo da ridurre l'effetto delle correnti di ritorno e le perdite di materiale, realizzando in tal modo uno schema ibrido con le barriere distaccate. I pennelli possono essere costruiti a scogliera o con fascine, legname, gabbie d'acciaio, elementi in calcestruzzo. I pennelli possono essere isolati o più comunemente far parte di un "sistema di pennelli".

La figura 16.1 mostra uno schema di effetto della presenza dei pennelli sul trasporto solido sia nel caso di attacco frontale del moto ondoso, che per quello di attacco obliquo. Nella figura 16.2 è invece riportata un'immagine di un litorale interessato da pennelli.

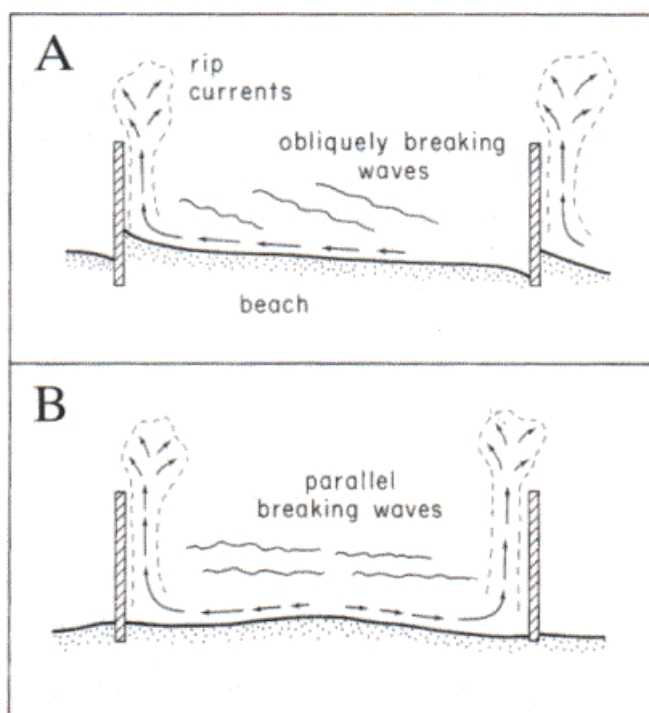


Figura 16.1. Esempio di effetto sulla linea di costa dovuto alla presenza dei pennelli. (A) attacco obliquo del moto ondoso. (B) attacco del moto ondoso normale alla linea di costa.



Figura 16.2. Esempio di realizzazione di pennelli.

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

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

sopra flutto, 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 maggiore 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 intende 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 ridurne 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 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 sotto flutto). Nel caso invece di paraggi, in cui il trasporto ha frequenti inversioni, una spiaggia potrà formarsi anche sul lato sotto flutto, 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.

Uno dei parametri fondamentali nella realizzazione di un sistema di pennelli è la spaziatura tra i singoli elementi. Infatti, come mostrato in Figura 16.3, una distanza ridotta rischia di far disperdere i sedimenti verso il largo, dove non possono più essere recuperati per la costruzione della spiaggia, spaziatura eccessivamente larghe possono provocare fenomeni di erosione con il rischio scoprire la radice del pennello.

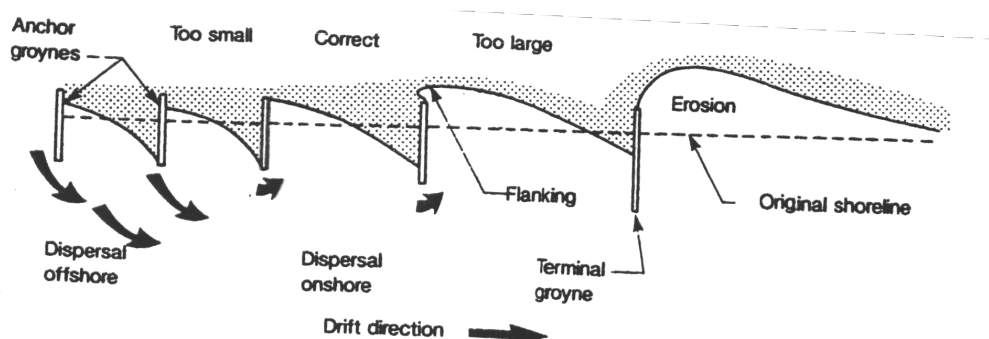


Figura 16.3. Impatto della spaziatura tra i pennelli.

### 16.3.2 Scogliere parallele emergenti e soffolte

Le *barriere frangiflutti distaccate* vengono realizzate parallelamente ai fronti d'onda incidenti, ad una distanza dalla costa dell'ordine della loro lunghezza d'onda (~100 m). Possono essere realizzate con una serie di scogliere poco emergenti (vedere figura 16.4) o completamente sommerse (*barriere soffolte*).

La profondità di imbasamento (in genere -3÷-4 m) coincide con quella della barra naturale che si instaura in corrispondenza dei frangenti durante le mareggiate più frequenti ed intense. Il coronamento può arrivare a quota +1,5 m s.l.m. ed avere una larghezza al coronamento di 4-5 m.

Le barriere distaccate sono tracimabili dalle onde più alte che depositano nella zona d'ombra a tergo i sedimenti in sospensione formando un'estroflessione della spiaggia che può congiungersi alla barriera (*tombolo*). Oltre ad inconvenienti di carattere estetico, le barriere

emergenti possono causare problemi igienico-ambientali legati al ristagnare delle acque, specie durante i mesi estivi e quando come nei nostri mari sia trascurabile il naturale ricambio della marea. Tale inconveniente è risolto nel caso di barriere soffolte.



Figura 16.4. Esempio di realizzazione di barriere emerse distaccate.

#### *16.3.2.1 Opere longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo emergente ed ubicate al largo della zona dei frangenti*

Questo sistema di opere viene solitamente adottato quando si è in presenza di spiagge sottili per cui i fronti d'onda, data la dolce acclività dei fondali, si presentano al frangimento con disposizione pressoché parallela alla linea di riva. Tale sistema è costituito da una serie di elementi continui, distaccati dalla linea di riva e distanziati tra loro di una quantità all'incirca pari ad una lunghezza d'onda nel punto, disposti con l'asse maggiore parallelo alla linea di costa (vedere la Figura 16.5 in cui insieme ad uno schema di pianta e di sezione tipo sono indicate le grandezze geometriche principali caratterizzanti tale tipo di opera).

Tali opere vengono ubicate al largo della zona dei frangenti in modo da assolvere alle seguenti funzioni:

- il frangimento dell'onda sul paramento esterno della diga onde evitare che la dissipazione del contenuto energetico dell'onda avvenga sul fondale con conseguente messa in sospensione e trasporto dei sedimenti;
- la diffrazione alle testate con conseguente ripascimento a tergo e conseguente formazione di tomboli.

E' opportuno sottolineare come l'altezza dell'onda di progetto per il dimensionamento della mantellata della scogliera deve derivare da una approfondita analisi della propagazione dell'onda dal largo verso il punto di ubicazione della struttura.

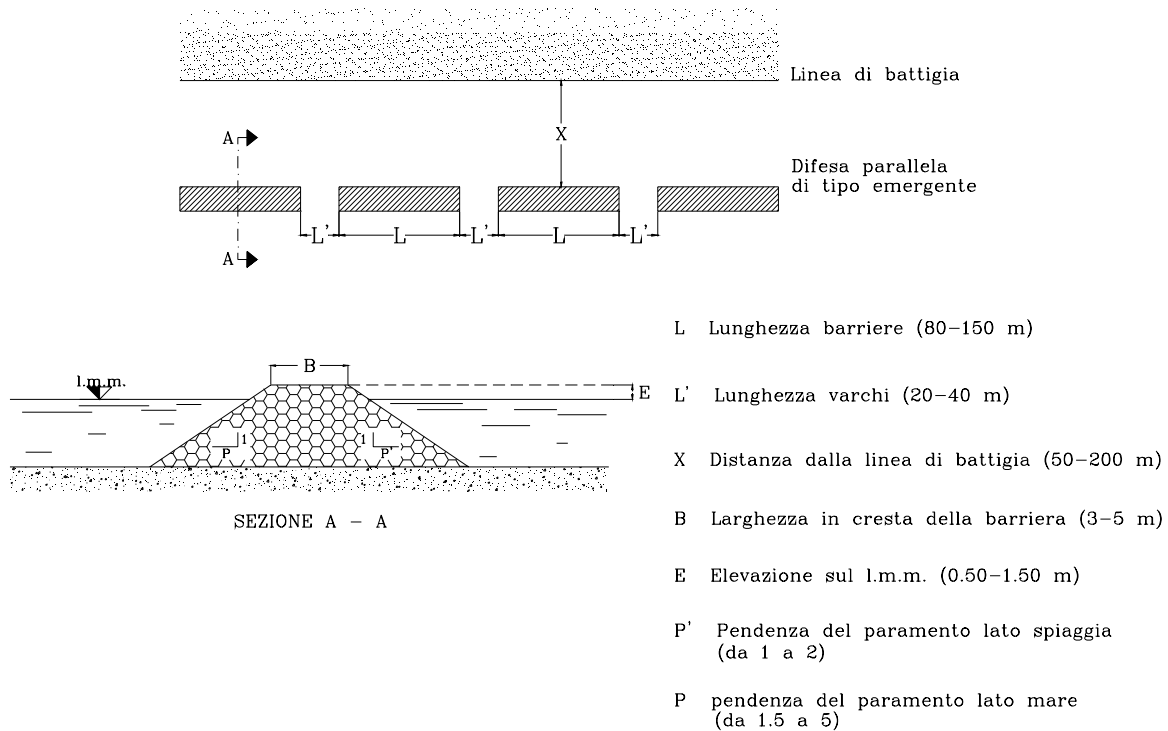


Figura 16.5 Schema tipo di una sezione e di una pianta di una barriera distaccata del tipo emerso.

#### 16.3.2.2 Opere longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo emergente e ubicate tra la linea di riva e la zona dei frangenti

La scelta di tali opere è unicamente ascritta a ragioni di tipo tecnico. Infatti esse vengono realizzate quando ci si trova in presenza di spiagge a bassissima pendenza e pertanto l'ubicazione delle opere di cui al punto precedente avverrebbe a notevole distanza dalla riva.

Questo tipo di opere si trovano esposte all'azione diretta dei frangenti. Pertanto ai fini del loro corretto dimensionamento risulta di notevole importanza la valutazione delle forze che su di esse agiscono. Per assicurare la stabilità della struttura è indispensabile individuare quali sono i parametri dell'onda che provoca la massima azione dinamica sull'opera (onda di progetto), azione che si esplica allorché il flutto si presenta davanti all'ostacolo in condizioni prossime al frangimento.

#### 16.3.2.3 Opere di difesa longitudinali distaccate dalla linea di riva di tipo sommerso (barriere soffolte)

Qualora si volesse ovviare ad inconvenienti di tipo paesaggistico si possono adottare sistemi di difesa ad elementi sommersi. Le caratteristiche delle barriere soffolte, siano esse permeabili che impermeabili, possono essere così riassunte:

- i) assicurano un elevato coefficiente di trasmissione del moto ondoso favorendo così la circolazione e il ricambio d'acqua;
- ii) richiedono modeste quantità di materiale (se paragonate con le barriere emerse);
- iii) assicurano un modesto impatto ambientale in quanto non risultano essere visibili, anzi, se le barriere sono del tipo permeabile, esse costituiscono un habitat favorevole per le specie marine;
- iv) possono rappresentare un pericolo per la navigazione se non opportunamente segnalate.



Volendo analizzare più in dettaglio le caratteristiche sopra menzionate, è da notare come il coefficiente di trasmissione del moto ondoso, definito come  $K_t = H_t/H_i$ , cioè a dire come rapporto tra l'onda incidente e l'onda trasmessa, si mantenga spesso superiore a 0.4. Tuttavia è da notare come per una data profondità e per un assegnato periodo, il coefficiente di trasmissione diminuisca al crescere dell'altezza d'onda. Ciò significa che le barriere soffolte risultano più efficienti per onde importanti in quanto ne favoriscono il frangimento.

Nella Figura 16.6 di seguito riportata, è rappresentata una schematica vista dall'alto di questo tipo di barriere insieme ad una sezione tipo

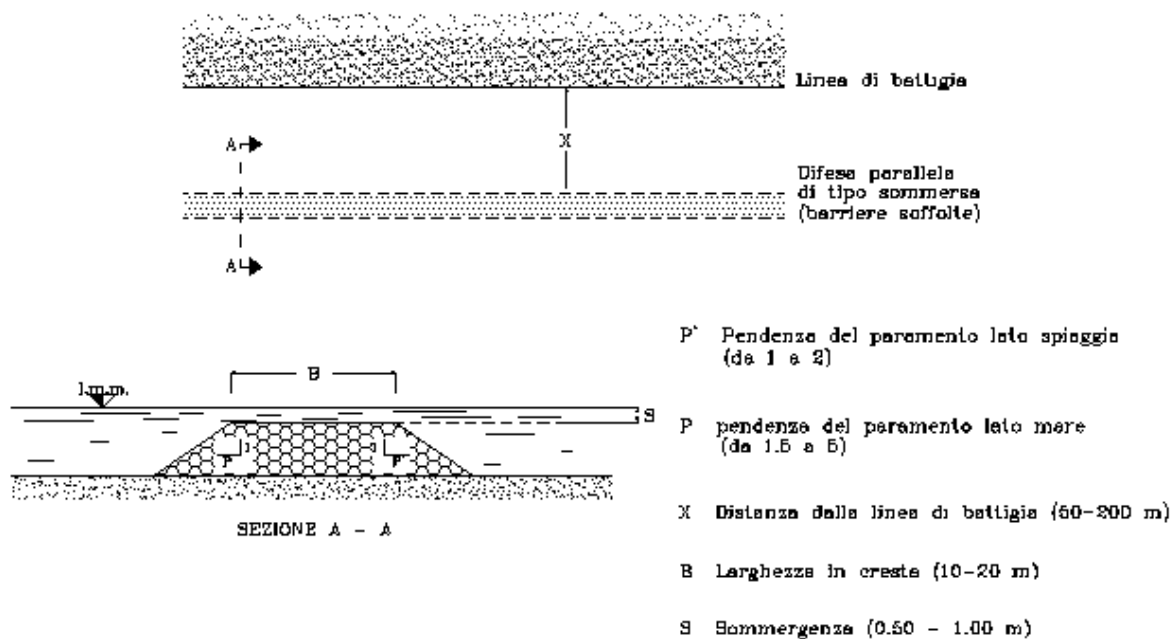


Figura 16.6 Sezione e pianta di una difesa con barriera distaccata del tipo sommerso.

### 16.3.3 Promontori artificiali

Un'altra possibilità per la protezione della costa dall'erosione è la costruzione di promontori artificiali (headland control nella letteratura anglosassone), che tentano di mimare il comportamento della Natura e indirizzare l'evoluzione del litorale assecondando l'azione prevalente del moto ondoso. In concetto informatore di questa tipologia di intervento è che la difesa costiera migliore si ottiene quando la linea di riva si riorienta in modo tale da risultare parallela ai fronti d'onda incidenti, in modo da ottenere profili planimetrici di spiaggia cosiddetti crenulati (o a zeta).

I promontori vengono realizzati in modo da minimizzare gli effetti delle onde di tempesta. Tuttavia l'energia del moto ondoso è in generale estremamente fluttuante, generando in alcune fasi la formazione di barre di protezione litoranee e successivamente l'apporto del materiale da esse eroso verso la spiaggia. In questo processo naturale, l'unica interferenza dell'uomo consiste nel fare in modo che le onde lunghe che erodono la barra e ricostruiscono la spiaggia arrivino normalmente rispetto alla spiaggia stessa, in modo tale da ridurre il trasporto litoraneo al minimo. In tal modo si fa sì che il materiale rimosso e trasportato più al largo ritorni in una fase successiva al suo luogo di origine. Quello che si ottiene è quindi un semplice riorientamento della spiaggia, come mostrato in Figura 16.7, ottenuto in seguito al processo di rifrazione. Se una struttura artificiale viene collocata a una certa distanza dalla costa, ma sufficientemente vicina, in modo che possa aversi la formazione di un tombolo, la spiaggia si



orienterà in modo da mantenere la linea di costa parallela al fronte d'onda incidente. Su lato sottoflutto della struttura, si avrà invece un processo di diffrazione-rifrazione del moto ondoso, con la generazione quindi di una linea di spiaggia caratterizzata da curvature notevoli.

Con un sistema di promontori, come quello della Figura 16.7, si avrà la formazione di un sistema di baie, che pur rimanendo in equilibrio, conserveranno comunque una certa quota di trasporto litoraneo. In tal caso, la linea dei frangenti non sarà parallela alla spiaggia, in modo da consentire una quota di trasporto solido attraverso l'intero sistema. Si può quindi parlare di un equilibrio dinamico, che potrebbe essere interrotto qualora il trasporto solido litoraneo si annullasse e la spiaggia quindi venisse erosa fino al raggiungimento di un equilibrio statico.

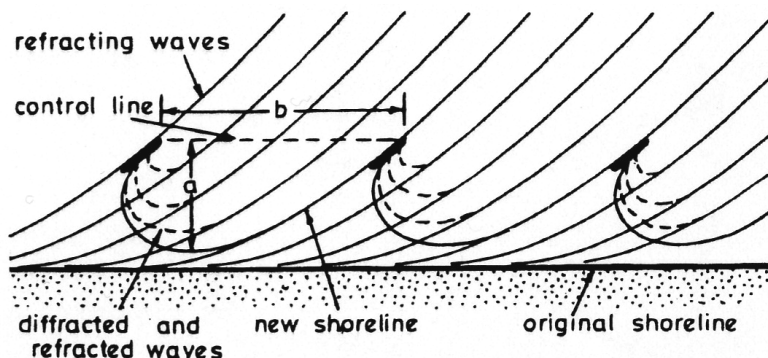


Figura 16.7 Riorientamento della linea di spiaggia in seguito al processo di rifrazione e diffrazione generato dalla presenza dei promontori artificiali.

Nella realizzazione dei promontori artificiali è inoltre importante l'orientamento rispetto alla spiaggia di progetto. In Figura 16.8 sono mostrate alcune possibili scelte. La soluzione classica è quella di disporre il promontorio artificiale in maniera parallela rispetto alla spiaggia preesistente, ma questo significherebbe che le onde lunghe, con angolo di incidenza obliquo potrebbero generare fenomeni erosivi indesiderati (v. Figura 16.8b). Si può più opportunamente decidere di disporre il promontorio parallelamente alla spiaggia di progetto (ovvero ortogonalmente alla direzione di attacco del moto ondoso, v. Figura 16.8a), tuttavia questa soluzione è associata anche alla generazione di un macrovortice in testa al promontorio, che può essere causa di fenomeni di subsidenza sottoflutto. Ancora, si può scegliere di incastonare la struttura all'interno della nuova spiaggia, con un angolo diverso (v. Figura 16.8c), ma in caso di tempeste il materiale reclamato dalla spiaggia per la formazione della barra litoranea sarebbe ridotto, il che faciliterebbe fenomeni di erosione. La scelta migliore appare quella in Figura 16.8d, in cui il promontorio è parallelo alla spiaggia di progetto, ma è ben radicato a terra e presenta una testata ricurva. Questa opzione consente infatti la realizzazione di una berma sufficientemente protetta all'interno della struttura, inoltre a causa della testa ricurva, si ha una riduzione del processo diffrattivo in testata e di conseguenza di fenomeni di scavo localizzati.

Infine si vuole qui presentare brevemente una tipologia di promontorio artificiale (v. Figura 16.9), sviluppata in Gran Bretagna, cosiddetta "a coda di pesce", che cerca di sfruttare gli aspetti positivi di pennelli e frangiflutti. Infatti, con riferimento alla figura, il tratto AC consente di intercettare il trasporto solido litoraneo, mentre i tratti AO e OB funzionano come dissipatori di energia. Le curvature dei diversi tratti, infine, sono tali da ridurre al massimo fenomeni di riflessione.

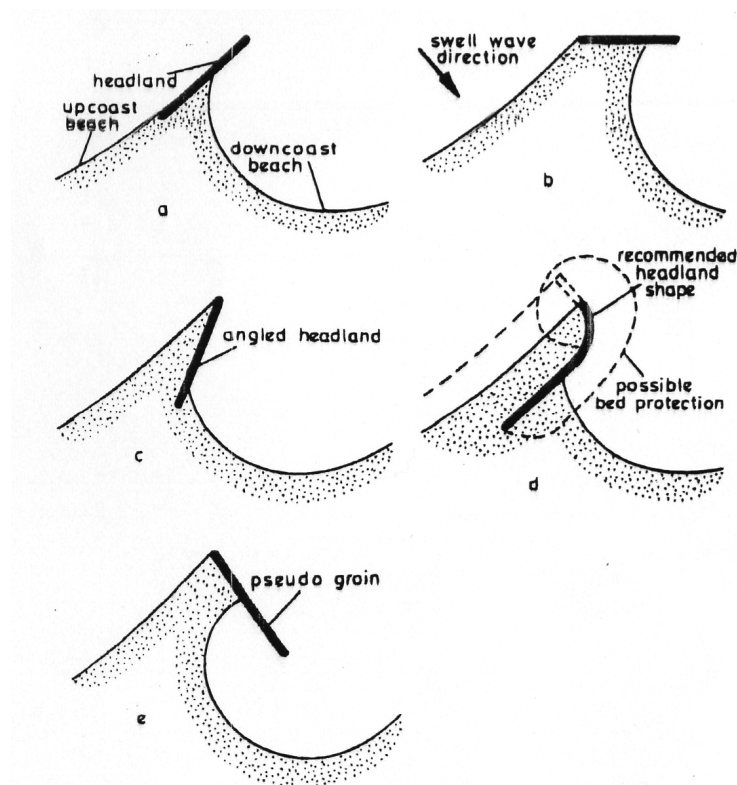


Figura 16.8 Possibili orientamenti e disposizioni planimetriche di promontori artificiali.

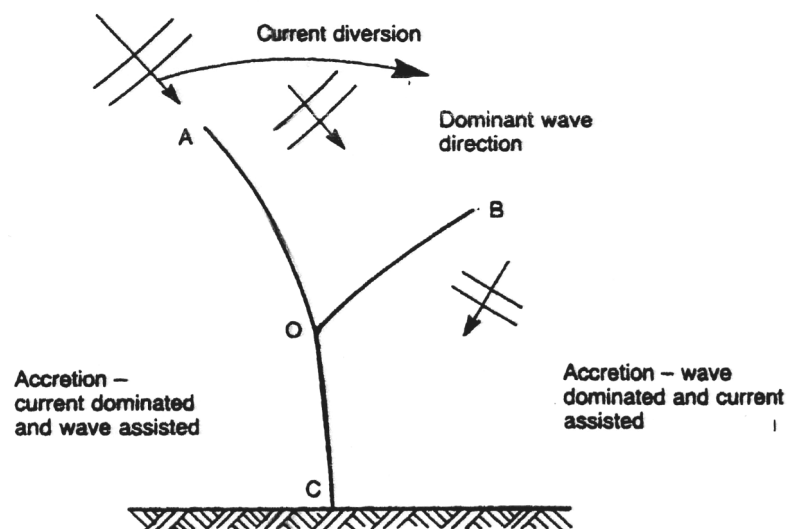


Figura 16.9 Schema di un promontorio “a coda di pesce”.

#### 16.4 Ripascimento

Alla categoria degli interventi attivi di tipo morbido appartengono invece i *ripascimenti artificiali*, versamenti di sabbia di opportuna granulometria estratta da cave di prestito in mare o a terra. La granulometria deve in genere essere superiore a quella presente sulla spiaggia, in caso contrario si presenta un incremento della capacità di trasporto del moto ondoso, con necessità di interventi manutentivi frequenti e costosi. Ciò induce a sconsigliare la sabbia prelevata al largo, che sebbene in genere più economica di quella terrestre risulta essere, in genere, troppo fine e comporta problemi di impatto ambientale, in quanto il prelievo può

alterare il moto ondoso causando una modifica della linea di battigia. Per limitare gli interventi periodici di manutenzione di una spiaggia artificiale limitando le perdite di sedimenti si possono combinare i versamenti di materiali con opere di contenimento, sia aderenti che distaccate, sia trasversali che longitudinali, realizzando i *ripascimenti protetti o controllati*.

Gli obiettivi sono principalmente quelli di costruire o ricostruire aree fruibili per scopi turistici e ricreativi, offrire protezione dall'attacco del moto ondoso, ricostituire habitat per specie pregiate o in estinzione.

Tra i vantaggi della realizzazione di un ripascimento artificiale vi sono quindi la possibilità di ampliamento della spiaggia e il conseguente incremento della sua fruibilità; la capacità di conservare e persino migliorare le caratteristiche paesaggistiche e ambientali; una migliore protezione da mareggiate anche attraverso la costruzione di spiagge sacrificali ed infine il fatto che si hanno in realtà perdite di sedimenti minori di quelle apparentemente stimabili, poiché il sedimento che abbandona l'area soggetta a riporto va a ripascere altri siti limitrofi.

Lo svantaggio principale è legato alla manutenzione del ripascimento stesso, ovvero alla necessità di ripetere ciclicamente l'intervento (peraltro a distanza temporale non facilmente determinabile).

#### *16.4.1 Evoluzione di un ripascimento artificiale*

Il materiale per il ripascimento generalmente viene disposto secondo un profilo più ripido di quello di equilibrio. Si viene così a creare un disequilibrio volutamente indotto. La scala temporale per il riequilibrarsi risulta di particolare interesse in quanto condiziona la validità economica dell'intervento.

Le modificazioni dell'intervento di ripascimento avvengono secondo tre fasi:

- (i) trasferimento trasversale di sabbia dalla parte superiore verso le parti inferiori con un generale arretramento della linea di battigia, ma senza trasferimento di materiale al di là del tratto soggetto ad intervento;
- (ii) spandimento laterale;
- (iii) erosione.

In particolare per quanto riguarda la prima fase si può fare riferimento a quanto illustrato al Capitolo 13 a proposito del profilo di equilibrio di una spiaggia.

Le tre fasi anzi dette avvengono più o meno contemporaneamente ma risultano caratterizzate da tre scale temporali differenti. Infatti, la prima fase, ovvero la riequilibratura del profilo tipicamente è l'effetto dominante per i primi anni dall'intervento; la seconda fase, caratterizzata dal fenomeno di spandimento laterale, si realizza su scale temporali dell'ordine del decennio; infine, assumendo che l'erosione vera e propria nel sito soggetto ad intervento continui alla stessa velocità che si aveva precedentemente all'intervento stesso, l'effetto della terza fase di erosione è lo stesso ogni anno.

In Figura 16.10 si mostra schematicamente, in pianta e in profilo, come i processi sopradescritti si realizzino contemporaneamente, interessando l'intero ammasso del materiale versato. La Figura 16.11 mostra invece come le diverse fasi evolutive contribuiscano nel tempo a modificare la configurazione morfologica della spiaggia interessata da un intervento di ripascimento.

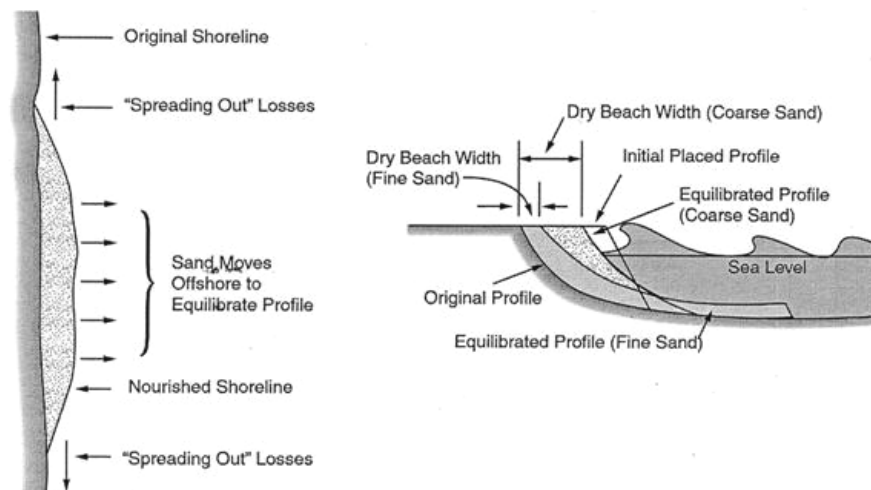


Figura 16.10 Schematizzazione dei processi che si realizzano durante l'evoluzione di un ripascimento artificiale.

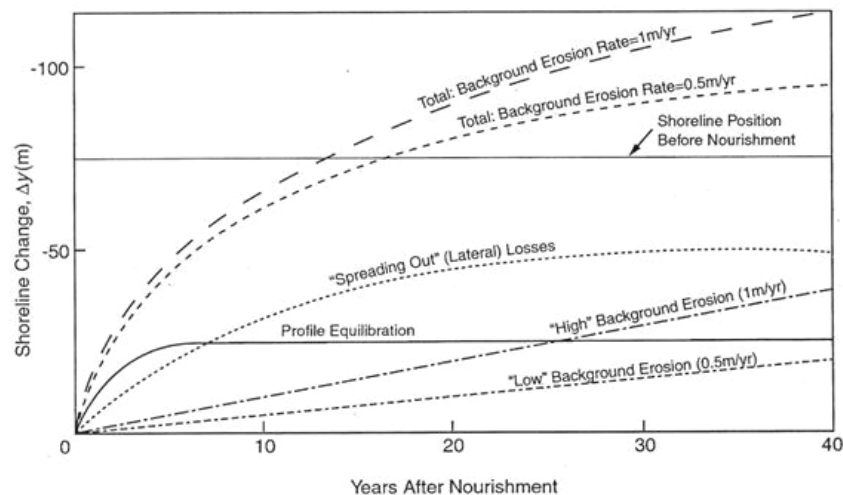


Figura 16.11 Evoluzione temporale di un intervento di ripascimento artificiale, con riferimento ai cambiamenti dovuti alla tendenza a raggiungere il profilo d'equilibrio, allo spandimento laterale e al processo erosivo che interessano.

#### 16.4.2 Compatibilità del materiale da riporto

Appare evidente come il materiale utilizzato per il ripascimento debba essere compatibile con quello preesistente sotto tutti i punti di vista (mineralogia, composizione, dimensione e colore). Tuttavia, dal momento che le cave di prestito (solitamente marittime) sono spesso con caratteristiche diverse di quelle del materiale nativo, bisogna stabilire alcuni criteri per la compatibilità tra i materiali.

Anzitutto la qualità dei sedimenti viene identificata attraverso una bassa percentuale di frazione argillosa, ovvero di frazione granulometrica di diametro inferiore a 0.074 mm. Infatti il contenuto di frazione argillosa è legato a considerazioni di carattere ambientale che riguardano la torbidità dell'acqua sia durante il versamento che durante l'evoluzione nel tempo del ripascimento. In genere un contenuto di frazione argillosa minore del 5% è considerato accettabile, un contenuto maggiore del 10% può essere ritenuto di dubbia accettabilità.

#### 16.4.3 Calcolo del coefficiente di overfill

Nell'ipotesi che il materiale di riporto abbia la stessa granulometria del materiale originario (o che sia leggermente più grossolano), il volume di progetto potrà essere calcolato considerando trascurabili le perdite di materiale di riporto dovute a diversità di comportamento sotto l'azione del moto ondoso (processi di rimozione e di sorting).

L'utilizzo di materiale più fine comporterà invece, sotto l'azione del moto ondoso, la perdita di quantità anche considerevoli di sedimenti subito dopo il ripascimento, di cui si dovrà tener conto maggiorando adeguatamente i quantitativi di apporto calcolati nell'ipotesi di uniformità di caratteristiche tra materiale di ripascimento e materiale originario.

Il coefficiente di overfill **RA** è stato calcolato da James (1975) in funzione della deviazione standard della distribuzione granulometrica del campione in unità  $\phi$  e del diametro medio della distribuzione granulometrica del campione in unità  $\phi$ , esso rappresenta il numero di metri cubi di materiale richiesto per produrre un metro cubo di materiale di spiaggia (b=borrow; n=ative)

Figura 16.12 mostra l'andamento del coefficiente di overfill in funzione dei parametri

$$M_{\phi} = \frac{\phi_{84} + \phi_{16}}{2} \quad (16.1)$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{2} \quad (16.2)$$

della distribuzione granulometrica della spiaggia nativa e della cava di prestito.

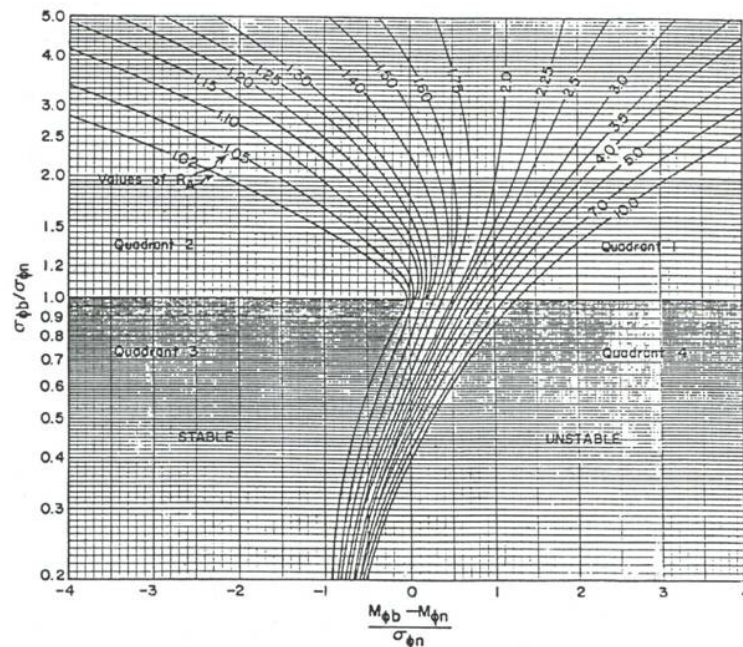


Figura 16.12 Coefficiente di overfill in funzione dei parametri dei sedimenti provenienti dalla cava di prestito e dalla spiaggia nativa.

#### 16.4.4 Calcolo del coefficiente di ripascimento

Un secondo coefficiente, che interessa la durata a lungo termine del ripascimento, riguarda l'incremento della frequenza degli apporti di sedimento rispetto al caso di invarianza del sedimento di riporto rispetto a quello nativo. Infatti la diversa dimensione dei sedimenti implica

un diverso tempo di residenza del materiale nella zona interessata dal ripascimento. Tale coefficiente, indicato con RJ rappresenta l'incremento della frequenza di ripascimento rispetto alla condizione di invarianza del sedimento di riporto rispetto a quello di origine (vedi Figura 16.13).

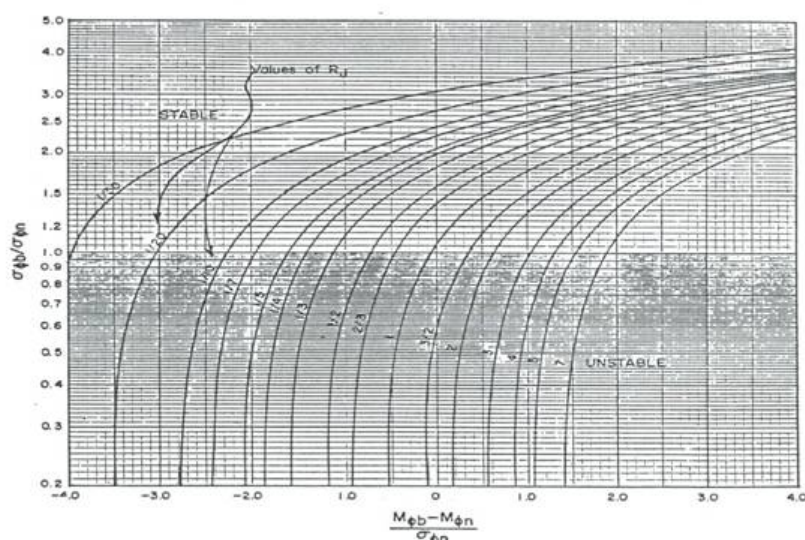


Figura 16.13 Coefficiente di overfill in funzione dei parametri dei sedimenti provenienti dalla cava di prestito e dalla spiaggia nativa.

#### 16.4.5 Risorse di materiale per il ripascimento

##### 16.4.5.1 Cave

Nel caso del ripascimento delle spiagge il materiale di base prelevato da cave dell'entroterra oltre a rappresentare una diseconomia in termini commerciali è una grave diseconomia in termini eco-ambientali. Le cave a mare a profondità maggiore di quella dove termina il trasporto attivo dovuto alle onde (dell'ordine dei 10 metri) risultano essere il luogo migliore di prelievo; queste cave sono dovute - nella maggior parte dei casi - alla presenza di paleo spiagge, cioè di spiagge che sono state sommerse dall'innalzamento del livello del mare. L'utilizzo del materiale da cave marine comporta un notevole risparmio in termini di costo del materiale di ripascimento (valutabile nell'ordine di 10-15. €/m<sup>3</sup> contro le 30 €/m<sup>3</sup> della sabbia di cava) nonché un ridottissimo impatto costruttivo (eliminazione trasporto da terra, solo trasporto via mare). Questo tipo di intervento presenta molti vantaggi dal punto di vista ambientale: non deturpa il paesaggio costiero, non altera le condizioni idrogeologiche delle aree di cava e non ha sfavorevoli ripercussioni sul regime dei litorali adiacenti; vanno tuttavia valutati con cura i danni alla vita sottomarina che potrebbero essere causati dal prelievo.

Per quanto riguarda i sistemi di dragaggio e di messa in opera, questo tipo applicazione dispone di una tecnologia collaudata ed affidabile basata sull'uso di draghe aspiranti-refluenti installate su navi particolarmente attrezzate. La mobilitazione di tali mezzi tuttavia ha costi molto elevati ed il loro uso si giustifica solo per progetti che coinvolgano grandi quantità di materiale e notevoli risorse economiche.

Il problema principale è comunque costituito dalla necessità di reperire consistenti quantità di materiale sabbioso con granulometria accettabile ed a profondità sicuramente non interessate da fenomeni di trasporto da parte del moto ondoso (oltre -15 m s.l.m.m.). Lo strumento principale per individuare, mappare e quantificare i possibili giacimenti di inerti sul fondo (e sottofondo marino) è rappresentato dalle prospezioni sismiche a riflessione ad alta risoluzione che forniscono informazioni sulla stratigrafia del fondo, che sarà poi possibile

verificare e dettagliare con campionamenti diretti e altre analisi. Le zone più interessanti per caratteristiche di posizionamento (battente d'acqua limitato a 50-60 m e copertura pelitica tra 0 e 3 m), qualità (caratteristiche granulometriche delle sabbie adatte al ripascimento, spessori del banco consistenti e comunque cubature complessive di prelievo superiori ai 500.000 m<sup>3</sup>) e relativa vicinanza rispetto alla costa, rappresentano le possibili cave di approvvigionamento di materiale sabbioso. Tuttavia le continue innovazioni in materia di mezzi draganti, consentono di poter spingere il campo di indagine anche su fondali profondi. Si deve poi verificare tramite campionamenti diretti sul fondo, la qualità, consistenza e posizione effettiva dei giacimenti.

#### *16.4.5.2 Riciclo ed i dragaggi portuali*

La perdita globale di materiale sabbioso delle spiagge è dovuta al trasporto causato dalle correnti dalla terraferma verso il fondo marino, sembra naturale immaginare un riciclo del materiale sottratto dal mare. Poiché, come è stato descritto sopra, le correnti longitudinali spostano lungo i litorali il materiale sabbioso mentre le correnti trasversali lo sottraggono in maniera definitiva, il migliore posto per la captazione del materiale sabbioso sembrerebbe essere quello situato all'inizio del suo tragitto verso il fondo, in particolare nelle zone dove esso viene accumulato dalle correnti trasversali. In realtà questa procedura di semplice riciclo - pure talvolta praticata in maniera più o meno lecita - trova una serie di ostacoli, sia di carattere normativo, sia di carattere tecnico, poiché solo una dettagliatissima conoscenza dei processi di trasporto in una determinata area permetterebbe di effettuare questo riciclo senza conseguenze negative.

Una forma di riutilizzo più semplice e sicura è quella che si limita al riutilizzo del materiale accumulato soprafflutto ai moli ed alle altre opere artificiali; in questo caso l'impatto ambientale è nullo - si tratta semplicemente di ridurre l'effetto di un'opera artificiale- ed anche le necessità di indagini preliminari sono ridotte poiché il materiale è nella maggior parte dei casi emerso e facilmente accessibile. Caso limite di questo riciclo è l'impiego della sabbia che si deposita alle imboccature dei porti, in questo caso bisogna fare particolare attenzione alla qualità fisico-chimica del materiale, per cui la normativa prescrive un programma di campionamento e analisi chimiche e microbiologiche dei sedimenti (il riferimento normativo è il D.M. 24 gennaio 1996 *“Direttive inerenti le attività istruttorie per il rilascio delle autorizzazioni di cui all'art.11 della legge 10 maggio 1976, n. 319, e successive modifiche ed integrazioni relative allo scarico nelle acque del mare o in ambienti marini o salmastri o di terreni emersi, nonché da ogni altra movimentazione di sedimenti in ambiente marino”*).

La metodologia impiegata per la ricostruzione degli arenili con sabbia prelevata dai porti presenta le stesse caratteristiche dei ripascimenti effettuati con sabbia proveniente da cave marine, senza tuttavia l'onere di particolari verifiche di convenienza economica sul costo delle operazioni in quanto gli scavi sono comunque considerati interventi dovuti; il principale limite di tale pratica è però nella granulometria delle sabbie che normalmente è troppo bassa e che quindi è maggiormente soggetta ad erosione e può causare effetti sgradevoli dal punto di vista ambientale e balneare.

#### *16.4.5.3 Altre fonti*

Il ripascimento delle spiagge richiede quantitativi così ingenti di materiale sabbioso da far risultare spesso sconveniente l'uso di cave terrestri sia per i prezzi, sia per tempi di lavorazione, sia infine per il notevole impatto ambientale del trasporto gommatato. Tuttavia si profilano occasionalmente opportunità che vanno colte in quanto sinergiche ed in definitiva economiche. E' il caso per esempio di importanti lavori di scavo presso cantieri limitrofi alla costa che possono consentire attività di ripascimento ad ottime condizioni. Questo genere di fonti per il materiale sabbioso non può presentare carattere di sistematicità e quindi non si presta ad una pianificazione. Un'altra possibilità potrebbe essere l'impiego del materiale accumulato nei bacini artificiali sottesi dalle dighe; tale materiale però, oltre ad essere ricco di sostanze fini, non si presta al trasporto con mezzi se non ad alti costi.



#### 16.5 Soluzioni miste

E' opportuno qui sottolineare come le tipologie di interventi per la protezione dall'erosione costiera sopradescritti (pennelli, frangiflutti, barriere soffolte, ripascimento artificiale) possano essere considerati in soluzioni miste, in cui si sfruttano sinergicamente i benefici delle singole tipologie.

Negli ultimi anni, in Sicilia, si è diffusa la pratica di realizzare ripascimenti protetti al piede da barriera soffolta. In questo caso la vita utile dell'intervento di ripascimento della spiaggia viene allungata, poiché la presenza della barriera soffolta consente di dissipare le onde più alte, ovvero quelle responsabili di un trasporto di materiale verso il largo.

D'altro canto sulla riviera adriatica e su quella tirrenica, si sono diffusi largamente negli anni passati interventi compositi, costituiti da barriere collegate alla spiaggia preesistente da pennelli trasversali, parte emersi, parte sommersi, tali da formare delle vere e proprie celle. Questo ultimo tipo di intervento tuttavia ha dato luogo a problemi di carattere ambientale (es. scarsa circolazione all'interno della cella), per cui si va sempre più affermando la necessità di interventi di rinaturalizzazione dei siti.

#### 16.6 Naturalizzazione e stabilizzazione delle dune

Le dune rappresentano una protezione a lungo termine contro l'erosione costiera, in quanto forniscono una adeguata protezione dell'entroterra da eventuali allagamenti, mentre costituiscono un serbatoio di sabbia per la spiaggia, soprattutto in situazioni critiche quali quelle che si realizzano durante le mareggiate, in cui il materiale viene eroso dalla duna a favore della spiaggia. Nelle condizioni di normalità (cioè di equilibrio dinamico della spiaggia), l'azione del vento provvederà a ricostituire la duna, mentre quella del moto ondoso provvederà a ripascere la spiaggia.

Purtroppo la gestione delle dune è stata spesso dissennata, e ciò al fine di favorire la fruizione anche visiva della spiaggia (costruzione di alberghi, passeggiate a mare, parcheggi e soprattutto vie di comunicazione). E' possibile però cercare di invertire la tendenza, rinaturalizzando il sistema dunale, al fine di incoraggiare il positivo feedback spiaggia-duna. Innanzitutto bisogna garantire che la vegetazione autoctona ricopra la duna, al fine di fissare la sabbia (erbacee) e rappresentare una protezione per la duna stessa (arbustive, quali ginepro, olivello spinoso). Infatti la copertura vegetale consente di diminuire la velocità del vento in prossimità della superficie della duna, e conseguentemente di prevenire perdite di sabbia verso terra.

Per preservare la delicata vegetazione dunale, è necessario vietare categoricamente ogni forma di traffico sulla duna e riservare percorsi pedonali opportunamente protetti per l'attraversamento della duna.

La crescita e la stabilizzazione della duna può essere incentivata anche dall'utilizzo di palizzate parallele alla spiaggia, in modo da rappresentare degli ostacoli che consentano il deposito della sabbia dietro ad esse.

E' possibile anche costruire delle dune artificiali accoppiate ad opportuni interventi di ripascimento. Tali sistemi, da intendersi più come operazioni di manutenzione che come interventi definitivi, possono rappresentare un'alternativa alla costruzione di muri a mare, che riflettono il moto ondoso e non rappresentano sorgenti di sedimento per il ripristino della spiaggia. Si tratta di una protezione "soft", che ha anche l'indubbio vantaggio di fornire spazi fruibili per l'uso ricreativo dei litorali.