

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

Generalità

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

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

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

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



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

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

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



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



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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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



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



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



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



Generalità

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

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

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

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

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

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

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



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

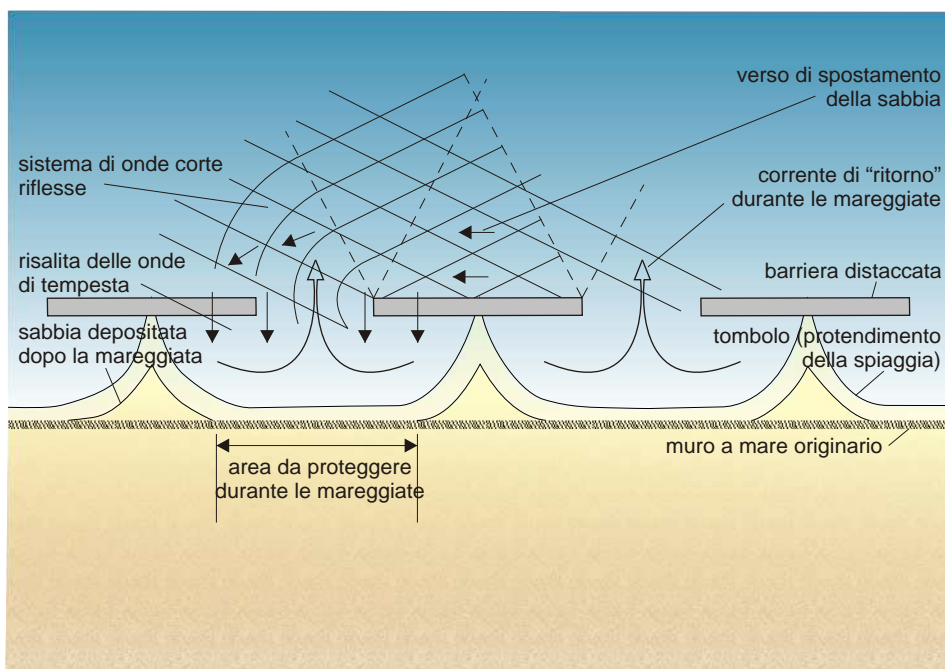


Figura 4.1.3: Schema degli effetti derivanti dalla costruzione di barriere. La configurazione, la spaziatura regolare e la distanza dalla costa consentono a queste opere di controllare l'erosione mediante la creazione di zone concave nei tratti di costa tra un frangiflutti e l'altro, e la formazione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

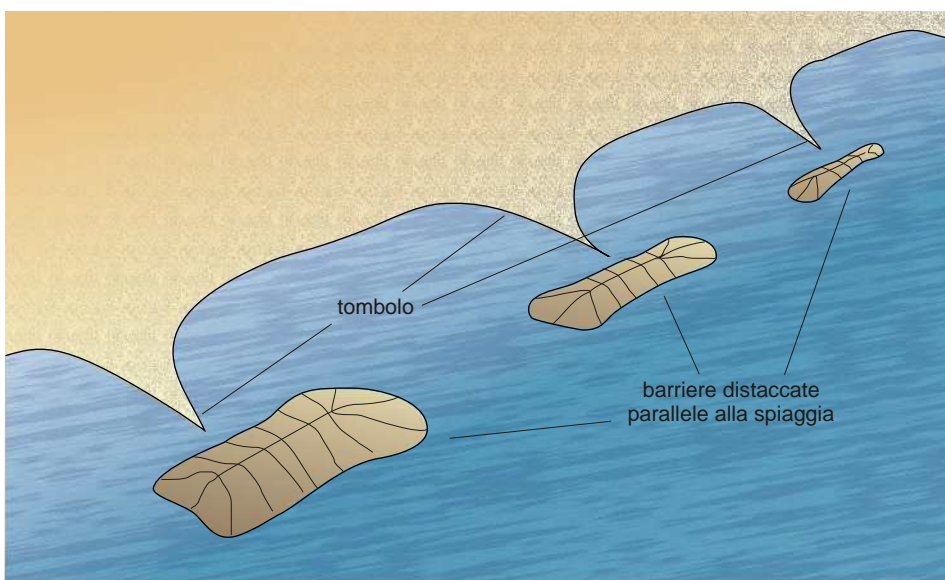
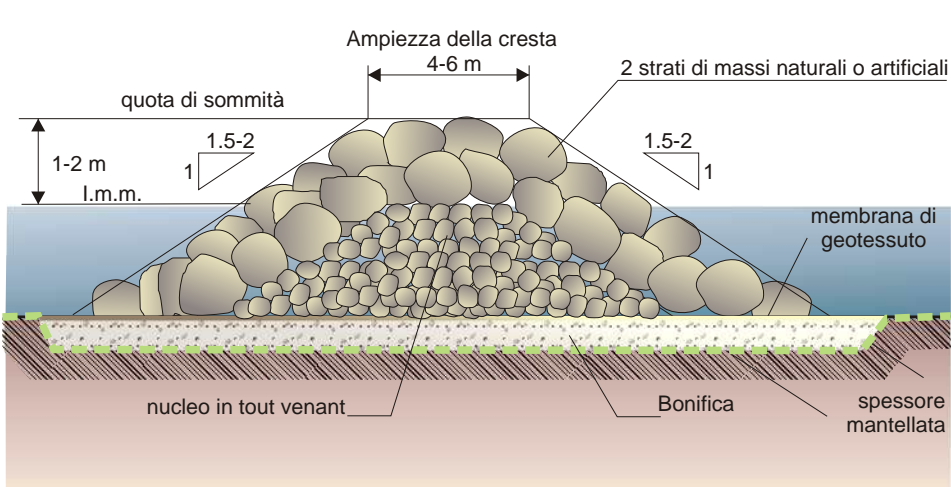


Figura 4.1.4: Una barriera frangiflutti distaccata dalla spiaggia è una struttura fissa, costituita da una fondazione stabile (imbasamento), da un nucleo in tout-venant e da uno strato esterno protettivo caratterizzato da massi naturali o unità in calcestruzzo.



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

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

Le barriere possono essere distinte secondo due principali tipologie:

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

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

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

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



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



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



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

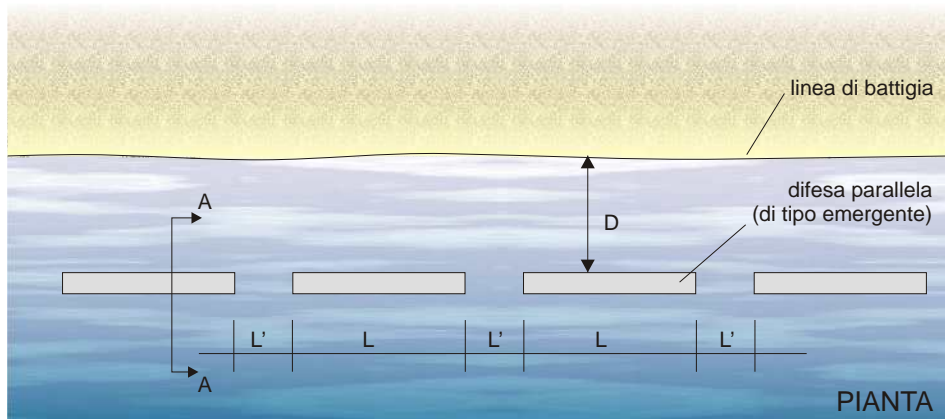


Barriere emergenti

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

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

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



LEGENDA

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

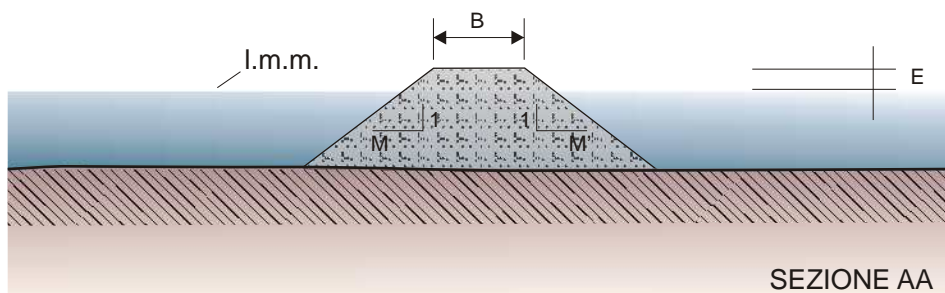


Figura 4.1.10: Roma, Comune di Fiumicino. Barriere emergenti inclinate verso la direzione della corrente litoranea prevalente. Questo tipo di opere, molto impiegato negli anni '60-'80 sul litorale laziale, viene realizzato allo scopo di contrastare l'azione diretta del moto ondoso e di favorire la formazione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



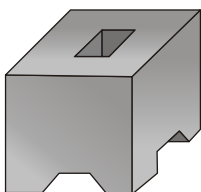
Barriere con blocchi artificiali

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

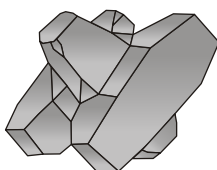
Per queste strutture frangiflutti, le forme di blocchi più utilizzate per lo strato esterno sono il tetrapodo, il dolos, il cubo classico o il parallelepipedo.

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

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



cubo modificato



accropodo



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

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



Barriere in massi naturali

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

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

Legenda:

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

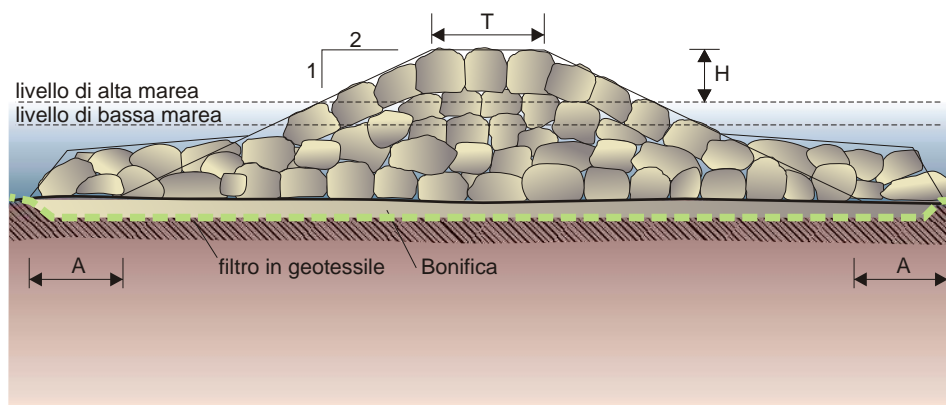


Figura 4.1.14: Barriera frangiflutti in massi di cava. Il suo scopo principale è quello di intercettare le onde, dissipandone l'energia prima che colpiscano la costa. Nella zona di calma presente sul lato terra, se il rapporto tra larghezza del varco e distanza dalla battigia è stato ben calcolato, si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



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

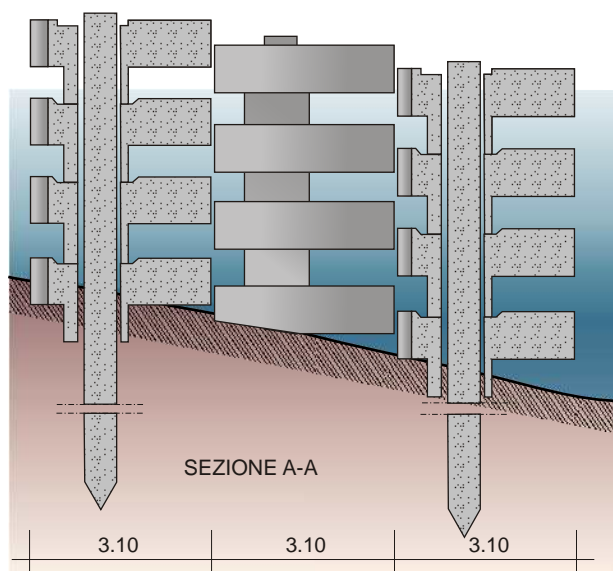
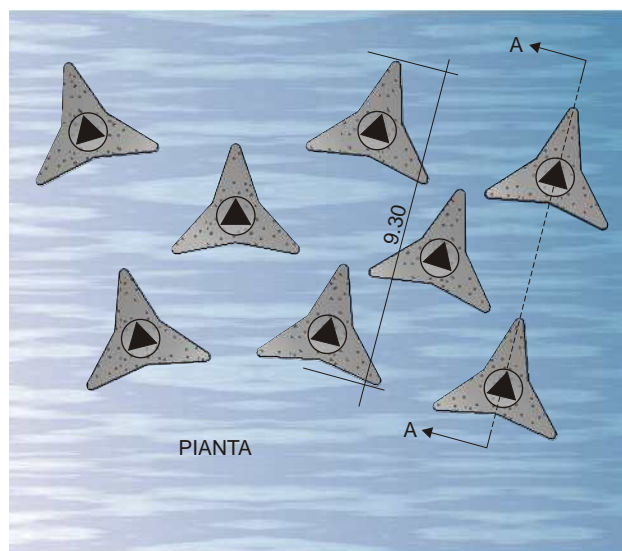


Descrizione e caratteristiche

Barriere Ferran

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

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



Descrizione e caratteristiche

Barriere semipermeabili a pali

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

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

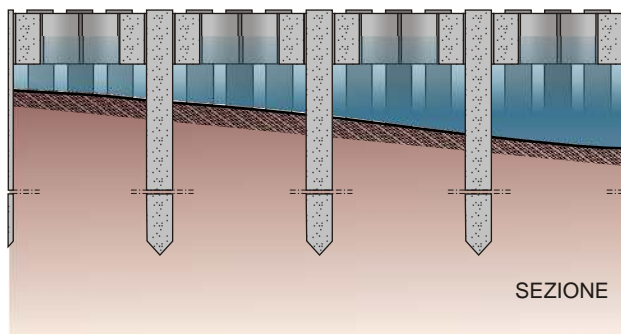
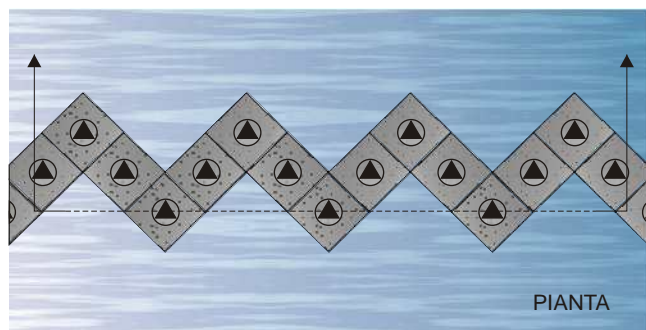


Figura 4.1.17: Pali disposti a quinconce. Disposizione di pali su tre file sfalsate a formare strutture a pianta semiquadrata, costituite da cinque pali ciascuno.

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

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

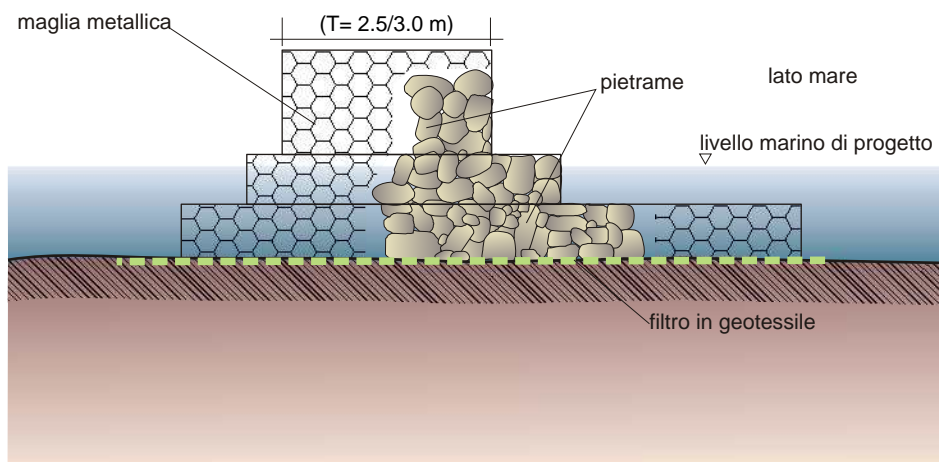
Descrizione e caratteristiche

Barriere con gabbioni

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

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

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



Descrizione e caratteristiche

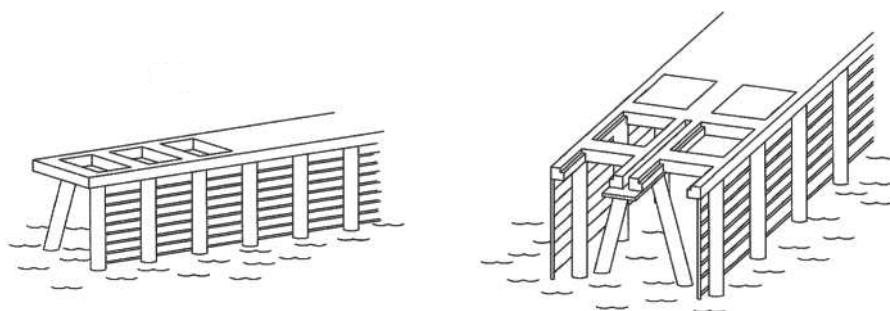
Barriere schermanti

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

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

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

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



Descrizione e caratteristiche

Barriere con Geotubi o Geocontainer

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

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

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

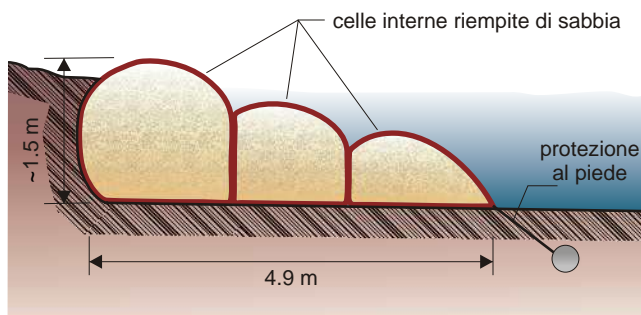


Figura 4.1.21: Barriera con Geocontainers. La struttura è simile a quella con Geotubi, ma le dimensioni degli elementi sono maggiori.

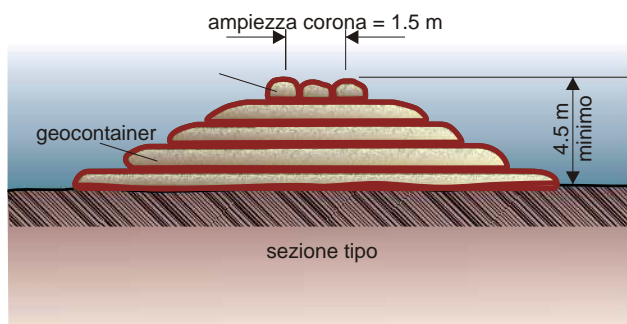


Figura 4.1.22: Barriere con tubi Longard. Un tubo Longard è una struttura con un doppio strato in geotessuto, costituito da polietilene impermeabile, con un diametro di 1-1,8 metri ed una lunghezza di 100 metri. Per il riempimento dell'involucro vengono realizzati due fori di 50 cm di diametro muniti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

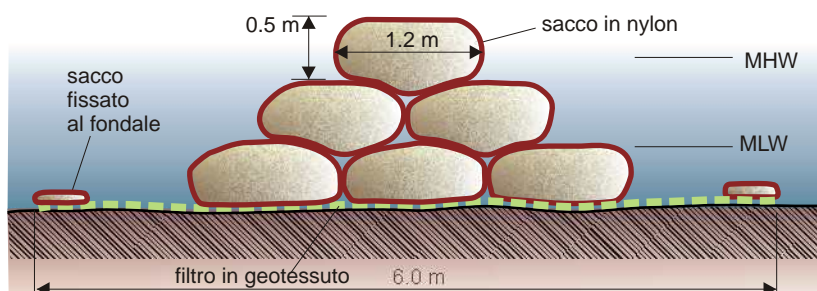


Descrizione e caratteristiche

Barriere con sacchi geotessili

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

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



Barriere galleggianti

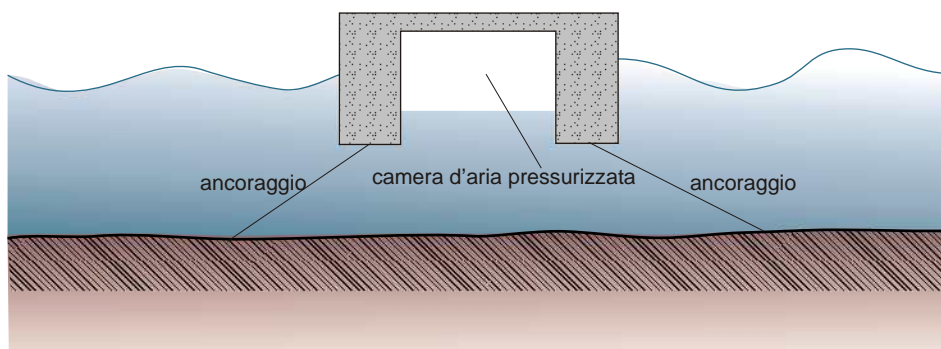
Tra i sistemi non convenzionali di protezione delle coste e dei porti vanno annoverate le barriere galleggianti, che si differenziano da quelle emergenti per non essere poggiate direttamente sul fondale, al quale sono vincolate da catene ed ancoraggi di varia natura.

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

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

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

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



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

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

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

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



Barriere sommerse o soffolte

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

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

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

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

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

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

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

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

Legenda:

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

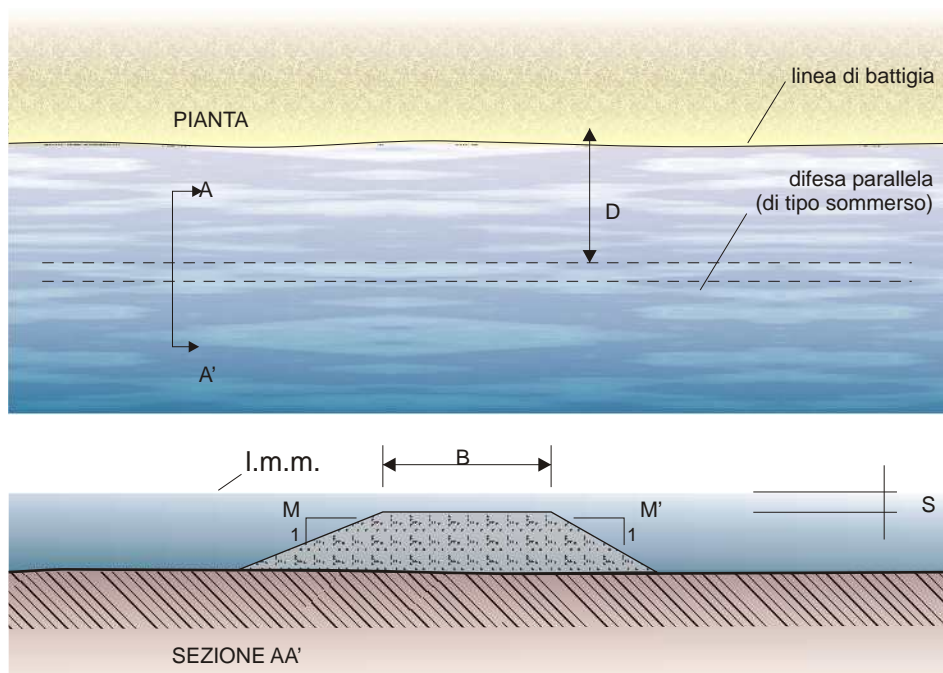


Figura 4.1.27: Schema tipico di una barriera sommersa o soffolta. La funzione principale di quest'opera è quella di diminuire l'intensità del moto ondoso, trattenendo il materiale sabbioso a tergo e rimanendo comunque non visibile.

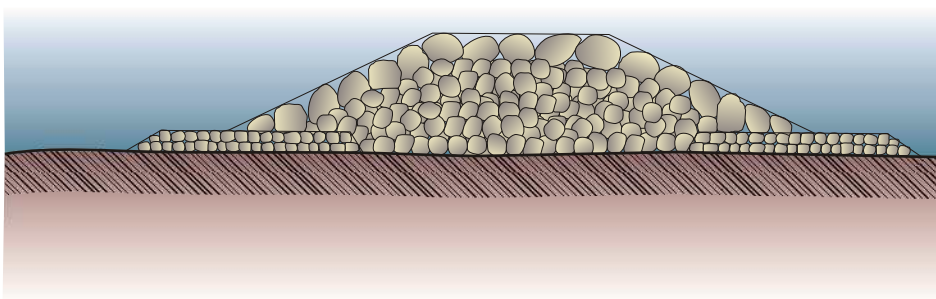


Figura 4.1.28: Barriere sommerse. Le barriere sommerse possono rappresentare un ostacolo per la navigazione e la balneazione, pertanto necessitano di appositi dispositivi di segnalazione.



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



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



Descrizione e caratteristiche

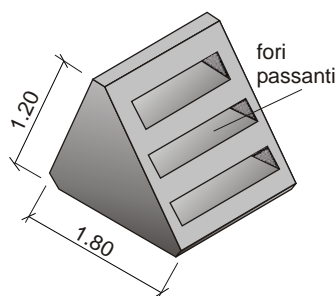
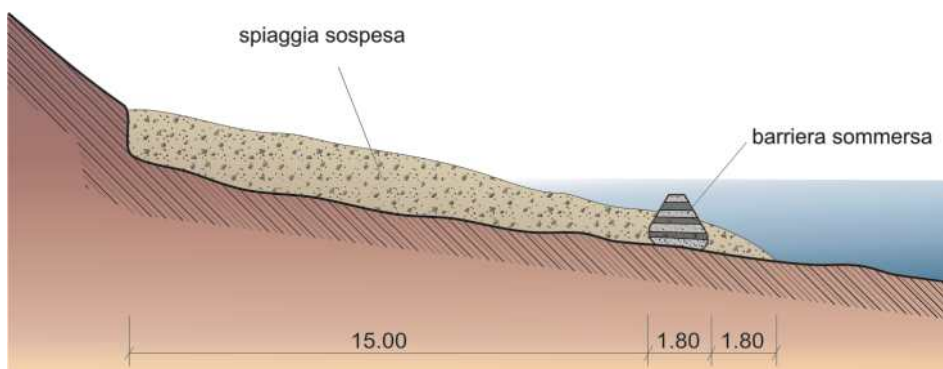


Figura 4.1.31: Elemento modulare Surgebreaker. E' utilizzato per proteggere spiagge naturali ed artificiali con provate caratteristiche di efficacia e durabilità, grazie alla sua capacità di ridurre la riflessione e l'energia ondosa trasmessa.

Barriera sommersa con moduli Surgebreaker

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

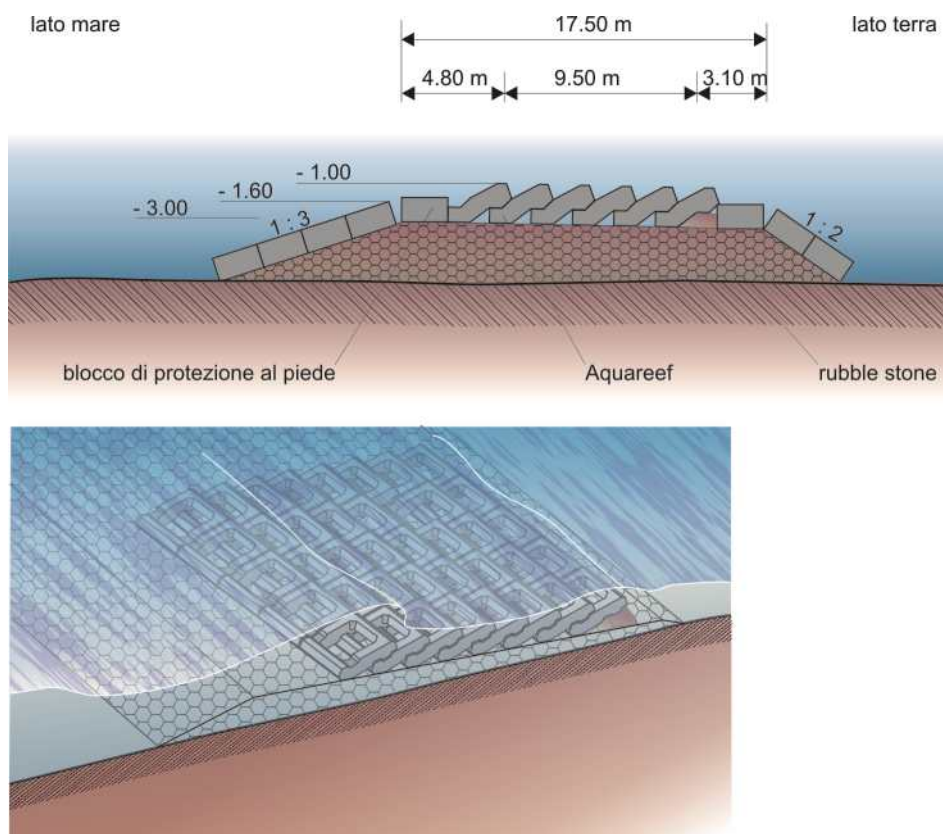


Descrizione e caratteristiche

Barriera con moduli Aqua-Reef (Aqua Blocks)

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

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



Descrizione e caratteristiche

Barriera con modulo prefabbricato Beachsaver Forte

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

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

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

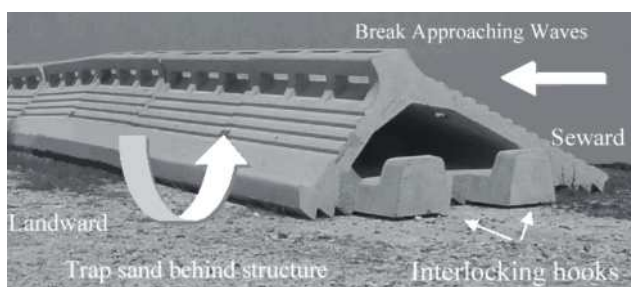


Figura 4.1.33: Modulo "Beachsaver Forte". Il lato mare della struttura è reso scabro dalla presenza di una serie di scanalature orizzontali aventi la funzione di disperdere l'energia dell'onda, mentre il lato terra, grazie alla sua elevata pendenza, consente alla sabbia di restare intrappolata dietro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

Descrizione e caratteristiche

Barriera a cassone

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

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

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

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



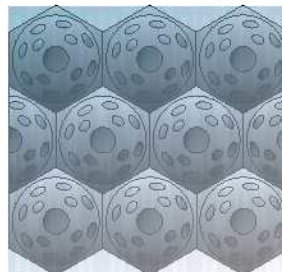
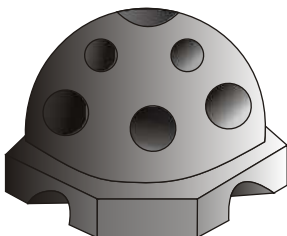
Generalità

Scogliere artificiali sommerse

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

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

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



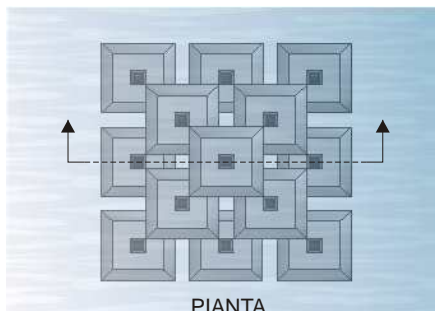
Descrizione e caratteristiche

Barriera sommersa con moduli Nettuno-Acquatecno

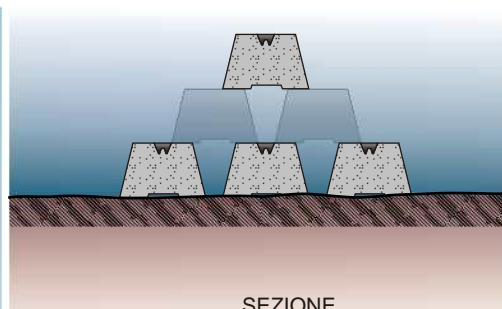
La struttura con moduli Nettuno-Acquatecno è caratterizzata da blocchi troncopiramidali di calcestruzzo, di dimensioni di 2,4 m x 2,4 m x 1,5 m, che presentano alveoli e cavità passanti.

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

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



PIANTA



SEZIONE

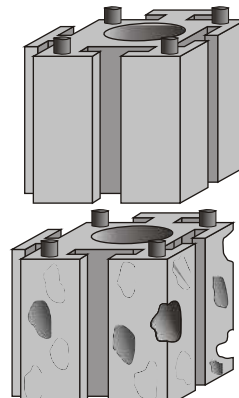
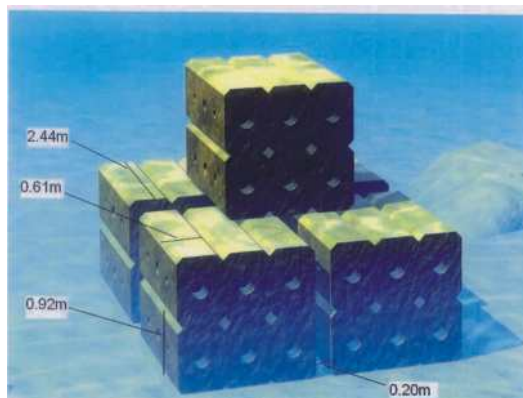
Descrizione e caratteristiche

Barriere con Reef Blocks

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

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

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



Descrizione e caratteristiche



Reef Balls

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

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

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

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

Descrizione e caratteristiche

Electrochemical Reef

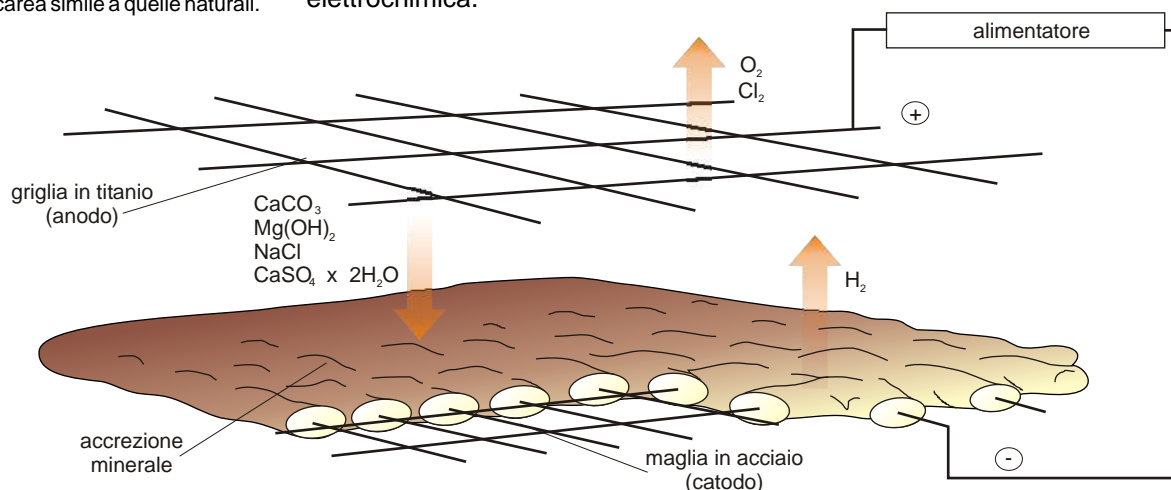
Tali strutture, utilizzate in acque poco profonde, oltre alla protezione della costa nei confronti dell'erosione, assicurano una funzione ecologica ed ambientale, favorendo la formazione di una vera e propria scogliera. In particolare, la tecnica di costruzione mediante elettrolisi consente di usare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

I vantaggi di tali strutture realizzate per via elettrochimica sono:

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

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

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



Generalità

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

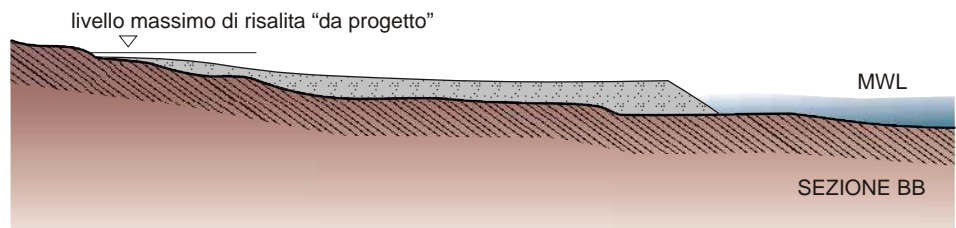
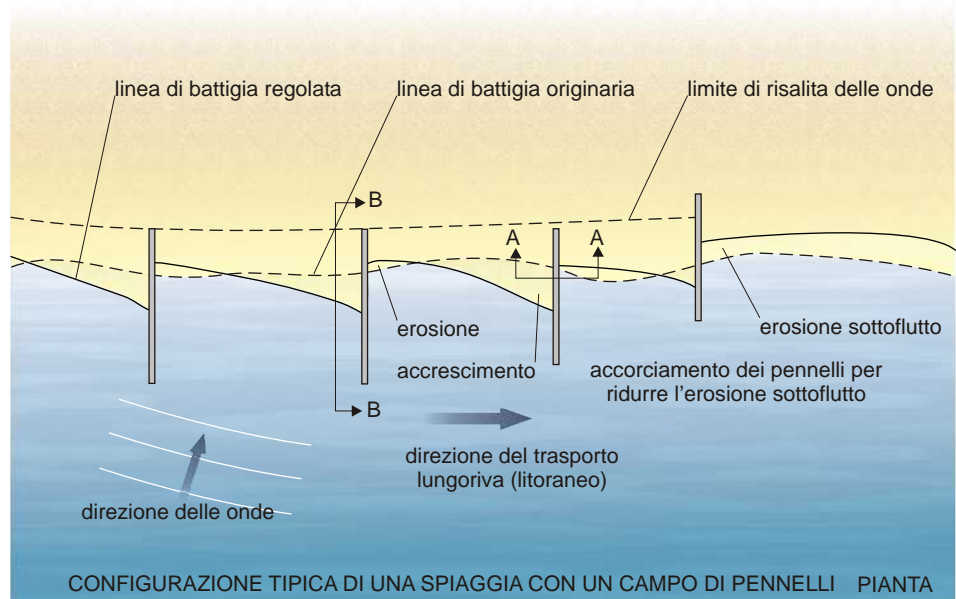
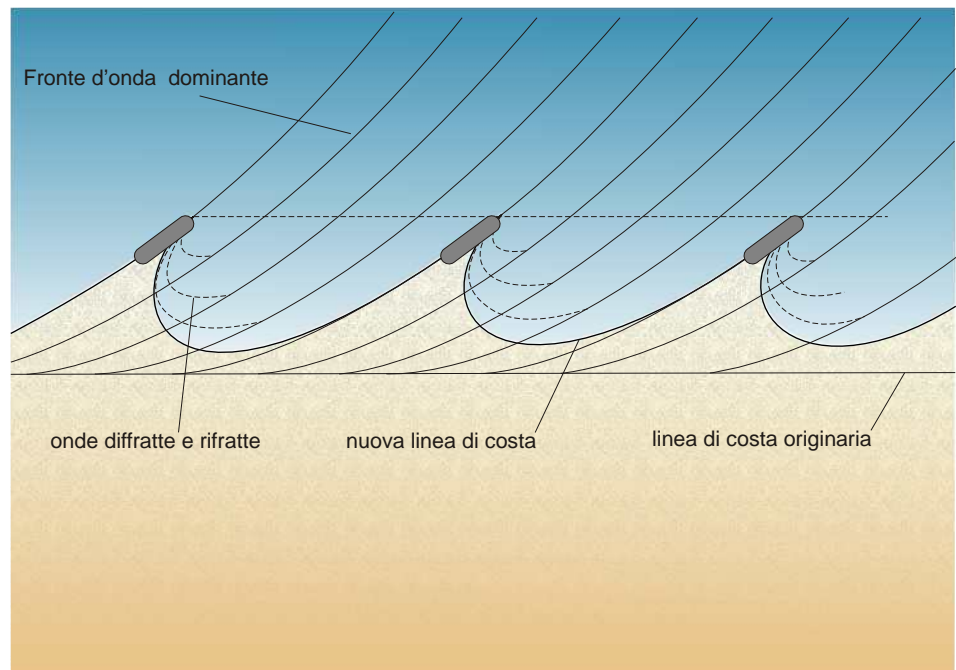


Figura 4.2.3: Esempio schematico di modifica della direzione della linea di spiaggia dopo la realizzazione di headlands. La struttura è localizzata a distanza dalla costa in posizione tale da favorire la formazione di un tombolo. Sul lato di sottoflutto della struttura, le onde diffratte e rifratte potranno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



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

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

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

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

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



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



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



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

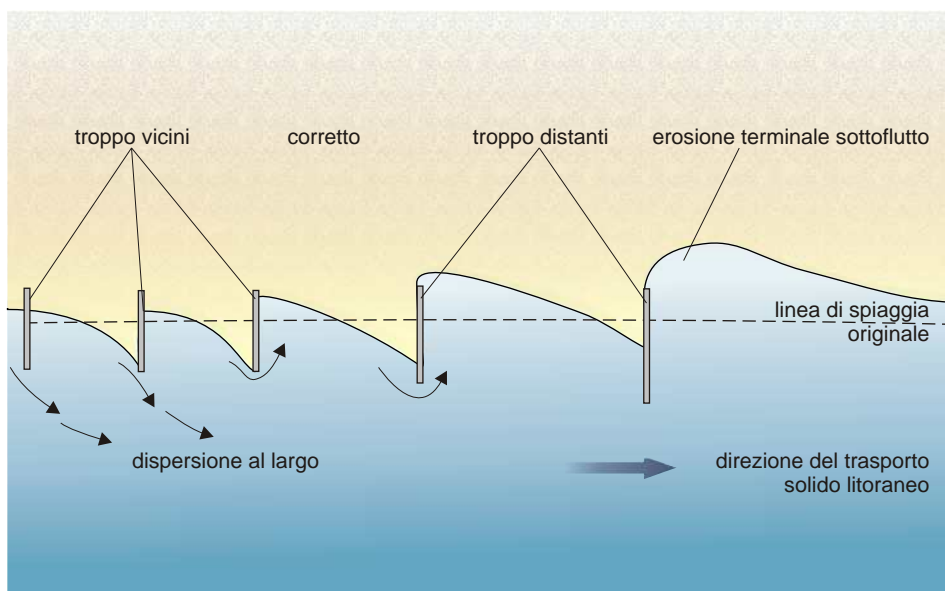


Figura 4.2.8: Ladispoli (Roma). Campo di pennelli a protezione del litorale. Quando la difesa costiera è costituita da un sistema di pennelli, la costruzione deve iniziare dal primo pennello lato sottoflutto, per poi proseguire in successione, verso il lato sopraflutto, dando il tempo ai sedimenti di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



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



Pennelli impermeabili

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

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

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

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

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

Descrizione e caratteristiche

Pennelli in massi naturali con nucleo in tout-venant

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

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

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



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



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

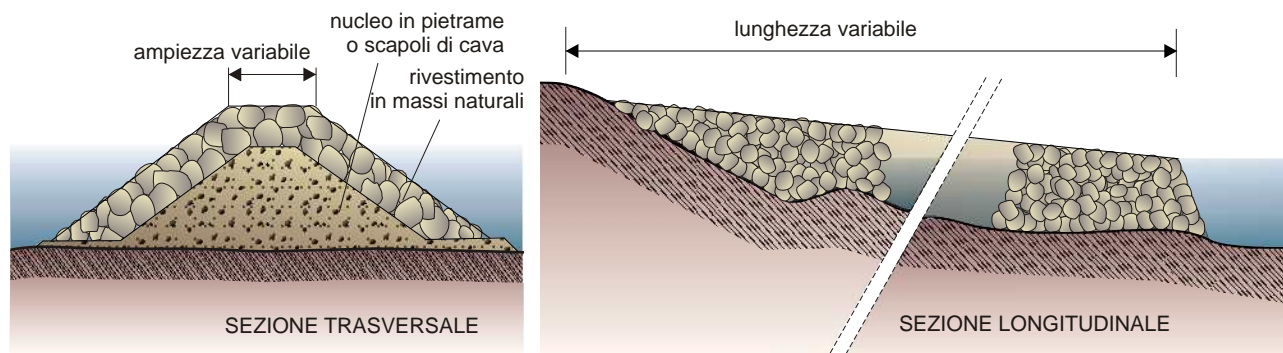
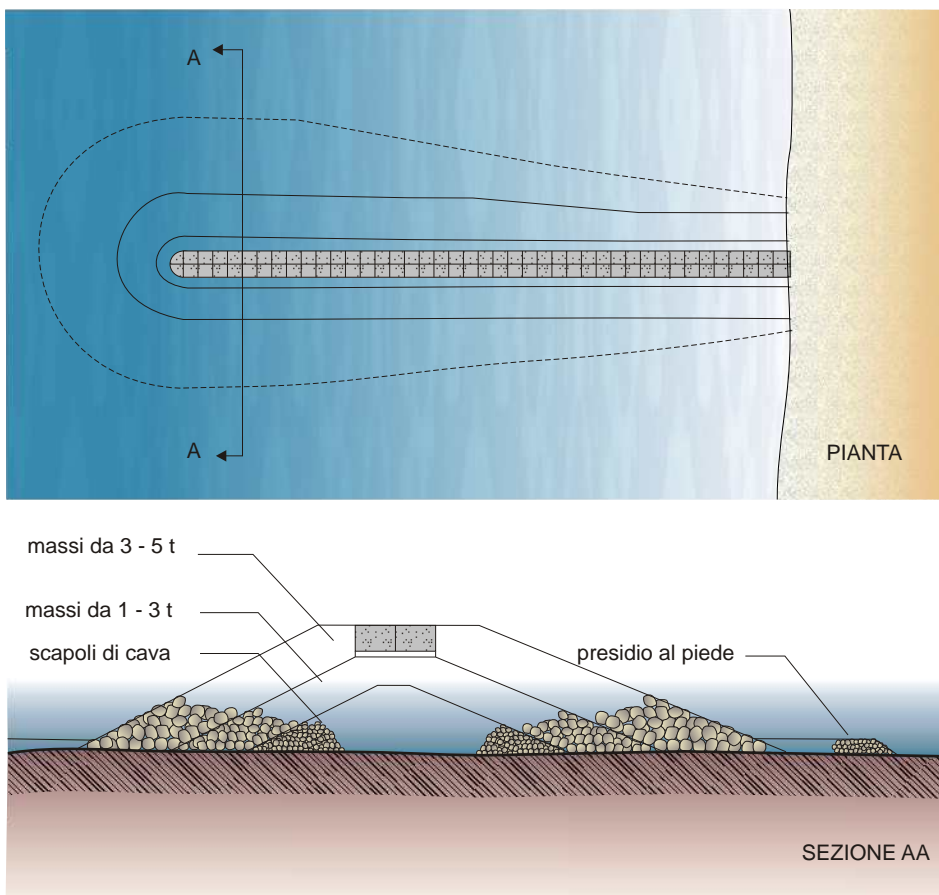


Figura 4.2.13: Sanremo. Pennello multistrato in massi naturali. Viene realizzato in paraggi esposti ad onde violente e con correnti di elevata intensità e capacità di trasporto. Tra la mantellata ed il nucleo è presente uno strato filtro intermedio. Tale strato impedisce l'asportazione del materiale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



Descrizione e caratteristiche

Pennelli in legno trattato

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

Sono indicati per spiagge che necessitino di una rapida protezione.

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

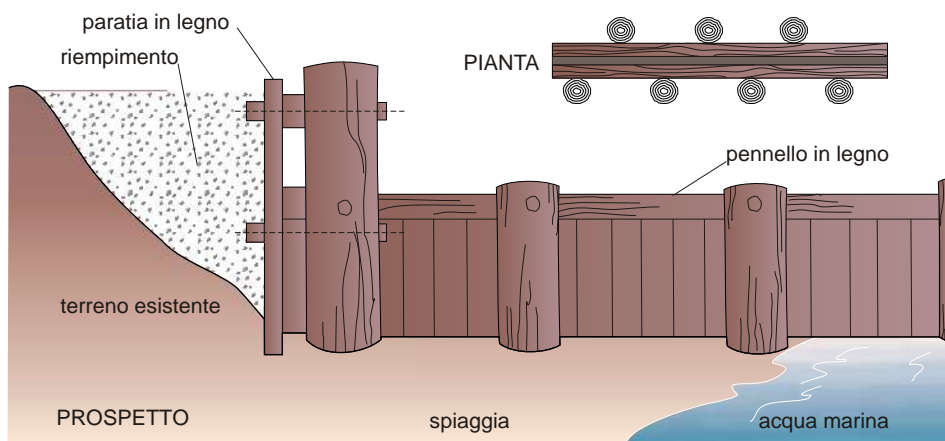


Figura 4.2.14: Pennello impermeabile con tavole e pali in legno trattati. Questo tipo di struttura è indicato per paraggi non soggetti a forte ondatazione e necessita di una buona infissione degli elementi nella sabbia e di un buon trattamento impermeabilizzante per il legname.

Descrizione e caratteristiche

Pennelli crib

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

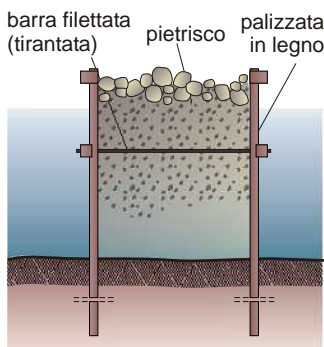


Figura 4.2.15: Pennello crib. I pali sono posizionati ad una certa distanza, in modo da formare una struttura di alloggiamento per vari materiali di riempimento.

Descrizione e caratteristiche

Pennelli con tubi Longard

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

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



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

Pennelli permeabili

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

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

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

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

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

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

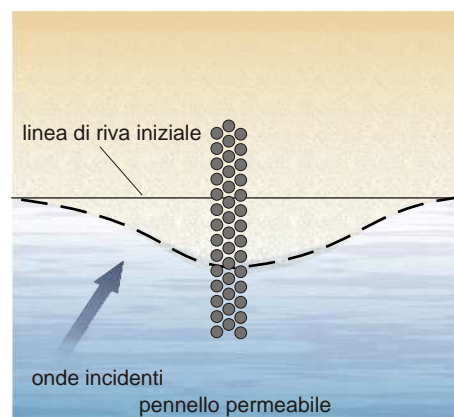
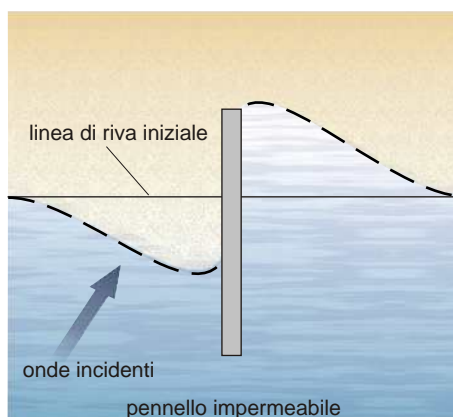
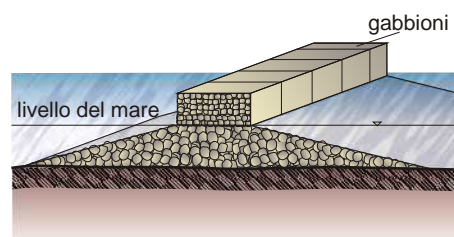


Figura 4.2.18: Pennello con palizzata in legname. L'utilizzo di una semplice struttura in legno, fa sì che grazie alla sua permeabilità non avvenga il fenomeno di dentellatura della linea di costa, con la formazione di un profilo costiero omogeneo, sia a monte che a valle dell'opera. Le strutture, una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



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

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



Pennelli sommersi

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

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

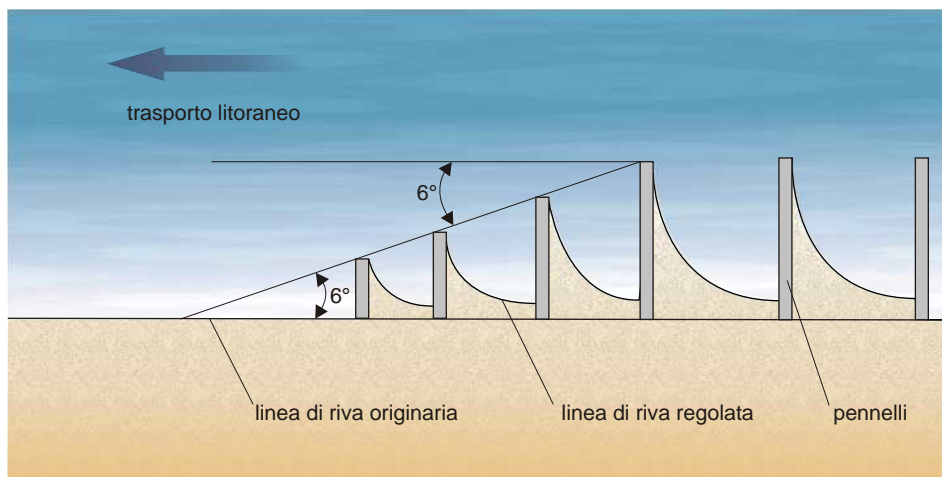
Talvolta, vengono impiegati in combinazione con barriere parallele (emergenti o sommerse) per realizzare ripascimenti protetti, oppure possono costituire un prolungamento sommerso di pennelli emersi.

Pennelli di transizione

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

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

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

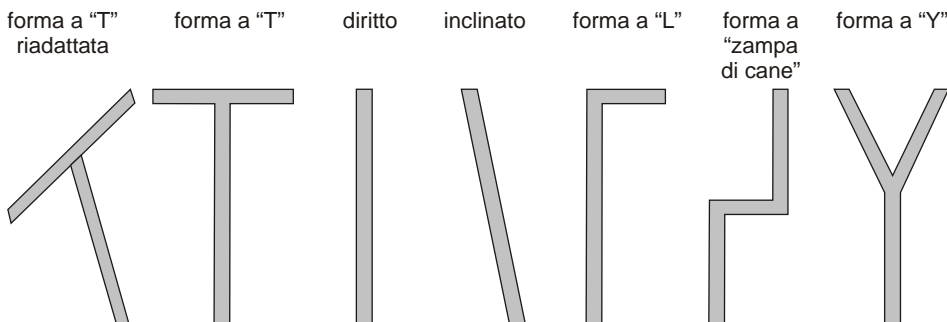


Pennelli compositi

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

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

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



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

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

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

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

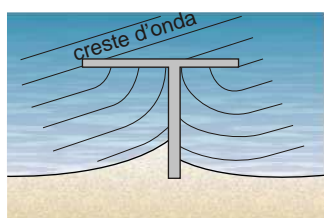


Figura 4.2.22: Pennello asimmetrico a T. In questo caso lo sperone più lungo viene costruito sul lato esposto al fronte d'onda principale, in modo da ridurre l'erosione della spiaggia sopraflutto.

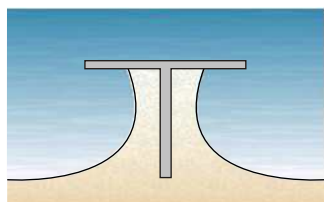


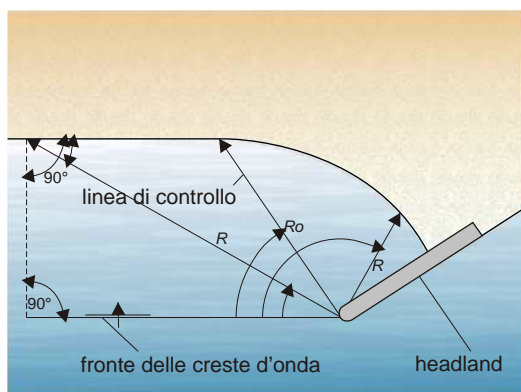
Figura 4.2.23: Schema di pennello a T. Gli elementi paralleli alla riva (speroni) riparano la spiaggia locale sottovento, incrementando l'accumulo di sedimenti. La conseguente accrezione dietro la struttura riduce anche l'altezza dell'onda e di conseguenza anche la sua ripidità. Pertanto, con l'approssimarsi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

Headlands

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

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

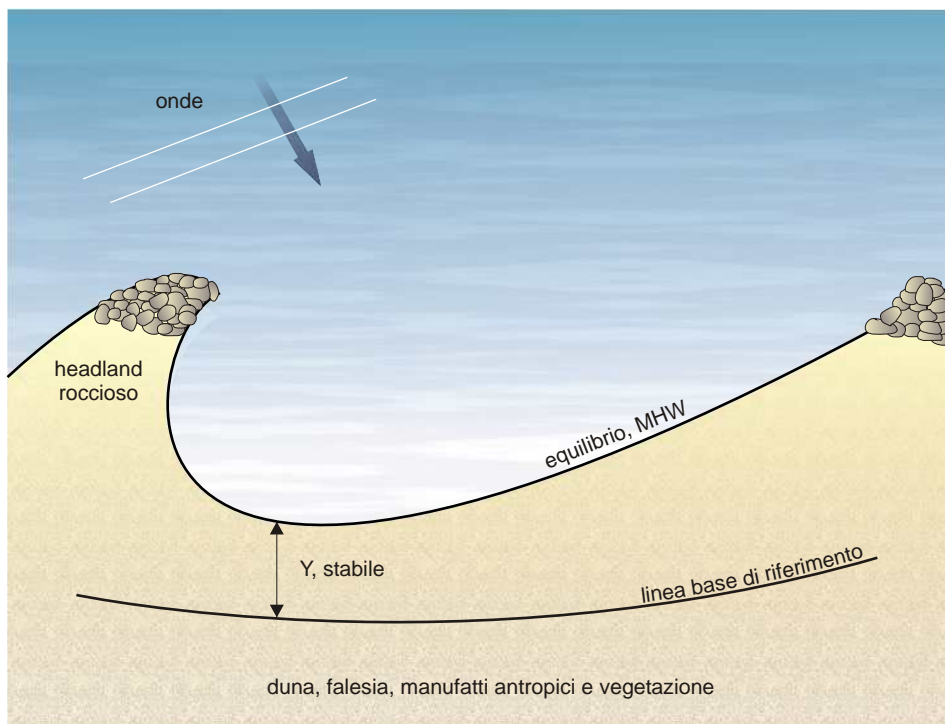
Figura 4.2.23: Parametri caratteristici nell'impostazione di headlands.



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

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

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



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

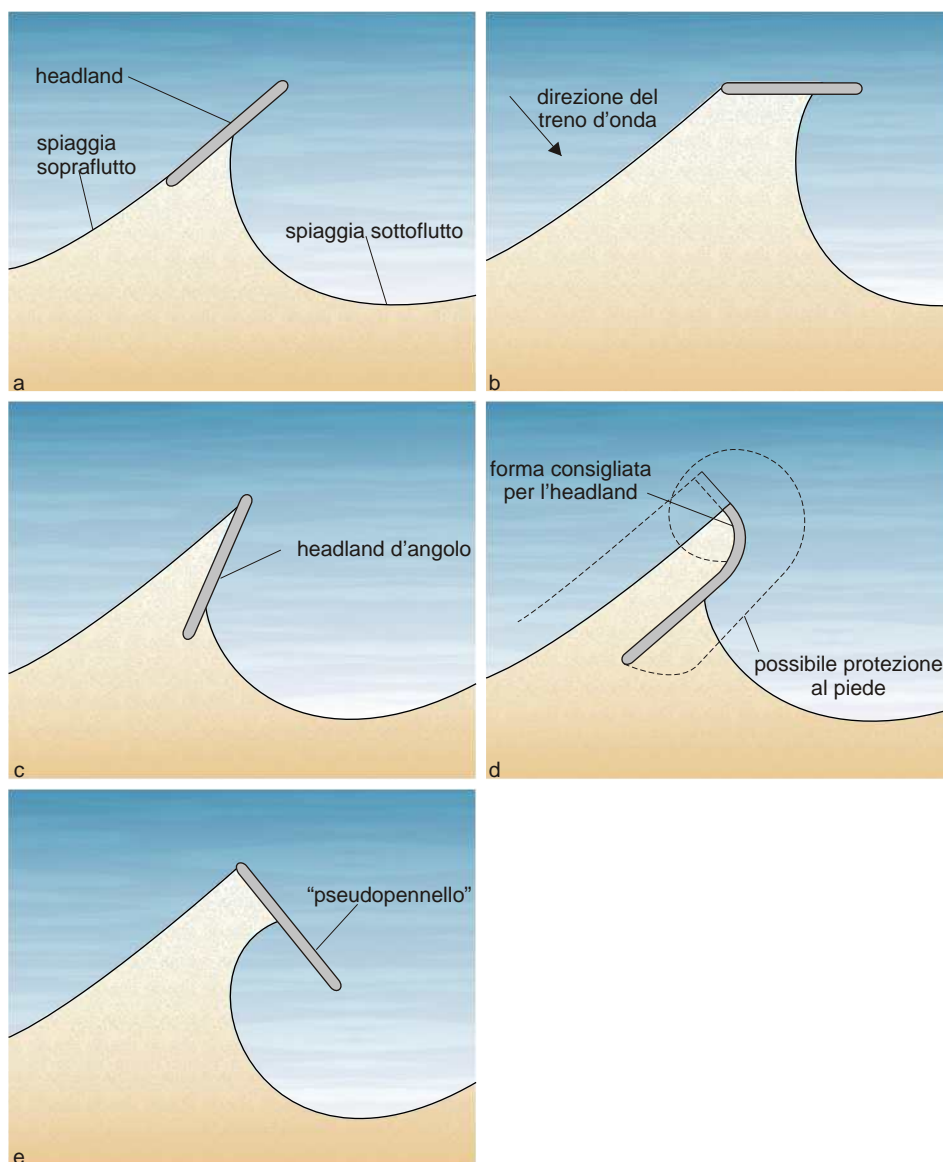


Figura 4.2.25: Tipi di headlands e loro orientazione.

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

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

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

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

Generalità

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

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

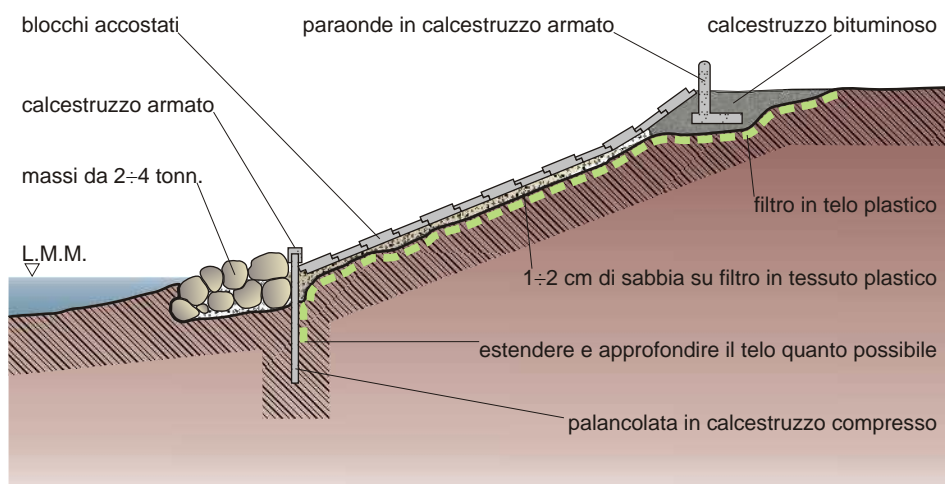
Le opere aderenti possono essere classificate secondo le seguenti tipologie:

- Rivestimenti
- Scogliere radenti
- Muri
- Paratie
- Argini

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



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



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

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

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

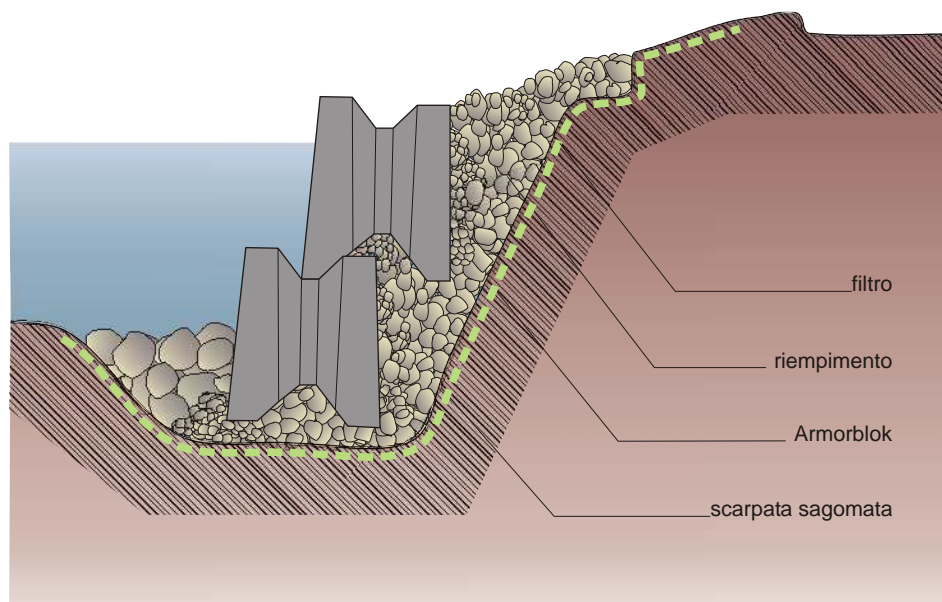
Le paratie hanno una funzione simile ai muri e sono costituite da elementi verticali di piccolo spessore, prive di fondazioni, inserite nel terreno e spesso dotate di tiranti. Essendo disposte verticalmente non permettono alle onde di dissipare energia, ma piuttosto favoriscono la loro riflessione.

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

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

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

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



Rivestimenti

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

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

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

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

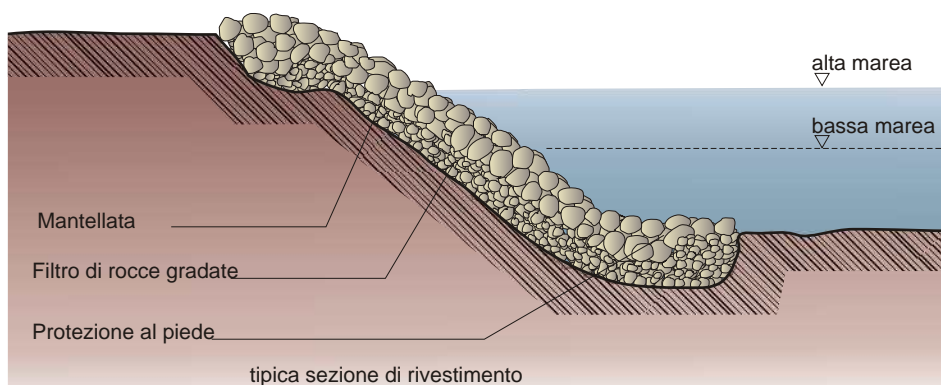


Figura 4.3.5: I rivestimenti possono essere progettati in combinazione con altre opere di difesa costiera, quali scogliere e moli, in corrispondenza di aree portuali o urbanizzate. I versamenti di pietrame da terra contribuiscono a rafforzare la capacità di resistenza all'attacco ondoso e a mitigare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



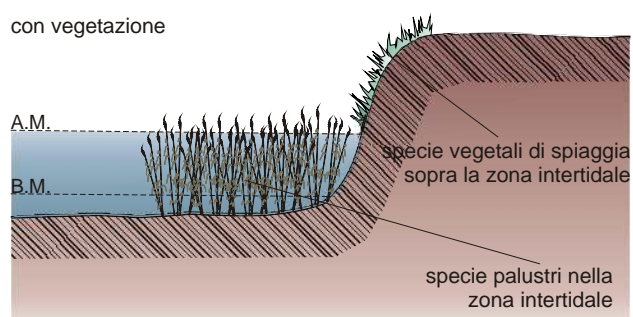
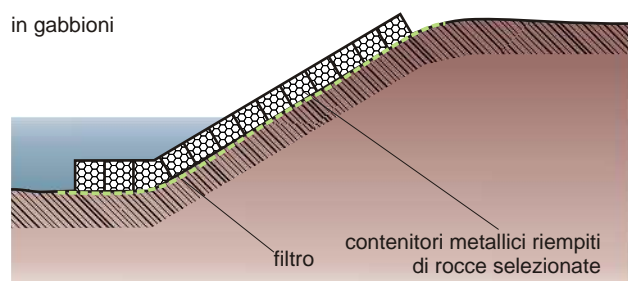
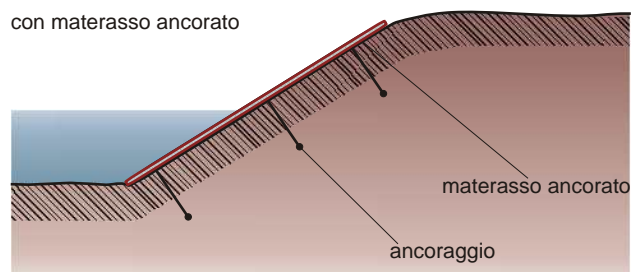
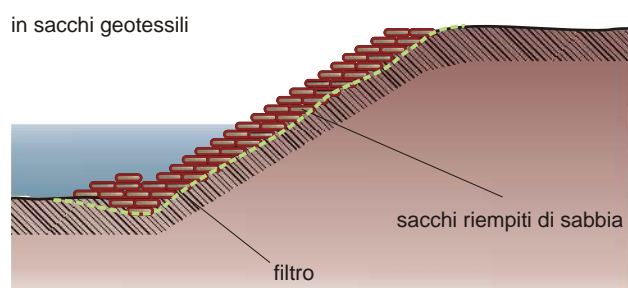
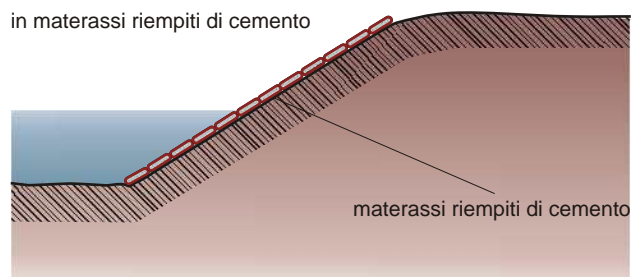
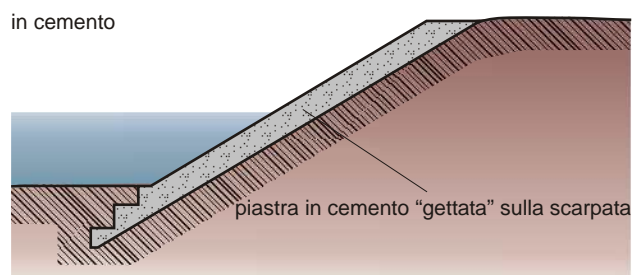
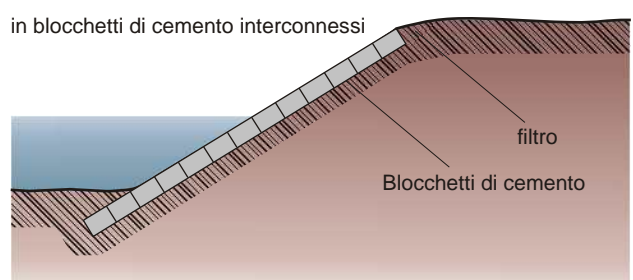
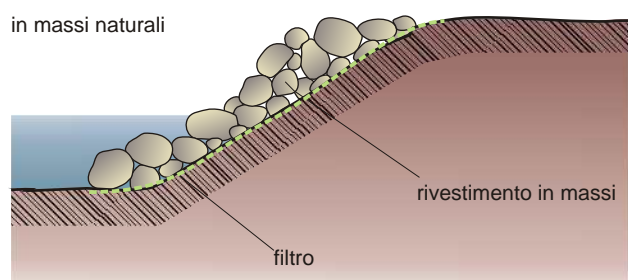
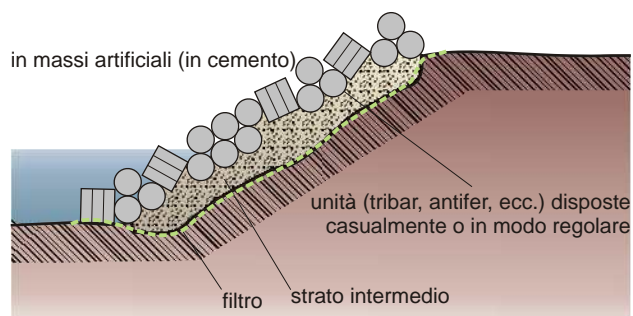
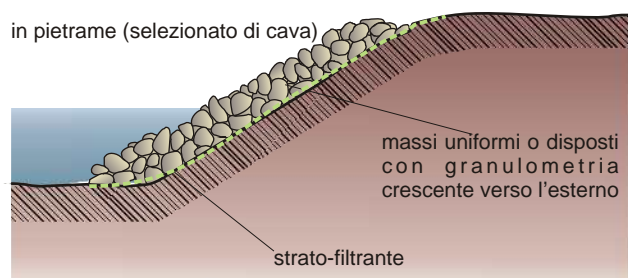


Figura 4.3.6: Tipi di rivestimento. L'estremità inferiore del rivestimento dovrebbe sempre essere sepolta al di sotto del fondale per evitare problemi di scalzamento alla base; inoltre è opportuno disporre un filtro tra i massi di protezione e il terreno della scarpata, per prevenire cedimenti differenziali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

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

Rivestimenti in elementi naturali
Rivestimenti in elementi artificiali

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

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

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

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



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



Riprap o Rivestimenti in pietrame

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

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

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

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

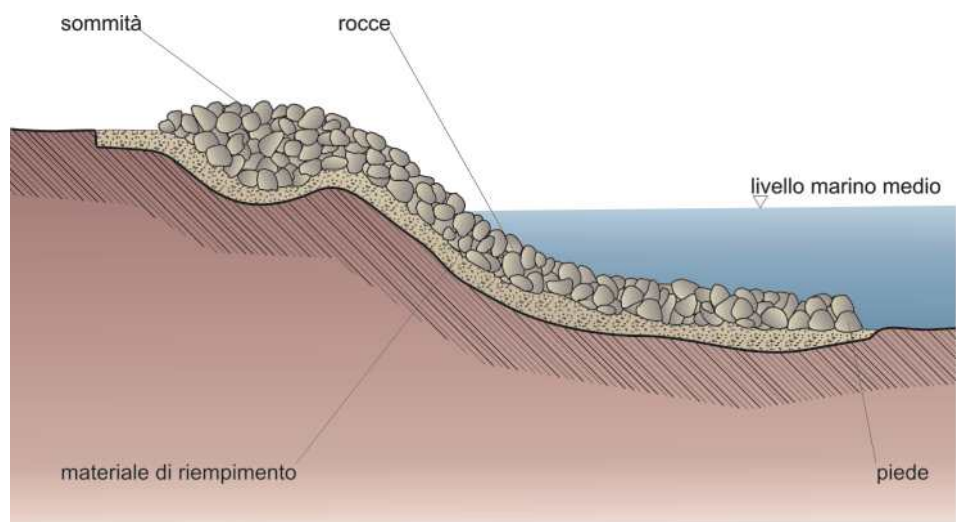


Figura 4.3.10: Rivestimento in massi. Spesso per limitare i danni alle infrastrutture viarie e ferroviarie causati da tempeste e mareggiate, si utilizzano rivestimenti con materiali di cava. La loro costruzione a ridosso delle massicciate viene eseguita con una disposizione più o meno regolare dei massi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

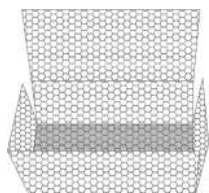


Descrizione e caratteristiche

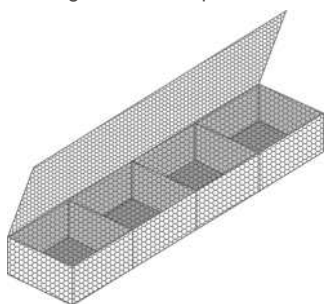
Rivestimenti con gabbioni

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

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



gabbione semplice



gabbione con setti interni

Figura 4.3.11: Gabbioni senza diaframmi e gabbioni con diaframmi.

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

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

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

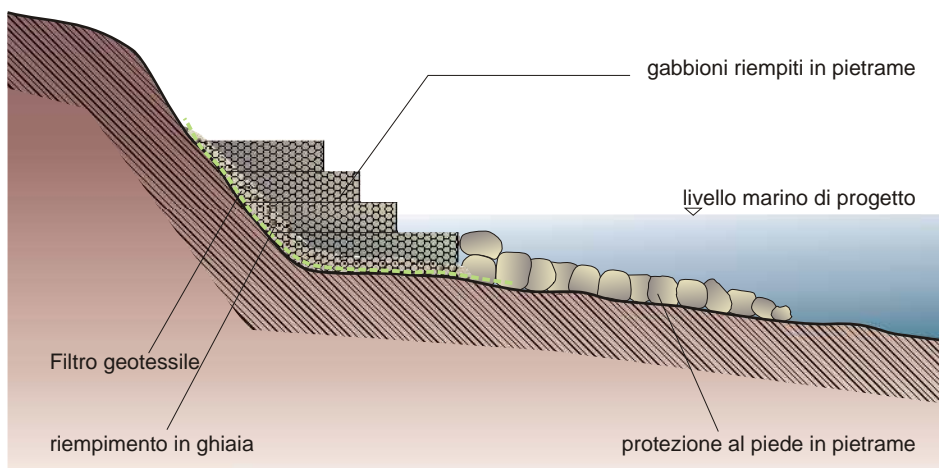


Figura 4.3.13: Esempi di protezioni di strade litoranee con rivestimenti in gabbioni. Nell'esempio a destra (litorale laziale) i gabbioni sono sistemati su un muro paraonde sagomato per riflettere l'onda incidente. Le gabbionature nei due casi assolvono anche ad una funzione di sostegno del terreno.



Rivestimenti con blocchi in calcestruzzo

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

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

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



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



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



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

Generalità

Rivestimenti con unità artificiali leggere

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

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

Descrizione e caratteristiche

Armorloc

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

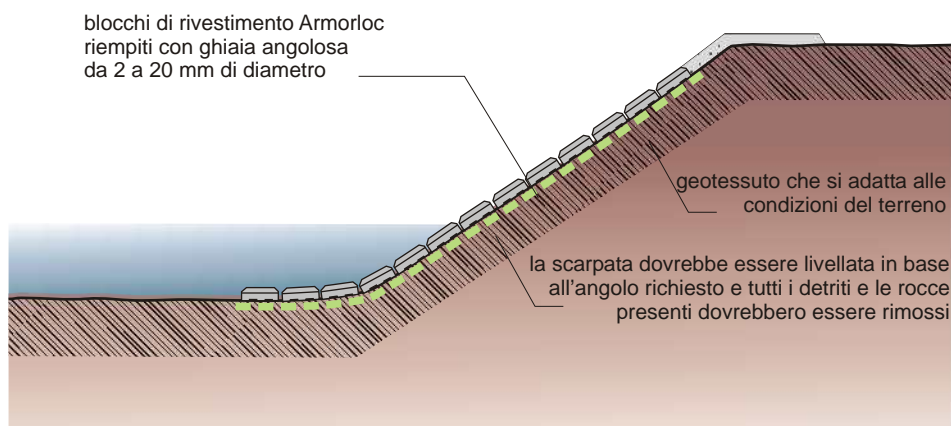
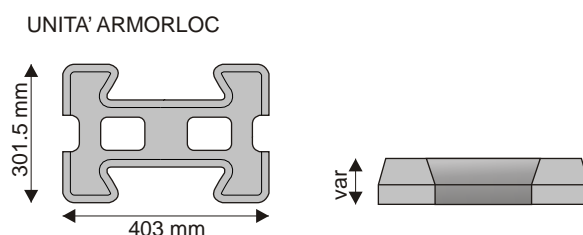


Figura 4.3.17: Esempio di sponda con rivestimento protettivo Armorloc. Ogni elemento costitutivo è connesso ad altri 6 elementi adiacenti, in modo da formare una struttura solidale e resistente al moto ondoso, in situazioni di bassa energia.



Descrizione e caratteristiche

Lotus-Uni

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

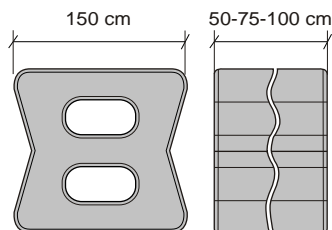
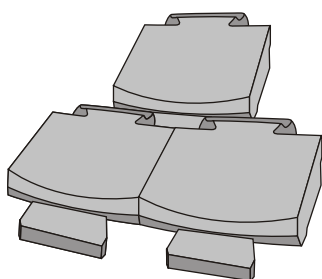
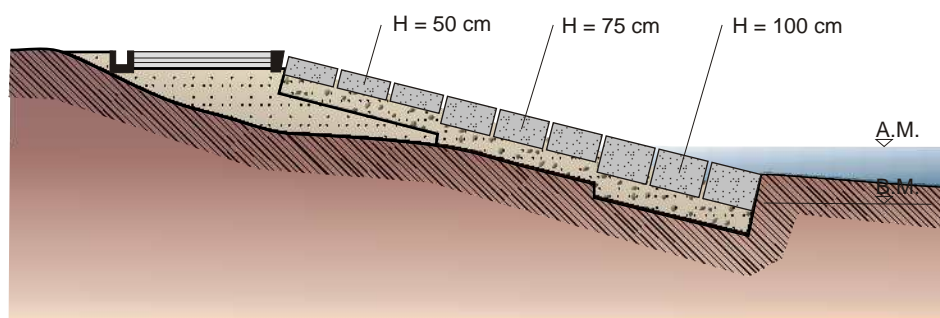


Figura 4.3.18: Unità Lotus-Uni e Rivestimento tipo Lotus-Uni. Una variante di quest'intervento è quella con blocchi Crab o Coast, aventi talvolta i fori riempiti di pietrame e talora disposti a gradoni sfalsati.

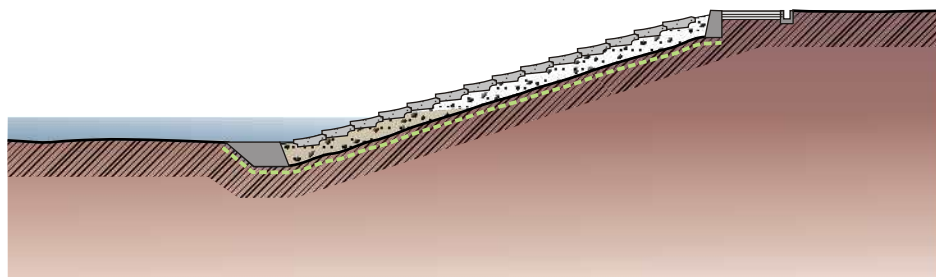
Questo rivestimento è stato sperimentato negli anni '80 in Giappone ed ha fornito risultati molto soddisfacenti.



Terrace Blocks

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

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

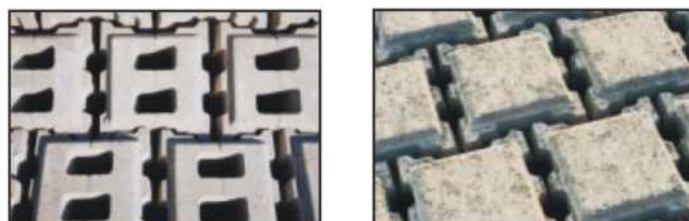


Descrizione e caratteristiche

Armorflex

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

Figura 4.3.20: Unità Armorflex aperta e chiusa.

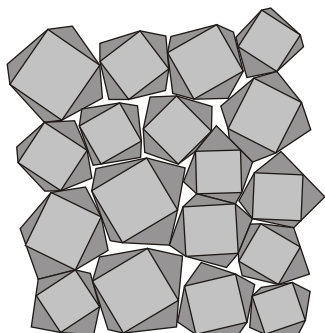


Descrizione e caratteristiche

Basalton

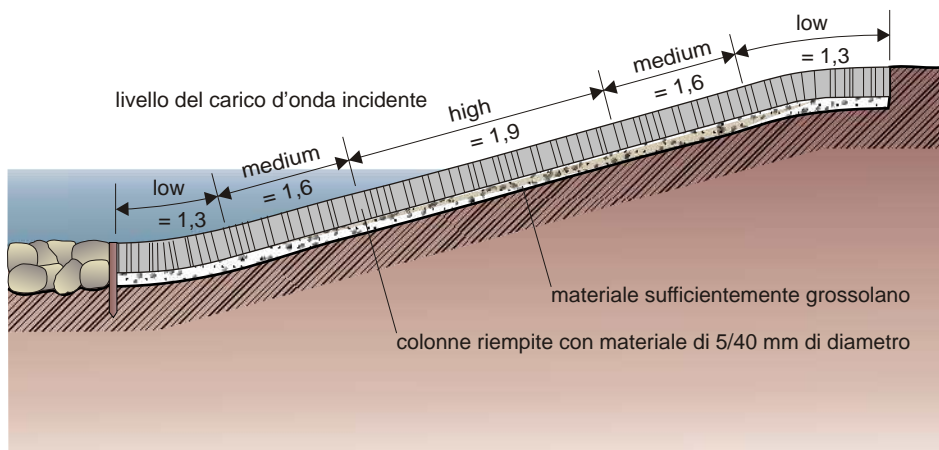
La struttura è costituita da elementi colonnari di calcestruzzo reciprocamente interconnessi. La forma viene sagomata opportunamente per evitare i movimenti verso l'alto delle singole unità, sotto condizioni di carico dinamico. I rivestimenti Basalton forniscono i seguenti vantaggi:

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



PIANTA

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



Descrizione e caratteristiche

Monoslabs o Turfblocks

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

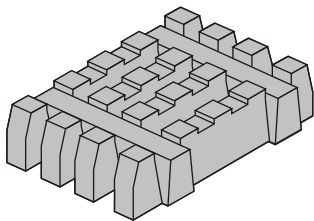
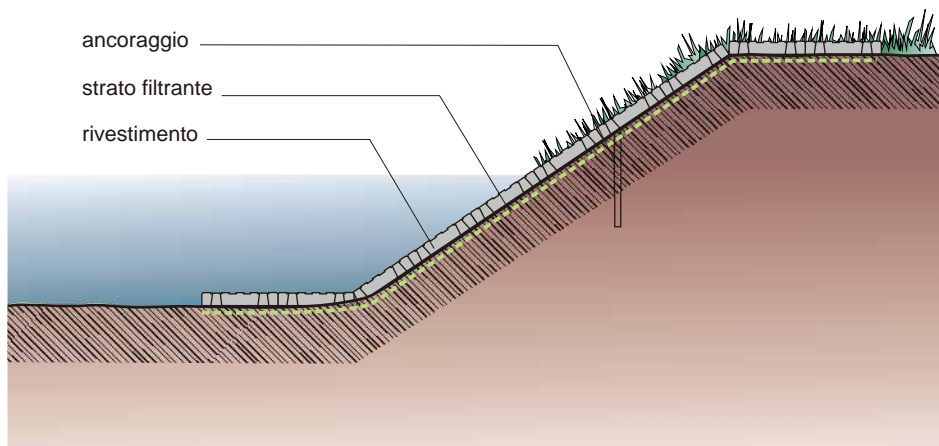


Figura 4.3.22: Unità Turfblock e sezione di un Rivestimento Turfblock. Nello schema si osserva il sistema di ancoraggio degli elementi, il filtro geosintetico alla base e la disposizione delle unità sulla scarpata.

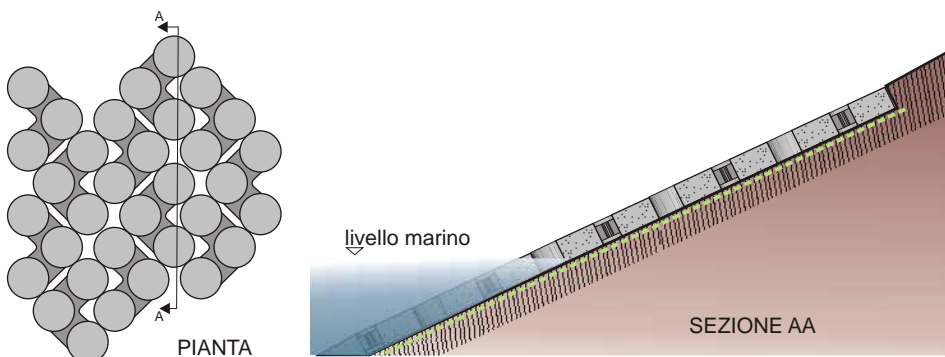


Descrizione e caratteristiche

Elbloc

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

Figura 4.3.23: Rivestimento tipo Elbloc.

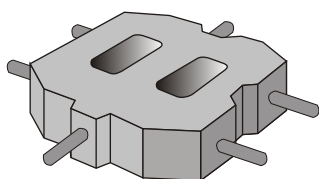


Descrizione e caratteristiche

Petraflex

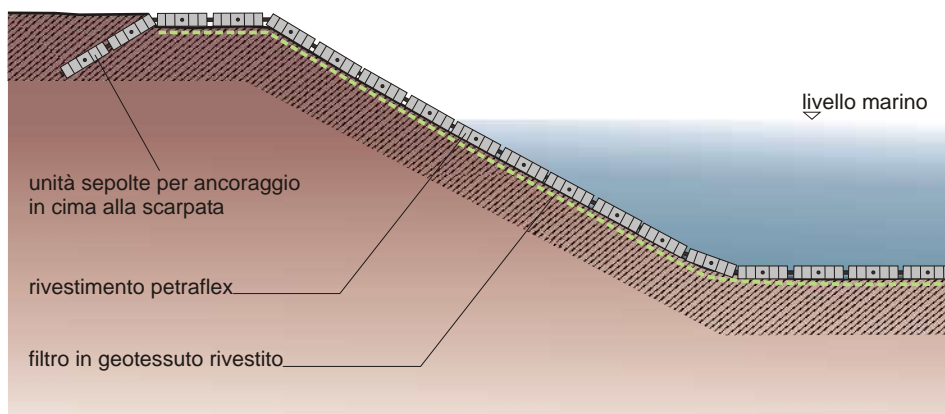
Si tratta di un rivestimento flessibile, applicato su un filtro in geotessuto, le cui unità, realizzate in calcestruzzo con differenti dimensioni, sono rastremate ed interconnesse ad incastro mediante cavi. I materassi Petraflex vengono preassemblati e dimensionati in base all'estensione dell'area d'intervento.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

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



UNITÀ PETRAFLEX

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



Descrizione e caratteristiche

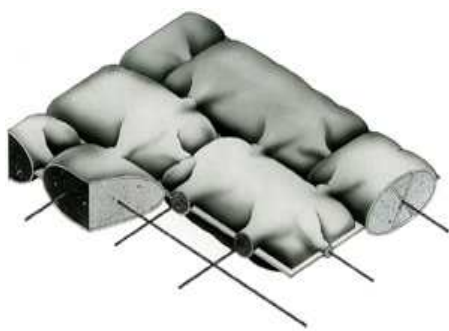


Figura 4.3.25: Rivestimento con Unità Texicon.

Texicon

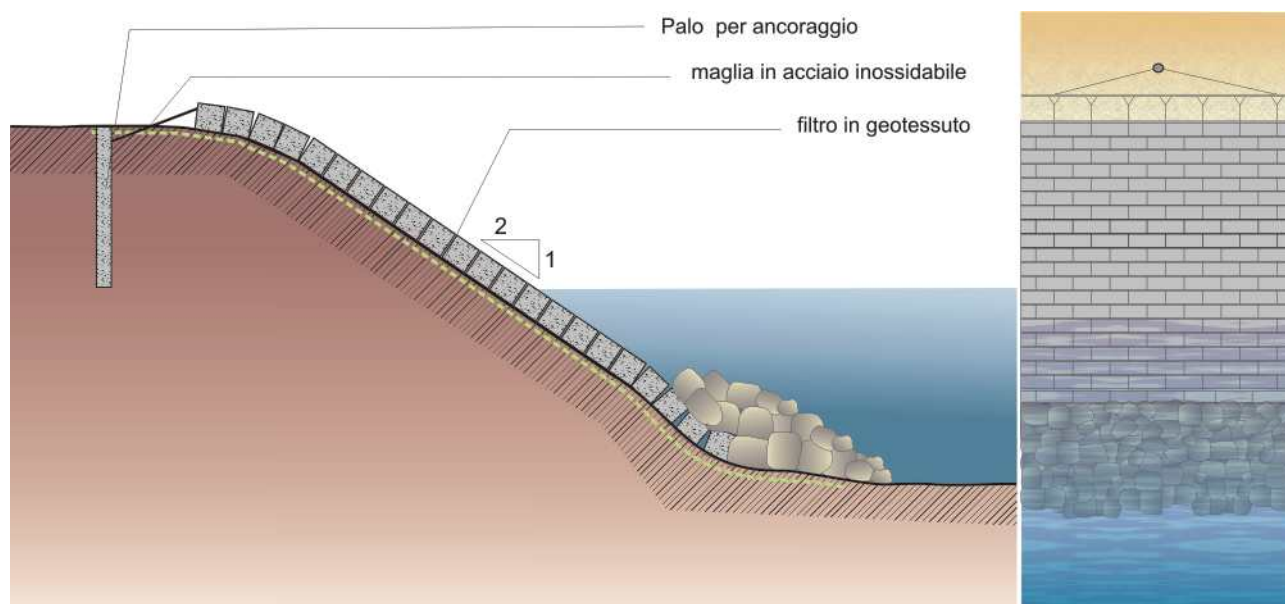
Viene costruito riempiendo unità in tessuto geosintetico rinforzato, a doppio strato, con un aggregato cementizio. Le unità vengono installate in sito a formare un'unica struttura. Le unità Texicon, una volta posizionate, vengono riempite contemporaneamente, pompando una miscela cementizia al loro interno,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

Descrizione e caratteristiche

Terrafix Blocks

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

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



Dytap

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

Figura 4.3.27: Operazione di installazione di una Unità Dytap

SCOGLIERE RADENTI

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

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

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

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

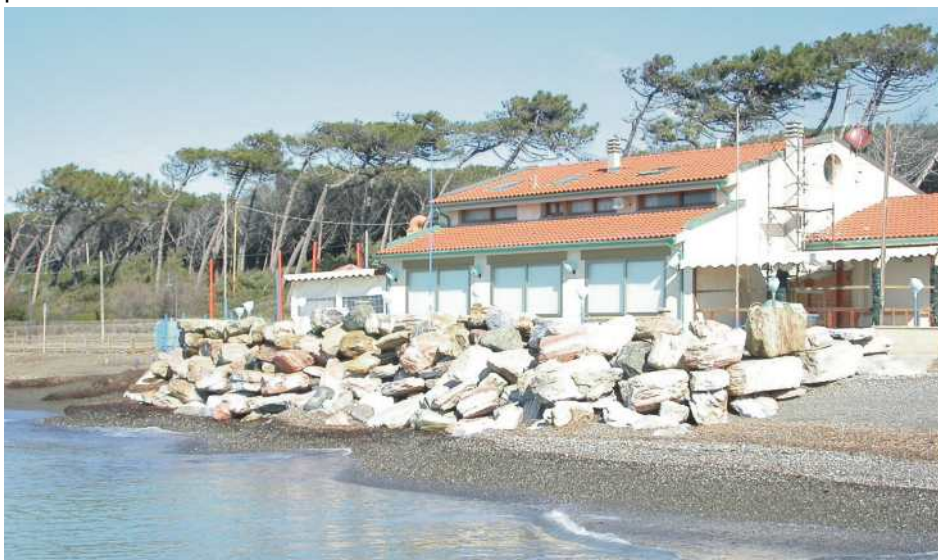


Figura 4.3.29: Scogliere radenti. Queste opere, essendo permeabili, consentono alla massa d'acqua di dissipare la gran parte dell'energia penetrando al loro interno e danno luogo ad un limitato approfondimento dei fondali antistanti. Esse sono indicate nei casi in cui gli apporti litoranei sono scarsi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



MURI

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

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

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

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

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

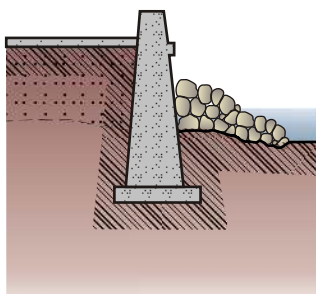


Figura 4.3.31: Costruzione di un muro verticale con sottostruttura di cut-off in pali, a protezione del piede. Il cut-off ha la funzione di impedire l'azione diretta delle onde marine sulla parte inferiore del muro. La difesa viene completata tramite il versamento di pietrame disposto alla rinfusa.



Descrizione e caratteristiche

Muri in c.a. con parete curva

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

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

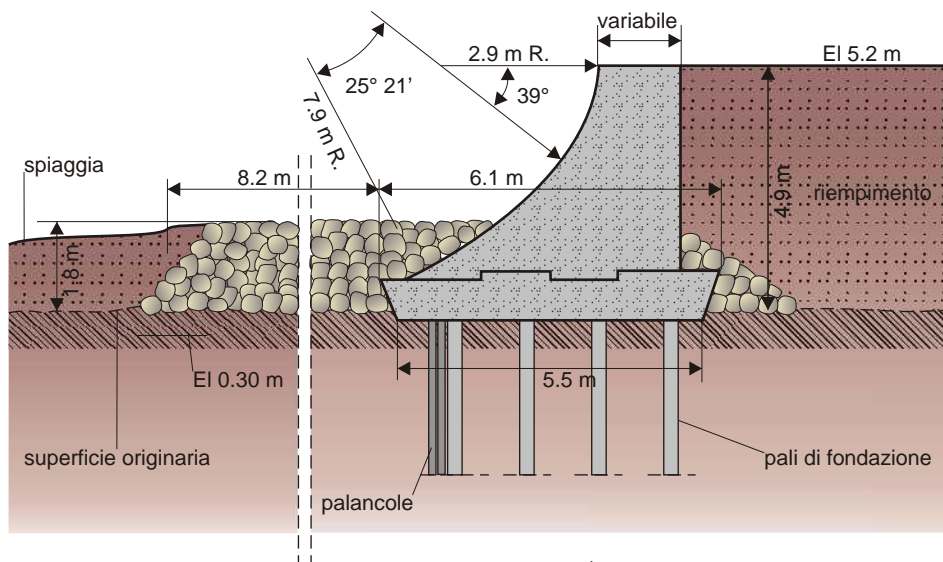


Figura 4.3.33: Esempio di muro concavo con parapetto inclinato di 30°. La sua funzione principale è quella di evitare che le onde in risalita scavalchino il coronamento e producano erosione a tergo, evitando anche l'ingresso di acqua su strade o vicino ad edifici.

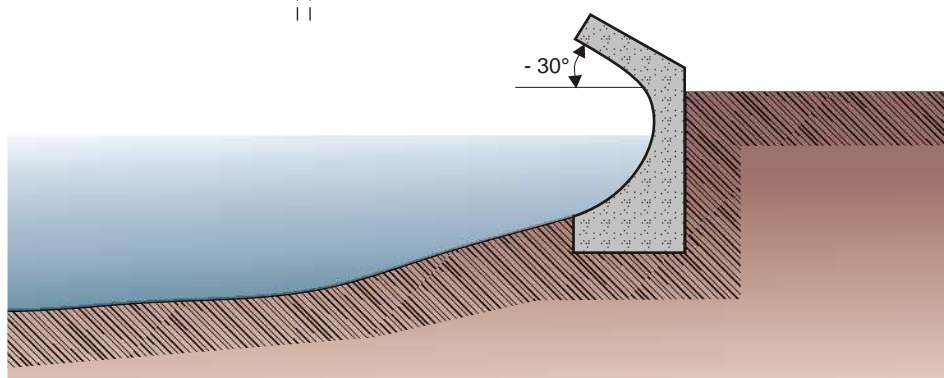


Figura 4.3.34: Muro concavo con paraonde. La presenza di un coronamento ricurvo contrasta la risalita e il conseguente scavalcamento dell'opera da parte delle onde più violente. Al piede del muro, o nelle sue vicinanze, è opportuno prevedere la collocazione di massi di protezione.

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



Muri in terra-armata e in terra rinforzata

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

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

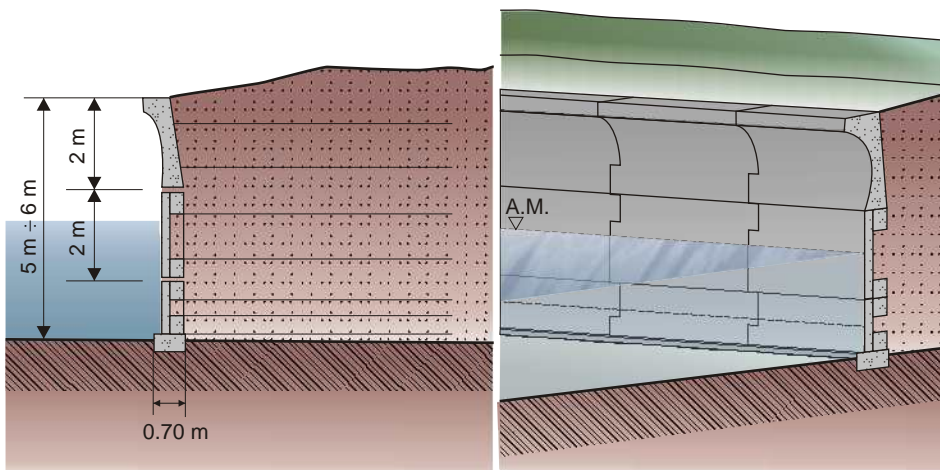


Figura 4.3.36: Anchor Wall System. Questo sistema di sostegno in terra rinforzata con armatura di teli di geosintetico, è adatto ad aree costiere con paraggi esposti ad onde di media energia. Il paramento esterno è costituito da blocchi in calcestruzzo, mutuamente interconnessi a formare una parete continua,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

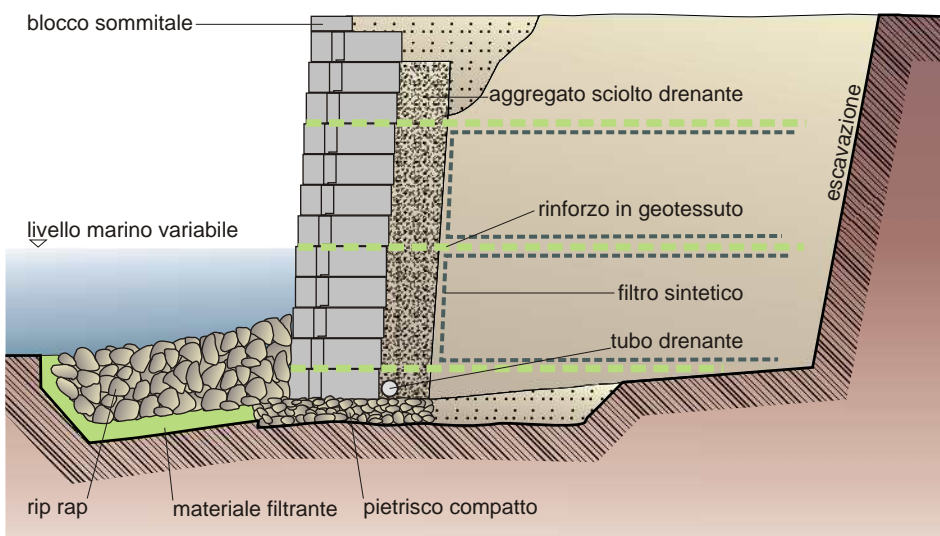


Figura 4.3.37: Muro in terra armata a sostegno di una strada.



Descrizione e caratteristiche

Muri con gabbionate

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

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

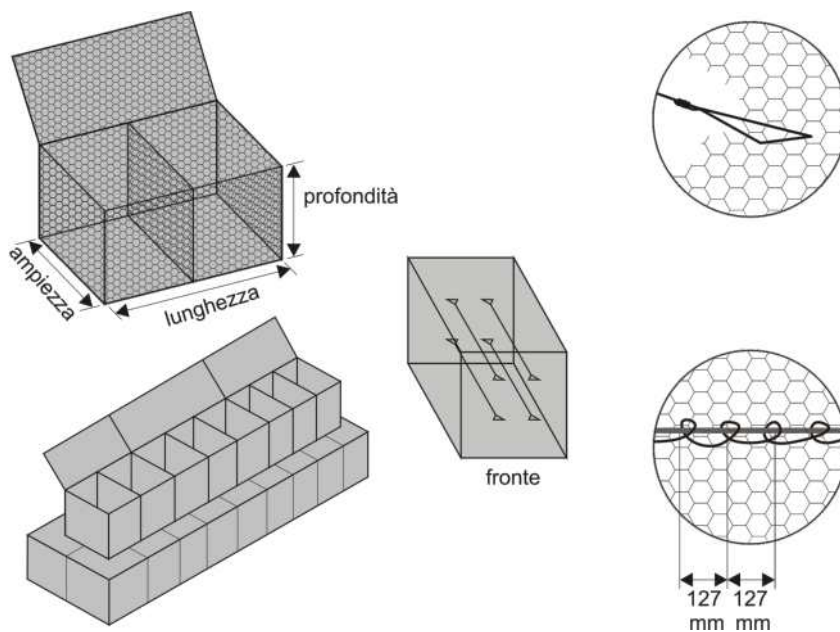
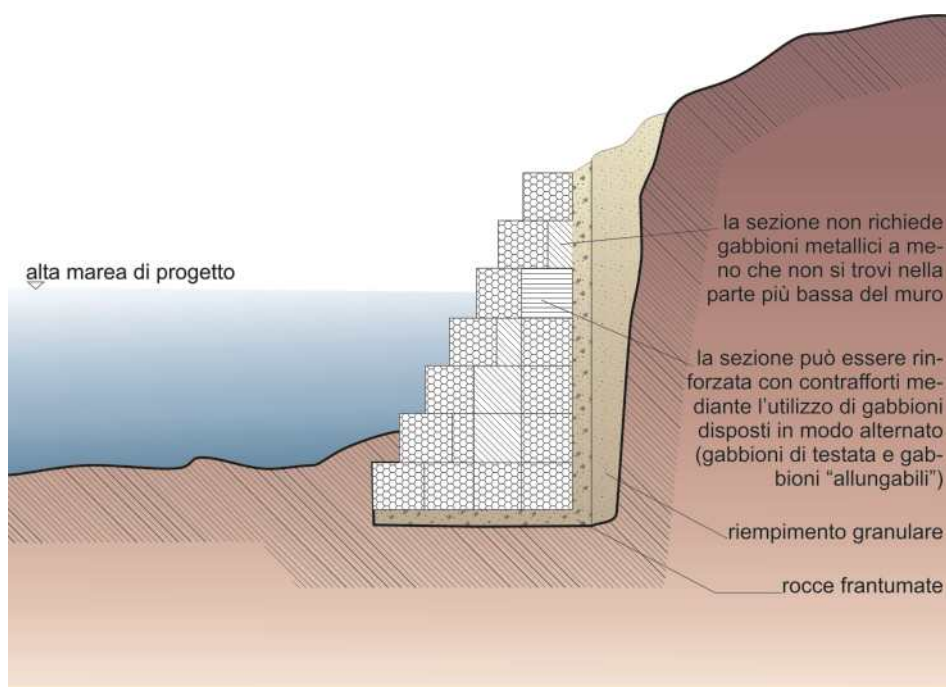


Figura 4.3.39: Muro con gabbioni. La struttura viene costruita a difesa di tratti di costa soggetti a onde aventi moderata energia. La scarpata marina viene sagomata in modo da contenere la sezione del muro, il quale può essere o meno in contropendenza rispetto ad essa. Alla base dell'opera è prevista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



PARATIE

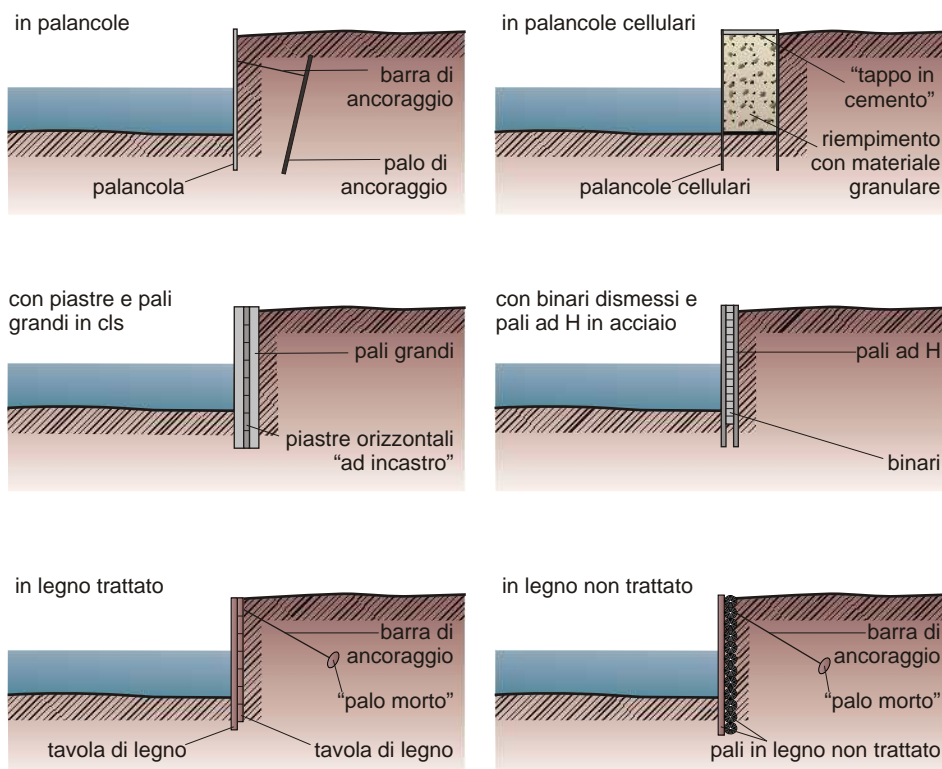
Le paratie sono strutture di sostegno costituite da legname, acciaio o calcestruzzo, allineate alla linea di riva infisse direttamente nel terreno. Vengono spesso utilizzate per la protezione delle sponde dei canali navigabili negli scali portuali e adibite all'attracco o alla sosta di imbarcazioni per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

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

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

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

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



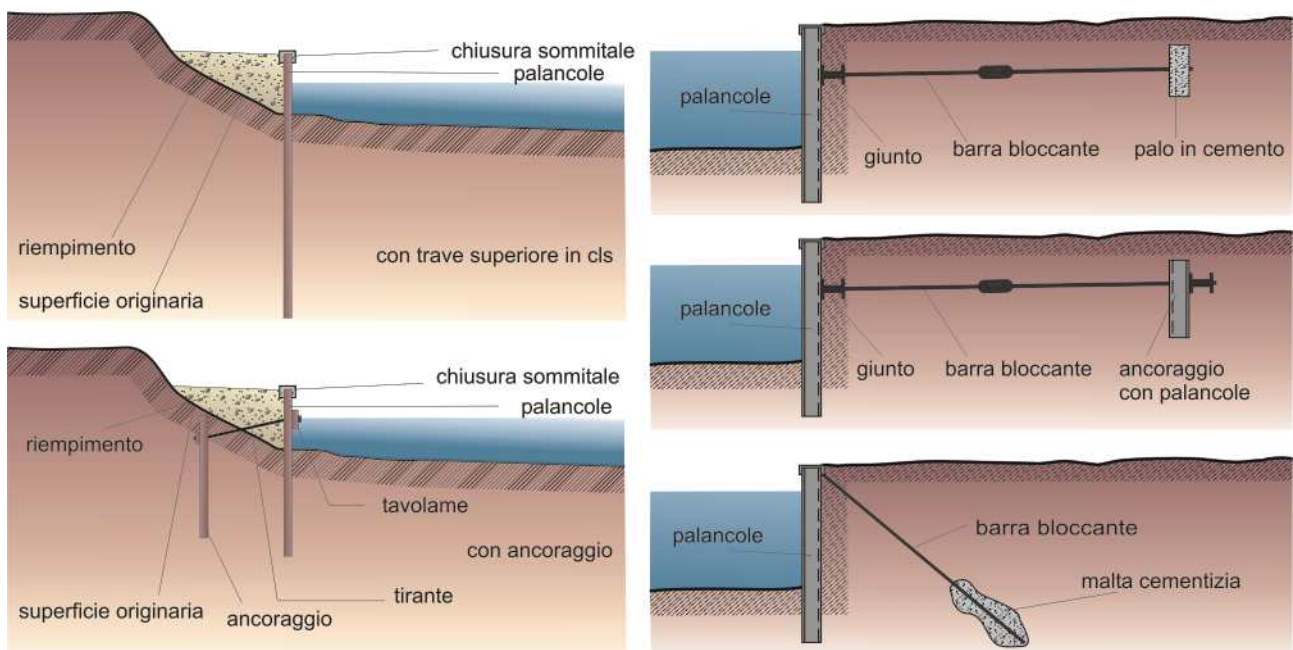


Figura 4.3.41: Sistemi di ancoraggio. I diversi tipi di ancoraggio vengono scelti in base alle caratteristiche meccaniche dei terreni e alle condizioni meteomarine locali.



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

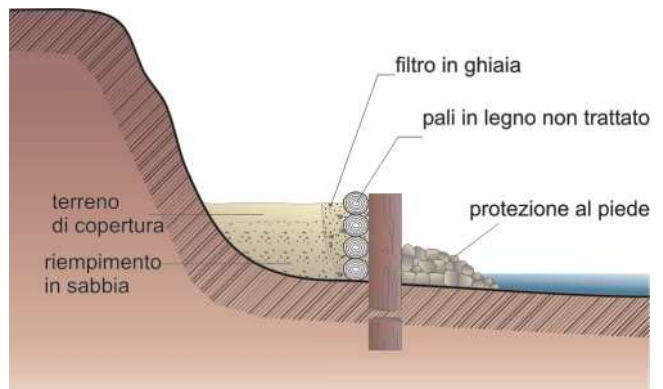
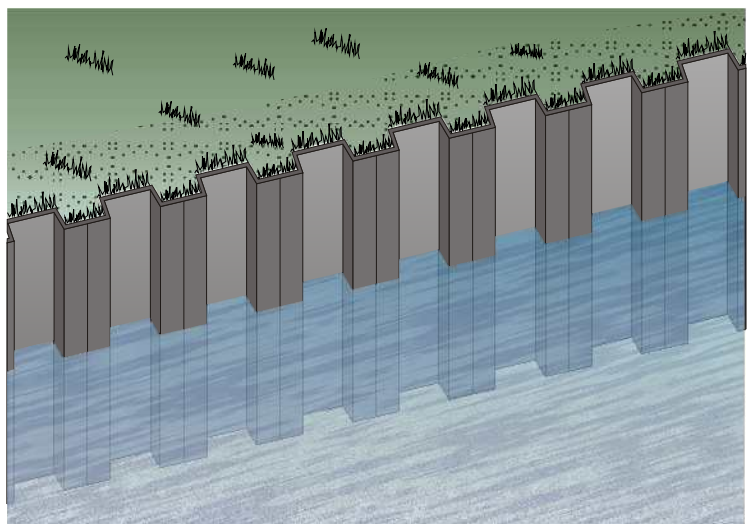


Figura 4.3.43: Paratia in legno. Essa è costituita da pali di grande diametro ai quali sono incastrati pali di legno orizzontali, a tergo dei quali viene fatto un riempimento di ghiaia e terreno granulare, poggiato su tessuto filtrante. L'installazione di un filtro resistente, capace di far da ponte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

Generalità

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

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

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

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

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



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



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

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

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

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

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

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

Ripascimento non protetto o morbido

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

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

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

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

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

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

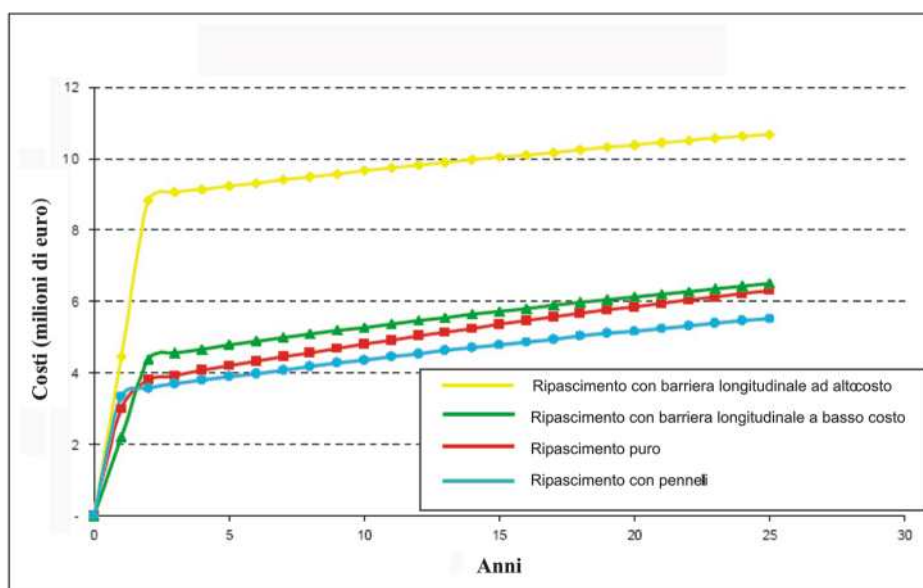


Figura 4.4.3: Descrizione degli investimenti necessari alla realizzazione di opere di ripascimento (puro e protetto). Soltanto l'intervento con pennelli trasversali (linea azzurra) risulta meno oneroso nel lungo periodo rispetto al ripascimento puro (linea rossa). (Diagramma Beachmed)

Utilizzo di sabbie marine profonde

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



Utilizzo di sabbie litoranee

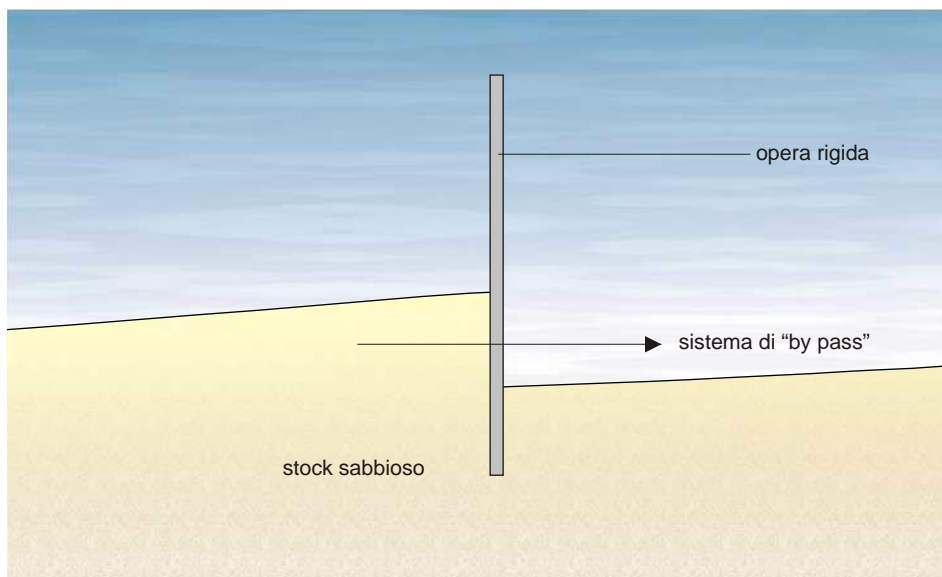
Questa metodologia di ripascimento prevede la movimentazione di sabbie da un arenile all'altro, o da una porzione di spiaggia dove prevalgono processi di accumulo verso tratti in erosione, al fine di distribuire in modo omogeneo il sedimento e riequilibrare il bilancio sedimentario fra unità attigue.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

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

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

L'intervento con impiego di sistemi di by pass è limitato a quei contesti ambientali in cui si ha la presenza di significativi accumuli di sedimento lungo costa. Va evidenziato che lungo i litorali italiani, costellati di opere marittime di diverso tipo, tale metodologia può trovare molte applicazioni. Il principale vantaggio che essa offre è quello di non necessitare del reperimento continuo di nuovo sedimento, aspetto generalmente più dispendioso per la maggior parte delle strategie di difesa costiera, recuperando e restituendo alla naturale dinamica del litorale quanto perso in precedenza. Nel caso di Porto Garibaldi il costo dell'operazione è stato di circa 10 euro/m³. Bisogna sottolineare che l'utilizzo delle sabbie litoranee per il ripascimento degli arenili permette di sfruttare i sedimenti come risorse, prima che diventino un ostacolo alla navigazione (compromettendo la funzionalità delle strutture portuali), che subiscano una contaminazione a causa delle attività antropiche (divenendo pressoché inutilizzabili) o che siano rimosse abusivamente.

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



Nel caso di by pass a mare, con pompe aspiranti-refluenti, l'impatto generato sull'ambiente costiero è piuttosto ridotto, dal momento che si tratta di un refluento di sedimento sulla spiaggia emersa della durata di pochi giorni. A Porto Garibaldi, ad esempio, sono stati recentemente movimentati 214.000 m³ in due settimane. In caso di intervento via terra, l'impiego di autocarri per il trasporto del sedimento allunga i tempi di realizzazione e comporta stress ambientali simili a quanto descritto nella parte relativa all'utilizzo di materiali di cava.

Sistema di by pass a mare

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

Sistema di by-pass a terra

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



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



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

Utilizzo di materiale di cava

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

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

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



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

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



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



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

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

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

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

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

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



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



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

Interventi con utilizzo di ghiaia

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

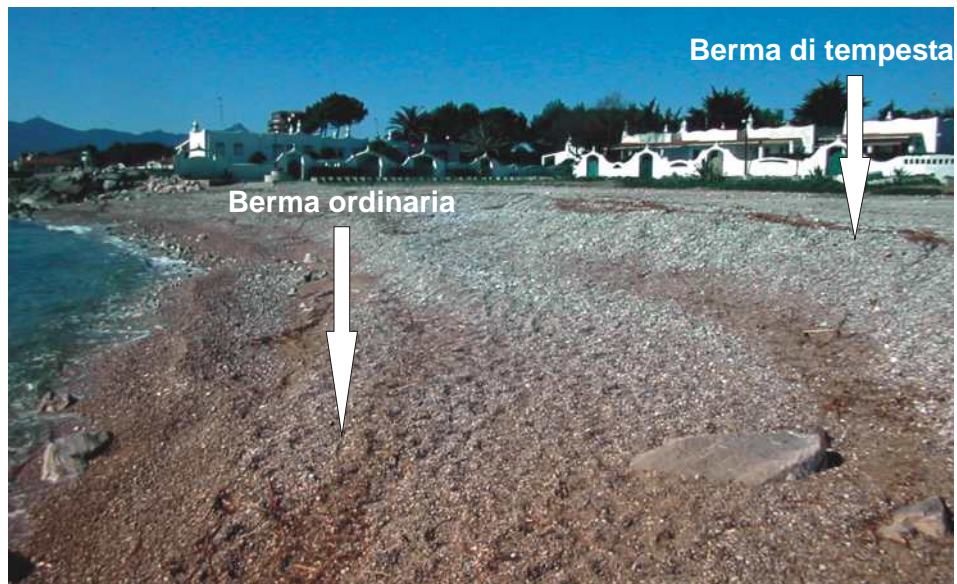


Figura 4.4.17: Dettaglio dei washover fans sulla spiaggia di Foce Verde (Latina). (Foto G. Bovina).



Ripascimento protetto

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

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

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

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

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



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

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

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

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



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



Generalità

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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



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

Generalità

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

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

Descrizione e caratteristiche

Opere di regolazione idrica (dragaggi)

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

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

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

Opere di ricostruzione di Dune , Velme e Barene

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

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

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



Generalità

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

Le tipologie più comunemente realizzate sono costituite da:

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

Descrizione e caratteristiche

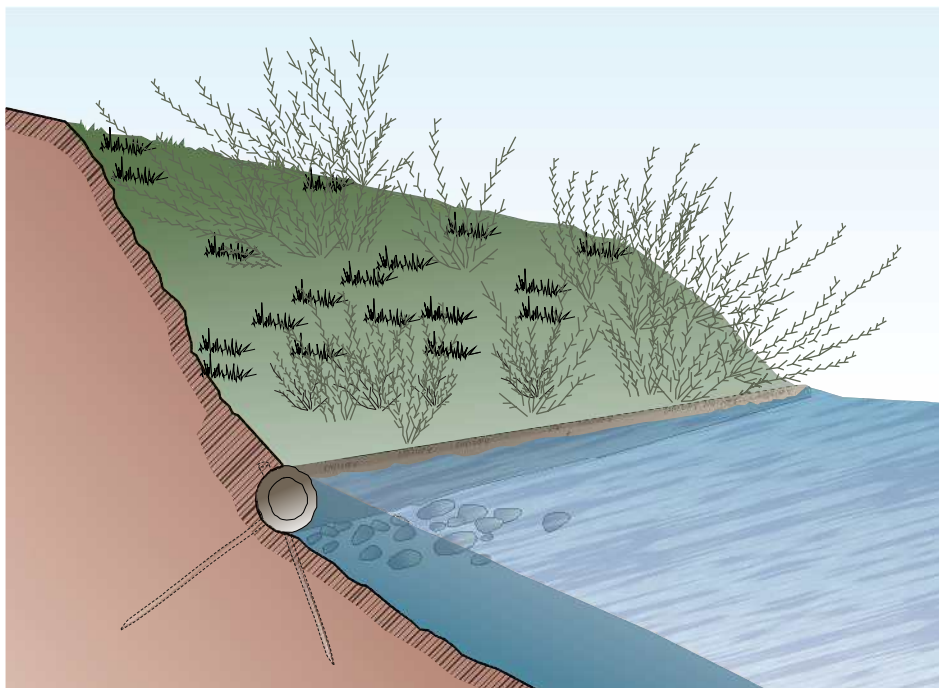
Rivestimento con biotessili in cocco o in juta

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

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

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

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

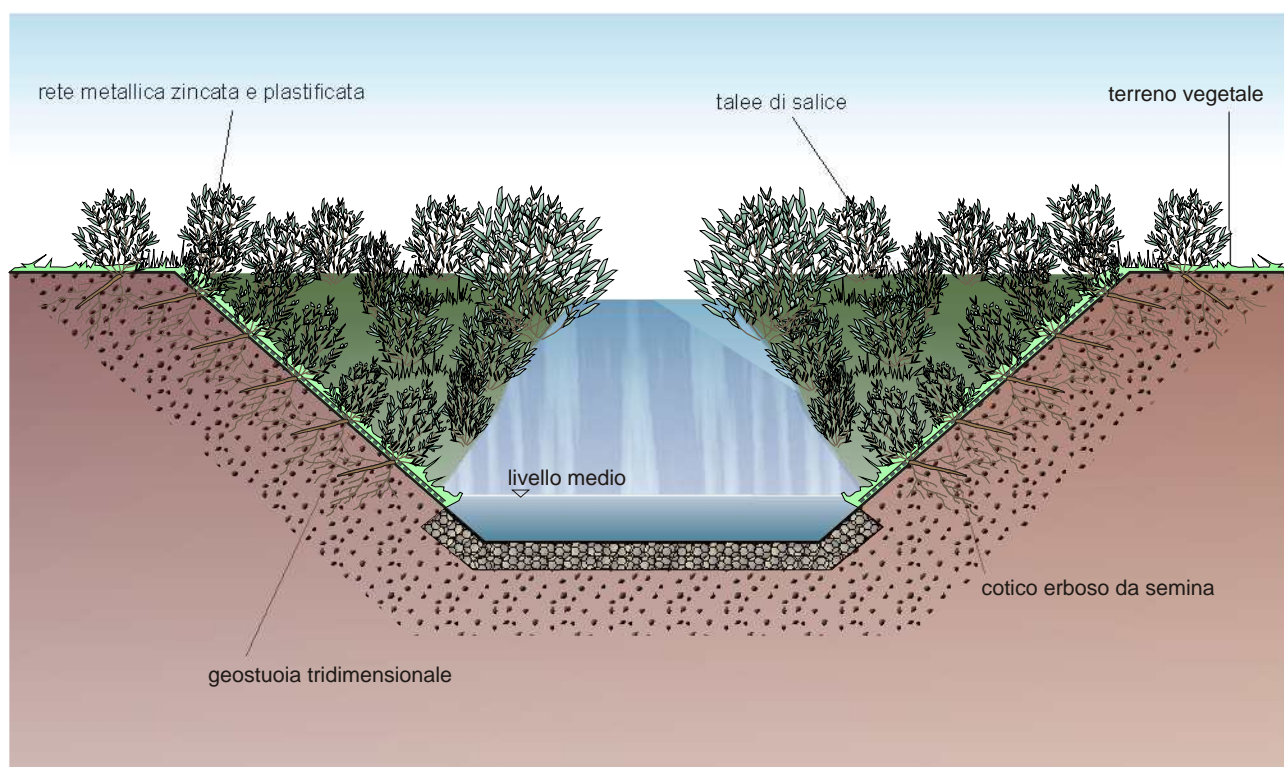


Rivestimento vegetativo con geostuoia sintetica tridimensionale e rete metallica a doppia torsione

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

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

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



Geostuoia sintetica tridimensionale prebitumata industrialmente a caldo

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

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

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

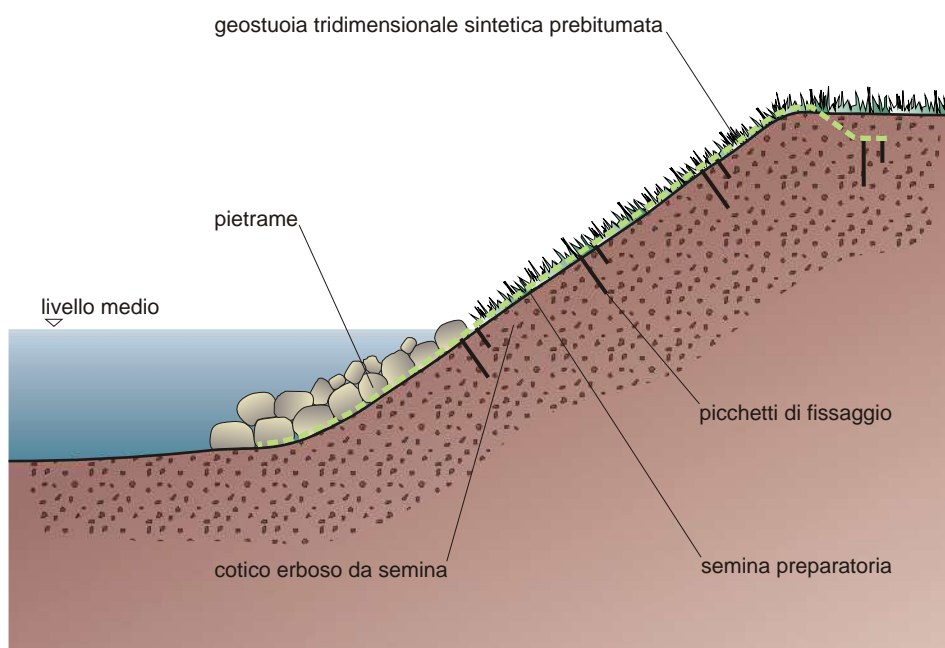


Figura 5.2.3: Geostuoia tridimensionale sintetica prebituminata industrialmente a caldo: si tratta di un intervento che si utilizza per il rivestimento di superfici spondali soggette a contatto permanente con l'acqua e per il rivestimento del fondo di canali.

Generalità

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

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

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

Descrizione e caratteristiche

Messa a dimora di piante in vaso o contenitore

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

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

Messa a dimora di talee

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

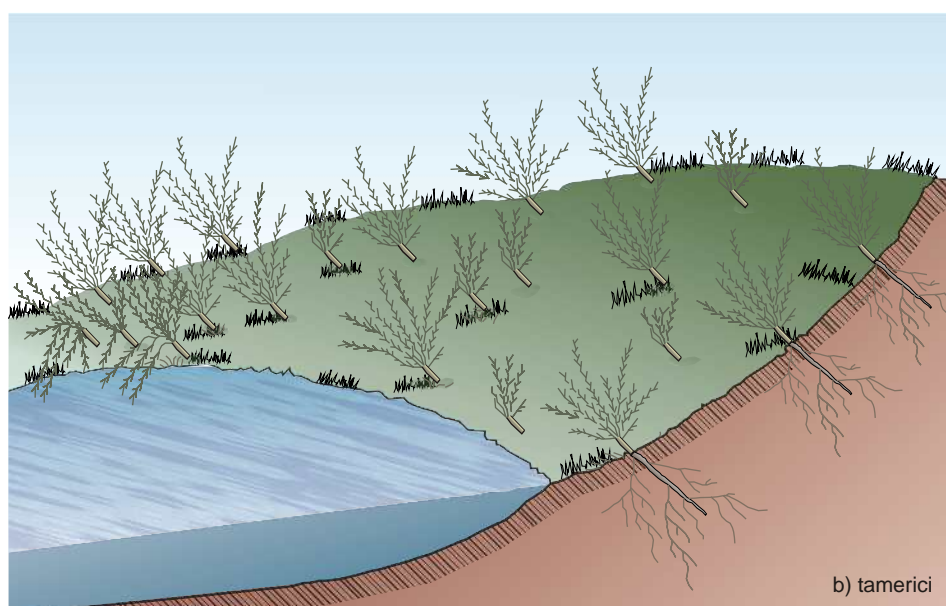
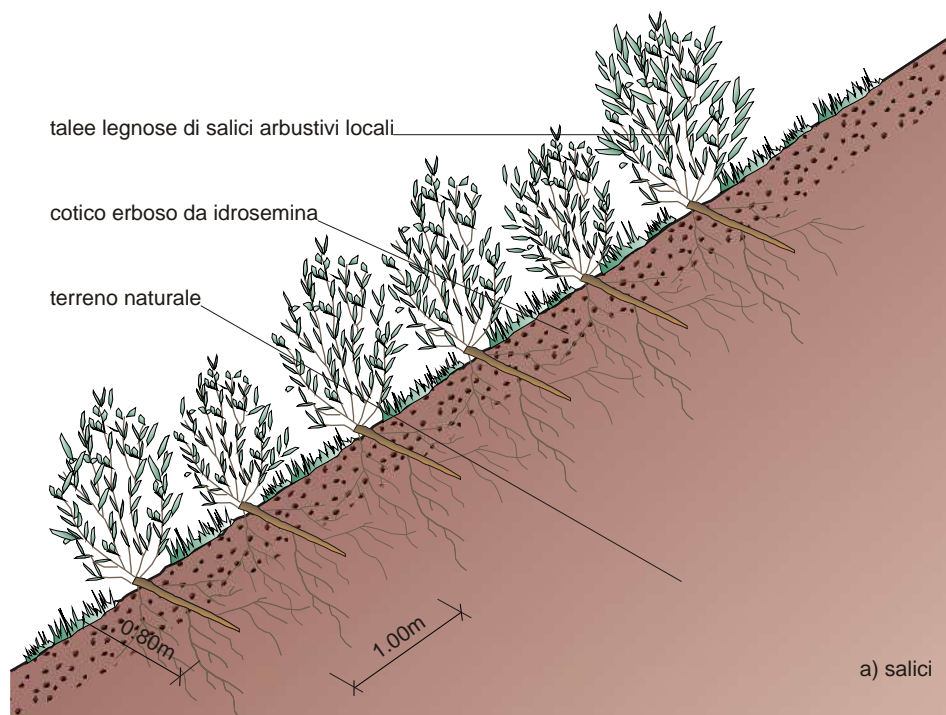
Le opere sono generalmente volte alla sistemazione di scarpate e di sponde fluviali e lacustri a bassa pendenza.

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

Figura 5.3.1: Messa a dimora di talee:

- a) salici,
- b) tamerici.

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



Trapianto di rizomi e cespi

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

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

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

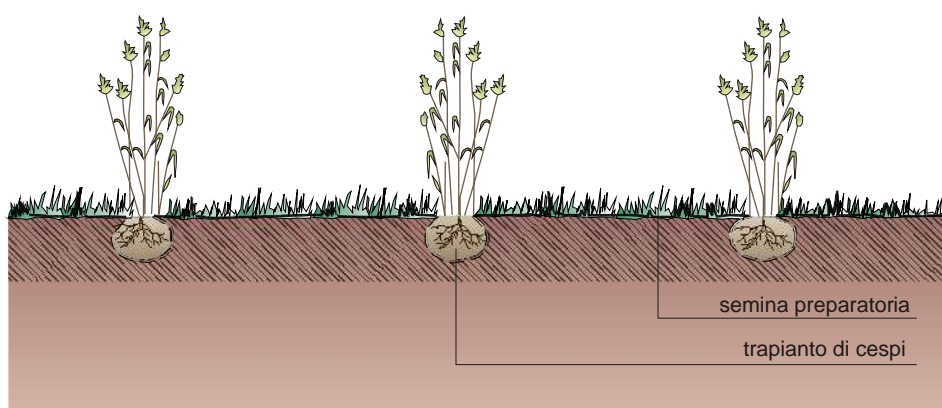
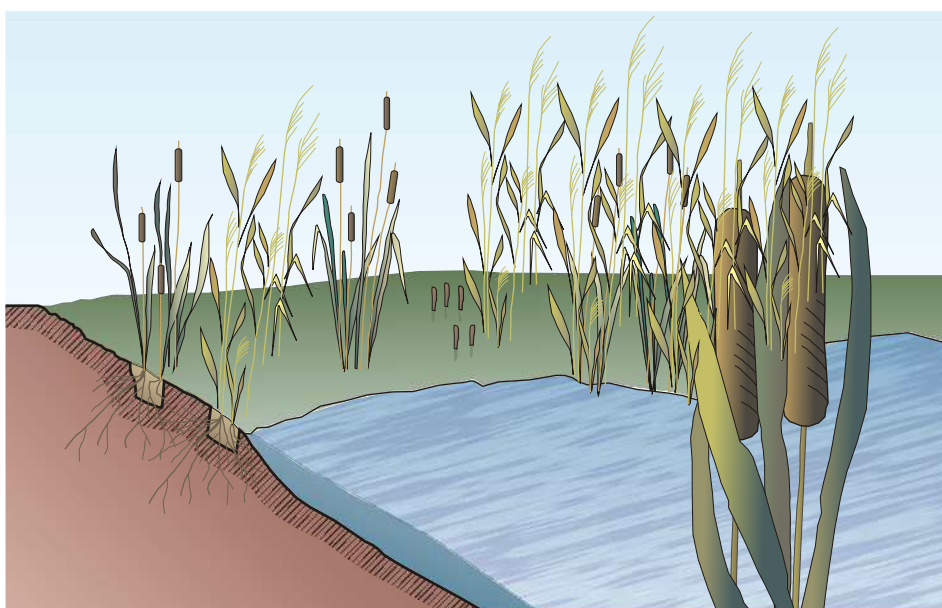


Figura 5.3.2: Trapianto di rizomi e cespi. In natura vengono prelevati rizomi, stoloni e cespi di graminacee e altre specie idonee, in parti di circa 10-15 cm, che sono successivamente inseriti nel terreno per circa 4 cm, sminuzzati o interi e ricoperti con un leggero strato di terreno vegetale per evitare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

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

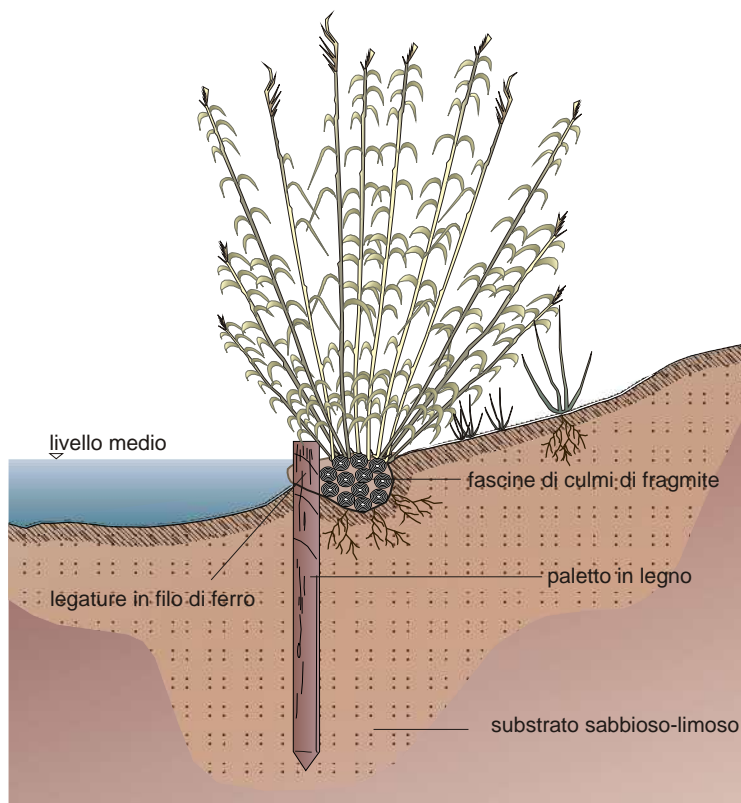
Fascinata spondale viva con culmi di canna

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

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

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

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



Fascinata Sommersa

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

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

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

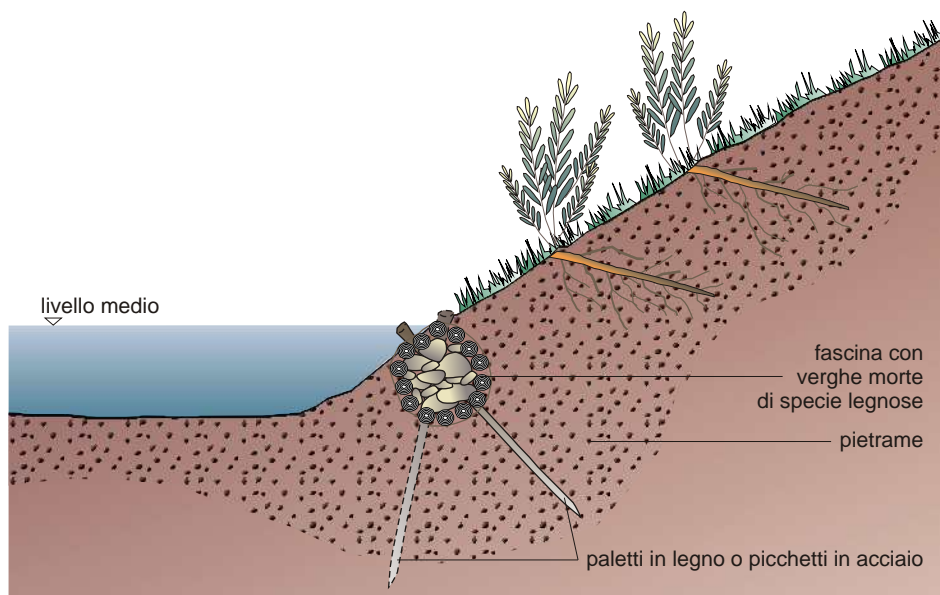


Figura 5.3.4: Fascinata sommersa. Protezione del piede della sponda mediante una fascinata costituita da legname morto di specie arbustive, caricate al centro con ghiaia o pietrisco. Viene realizzata sul posto e legata con filo di ferro, nastro metallico o tessuto sintetico, fissata con pali di legno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

Copertura diffusa con culmi di canna

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

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

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

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

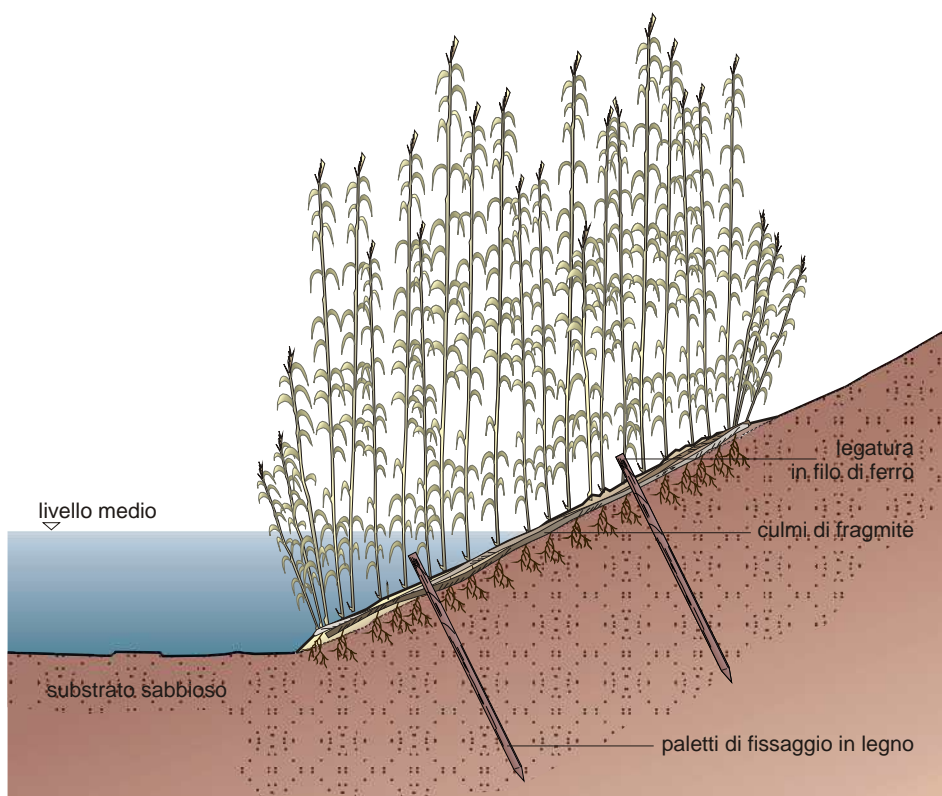


Figura 5.3.5: Copertura diffusa con culmi di canna. Si tratta di un rivestimento di sponda, precedentemente modellata, in condizioni di bassa pendenza e modesta velocità dell'acqua, con culmi di canna in numero da 30 a 60 per metro, di lunghezza da 80 a 170 cm, con la parte inferiore a contatto diretto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

Generalità

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

Le tipologie d'opera più comuni sono costituite da:

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

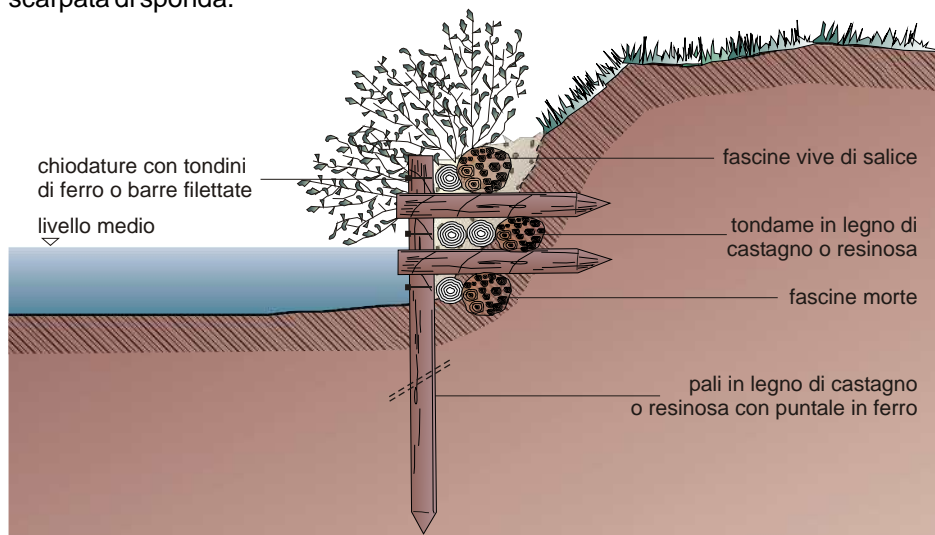
Descrizione e caratteristiche

Palificata Spondale con Palo Verticale Frontale

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

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

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



Rullo Spondale con Zolle di Canne

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

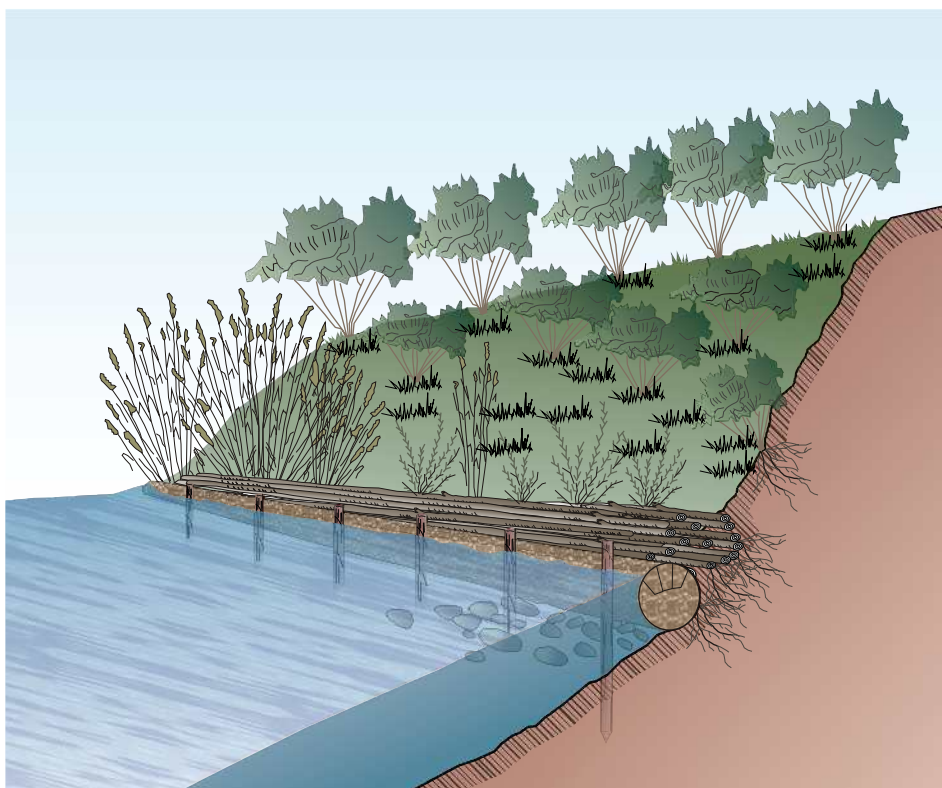


Figura 5.4.2: Rullo spondale con zolle di canna, in rete metallica o in georete sintetica. Viene utilizzato per il consolidamento al piede di sponde in erosione di canali, laghi e zone lagunari con limitate oscillazioni del livello dell'acqua, con trasporto solido ridotto a limi in sospensione. L'intervento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

Rullo Spondale in Fibra di Cocco

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

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

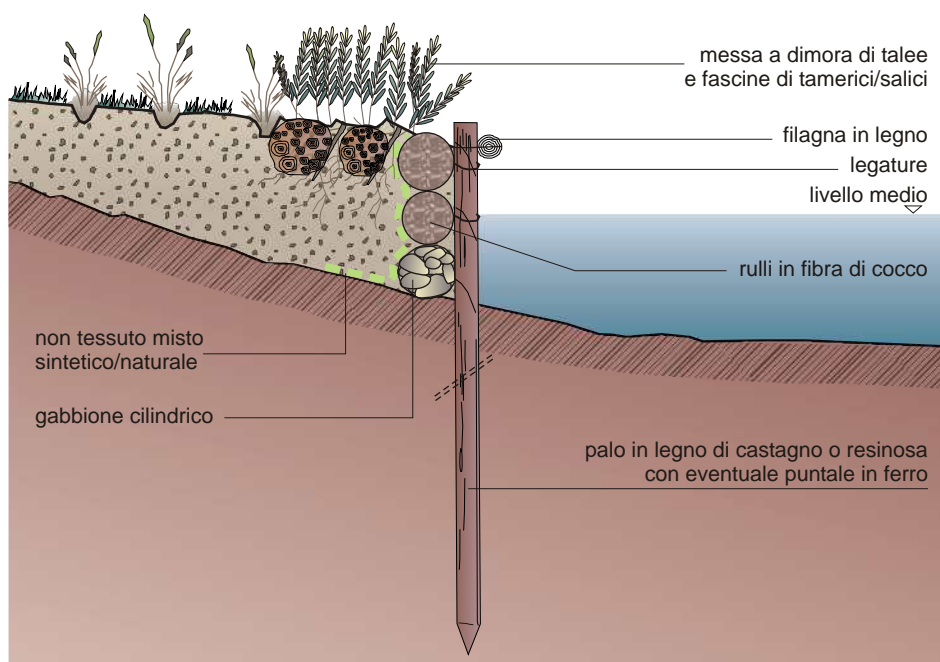


Figura 5.4.3: Rullo spondale in fibra di cocco: è costituito da una rete in fibra sintetica o biodegradabile in cocco di maglia massima 60 x 80 mm, riempita con fibra di cocco naturale. I rulli sono costituiti da moduli lunghi da 3 a 6 metri, fissati al substrato mediante pali di legno disposti su una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

Descrizione e caratteristiche

Gabbionata in rete metallica zincata rinverdita

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

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

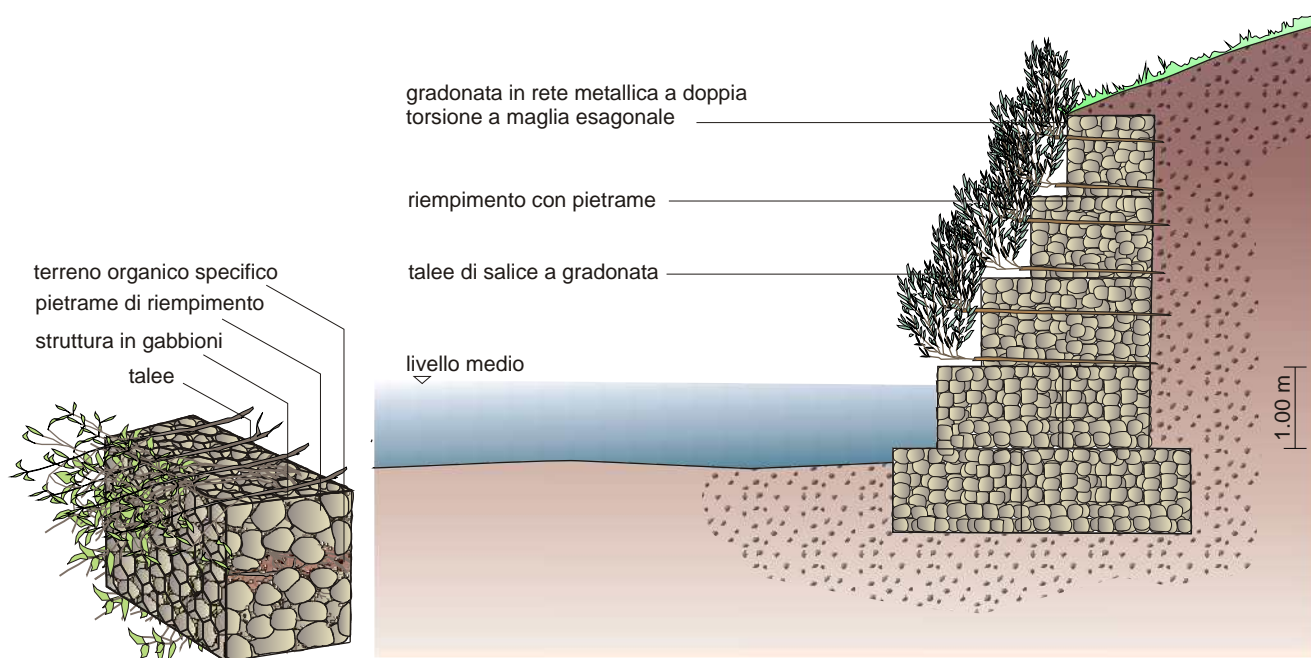


Figura 5.4.4: Gabbionata in rete metallica zincata rinverdita, a doppia torsione con maglie esagonali tessuta con trafilato d'acciaio. Gli scatolari metallici vengono assemblati e collegati tra loro utilizzando, sia per le cuciture che per i tiranti, un filo con le stesse caratteristiche di quello usato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