



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura (DICEA)

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile ed Ambientale

# **La dinamica dei sedimenti costieri e gli interventi di protezione dall'insabbiamento dei porti turistici**

## **The dynamics of coastal sediments and measures to protect marinas from silting up**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. CARLO LORENZONI

Tesi di Laurea di:

LUCA COGNINI

A.A. 2022 / 2023

# La dinamica dei sedimenti costieri e gli interventi di protezione dall'insabbiamento dei porti turistici

## INDICE

Introduzione .....	1
Cap. 1 L'ambiente costiero.....	2
1.1 Introduzione .....	2
1.2 Morfologia e trasporto solido .....	2
1.3 L'importanza di conoscere l'entità del trasporto solido nella progettazione di opere portuali	5
Cap. 2 Il trasporto dei sedimenti.....	8
2.1 Introduzione .....	8
2.2 L'azione delle correnti sui sedimenti.....	8
2.3 L'azione del moto ondoso sui sedimenti.....	9
2.4 L'azione combinata del moto ondoso e delle correnti nel trasporto trasversale.....	10
2.5 Influenza della pendenza del fondo .....	13
2.6 Influenza delle forme del fondo .....	14
2.7 Considerazioni sul trasporto solido .....	15
Cap. 3 Effetti di alcune opere rigide artificiali sulla costa .....	16
3.1 Effetto di un oggetto qualsiasi sulla costa .....	16
3.2 Effetto di un ostacolo distaccato dalla costa .....	17
3.3 Effetti di un molo che modifica i fronti d'onda .....	19
3.4 Difese trasversali o pennelli .....	19
Cap. 4 Attività di dragaggio .....	22
4.1 I mezzi di dragaggio .....	22
4.2 Effetti sull'ambiente causati dall'attività di dragaggio.....	25
4.3 Sistemi di dragaggio ambientale .....	26
4.4 Misure di mitigazione .....	27

4.5 Attività di monitoraggio e controllo .....	28
4.6 Deposito .....	28
Cap. 5 La difesa dall'insabbiamento .....	30
5.1 Misure per minimizzare gli impatti delle opere .....	32
5.2 Le reti di polipropilene .....	32
Cap. 6 Interventi per ripristinare un trasporto litoraneo intercettato da un ostacolo .....	33
6.1 Schemi di Sand-Bypassing .....	33
6.2 Piani di ripascimento delle spiagge .....	36
Cap. 7 Tecniche anti-sedimentazione .....	38
7.1 Sand Pit, avvallamento del fondo.....	38
7.2 Pareti devia correnti.....	40
7.3 Soglie .....	41
7.4 Mantenere la circolazione del flusso .....	42
7.5 Conclusioni .....	42
Cap. 8 Esempi applicativi.....	43
8.1 Lo studio del litorale toscano da Bocca di Magra a Forte dei Marmi: .....	43
8.2 il caso del porto di Viareggio .....	48
8.3 Il caso del porto turistico di Ancona.....	56
Conclusioni .....	59
Bibliografia e sitografia.....	60

## Introduzione

Il lavoro svolto tratta il ricorrente problema dell'insabbiamento dei bacini portuali, che costringono ad investire ingenti risorse su grandi interventi di dragaggio per mantenere la funzionalità dell'opera.

Dopo un'introduzione all'ambiente costiero, si analizzano i meccanismi di trasporto solido che portano al deposito dei sedimenti e di come questi vengano influenzati dalle opere artificiali costiere, che alterano il naturale equilibrio del trasporto e portano a gravi fenomeni di erosione delle coste e di insabbiamento dei porti con conseguente loro inagibilità.

Si trattano quindi i vari sistemi di dragaggio, che spesso sono visti come l'unica arma contro l'insabbiamento, ed il loro impatti sull'ambiente, per poi studiare delle nuove soluzioni contro l'insabbiamento che permettano ad esempio di ripristinare il flusso dei sedimenti scavalcando l'ostacolo o di catturare le sabbie prima che queste penetrino nel bacino.

Per concludere si propongono degli esempi applicativi esistenti delle soluzioni proposte e si elabora infine una possibile soluzione per contrastare l'insabbiamento nel porto turistico di Ancona e cercare di ridurre al minimo gli interventi di dragaggio che interrompano la viabilità e compromettono la funzionalità del porto.

## Cap. 1 L'ambiente costiero

### 1.1 Introduzione

Il litorale costituisce un ambiente di transizione fra terraferma e mare. La linea di costa non è fissa ma cambia nella forma e posizione durante il corso dei giorni e degli anni. La scala temporale di questi cambiamenti varia da tempi geologici al singolo periodo di un'onda; la scala spaziale varia da una grandezza di un continente alla lunghezza d'onda di una ripple di sabbia. Nella scala temporale geologica, il cambiamento della posizione della riva è governato dai movimenti crostali terrestri e dalle variazioni del livello medio mare, associate ai cambiamenti climatici.

Sebbene i processi relativi ai tempi geologici siano responsabili delle strutture geologiche fondamentali della costa, il principale interesse degli ingegneri marittimi è legato alle variazioni a breve e medio termine, causate da onde e correnti.

La scala temporale deve essere quindi alla durata della vita umana e a quella di manufatti costieri.

Negli ultimi decenni l'utilizzo delle aree del litorale per attività antropiche ha subito un trend crescente e le frequenti severe condizioni di erosione hanno imposto una maggiore coscienza e conoscenza della fenomenologia costiera.

### 1.2 Morfologia e trasporto solido

La spiaggia è definita come una zona costituita da sedimento non consolidato che si estende, verso mare, dalla posizione della massima profondità dell'acqua dove avviene un rilevante cambiamento del fondo, verso terra, fino al limite dell'intrusione del mare associata all'azione d'onda di tempesta e all'area delle dune (se sviluppate).

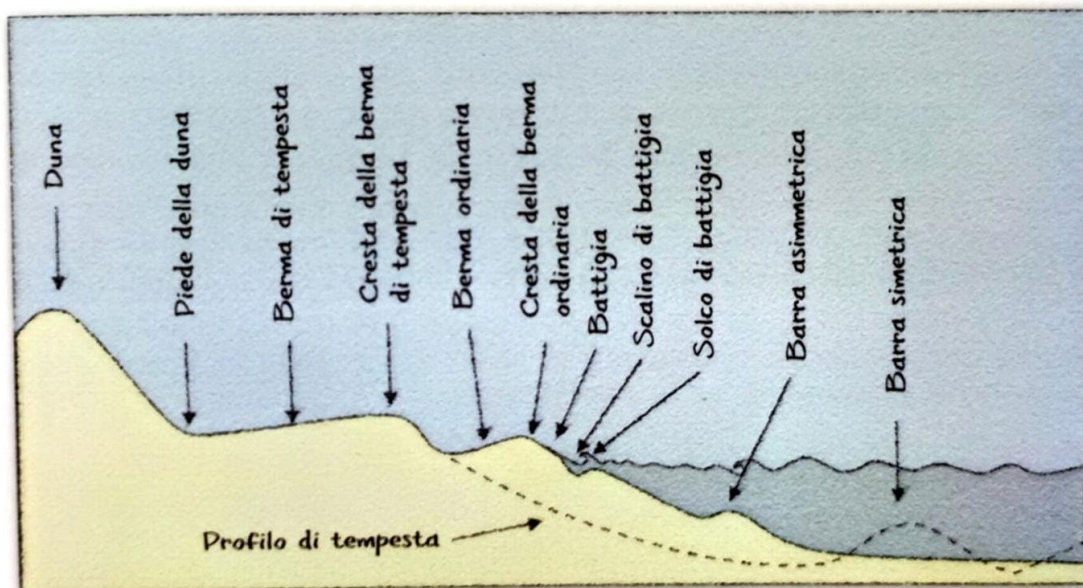


Fig. 1a: Il profilo di una spiaggia in condizioni di mare calmo e di tempesta

- Bar (barra o scanno): è una cresta sedimentaria sommersa costituita di materiale non consolidato solitamente parallela alle linee di riva;
- Beach face (fronte della spiaggia): è la sezione inclinata verso mare della spiaggia, la quale è esposta lo sciabordio dell'azione ondosa tutte le volte che questo è presente;
- Berm (berma): è una forma deposizionale subaerea costituita di sedimenti sciolti, avente la sua cresta appoggiata ad una quasi orizzontale o lieve pendenza verso terra;
- Scarp (scarpa): è una forma erosiva subaquea avente un brusco taglio verticale, anch'essa costituita da materiale non consolidato;
- Shoreline (linea di riva): è la linea di interfaccia terra-mare-aria
- Step (gradino): è una piccola scarpa sommersa formata dall'azione delle onde al margine del fronte di spiaggia;
- Trough (avvallamento): è una depressione del fondo posta tra la riva e la barra.

La morfologia della spiaggia e l'entità del trasporto solido sono gestiti dal naturale equilibrio dinamico e la trasformazione della spiaggia, principalmente stagionale, è caratterizzata da cicli annuali d'erosione ed accrescimento. Gli interventi dell'uomo e le strutture che egli costruisce sul profilo della costa, distruggono tale equilibrio, sarà quindi necessario ristabilirlo artificialmente.

I movimenti del fondale marino interessano principalmente le coste basse e sottili, le spiagge, costituite da depositi granulari, facilmente modificabili da agenti meteomarini morfodinamici agenti sui litorali.

I materiali granulari depositati sulle spiagge derivano principalmente dalla disgregazione delle rocce terrestri e vengono trasportati dai corsi d'acqua per ruscellamento fino alle foci, riducendosi di granulometria in funzione della loro durezza. Una volta che il sedimento raggiunge il mare tende a depositarsi a ridosso della foce sulla spiaggia, poi diventa oggetto di trasporto da parte dell'azione del mare (agenti meteomarini locali), quindi viene coinvolto nella *morfodinamica litoranea* governata dall'azione della corrente lungo costa.

Le onde sono in grado di sollevare i sedimenti e le conseguenti correnti li trasportano, dando quindi luogo ad un'azione modellatrice naturale delle spiagge.

Per motivi di praticità si distinguono fra le componenti trasversale e longitudinale, trattandole separatamente (ovviamente l'azione nella realtà è simultanea, con direzione incidente obliqua):

La corrente di trasporto solido trasversale alla riva ed alla battigia risulta modellare il profilo trasversale della spiaggia (sia emersa che sommersa)

La corrente di trasporto solido longitudinale (lungocosta) risulta diretta secondo la componente longitudinale della direzione delle onde incidenti presenti. Il verso del trasporto solido lungo costa predominante risulterà proprio concorde alla componente longitudinale delle mareggiate più importanti nel paraggio marino di interesse.

Modellazioni di questo tipo hanno scale temporali medio-lunghe. (Ordine degli anni)

---

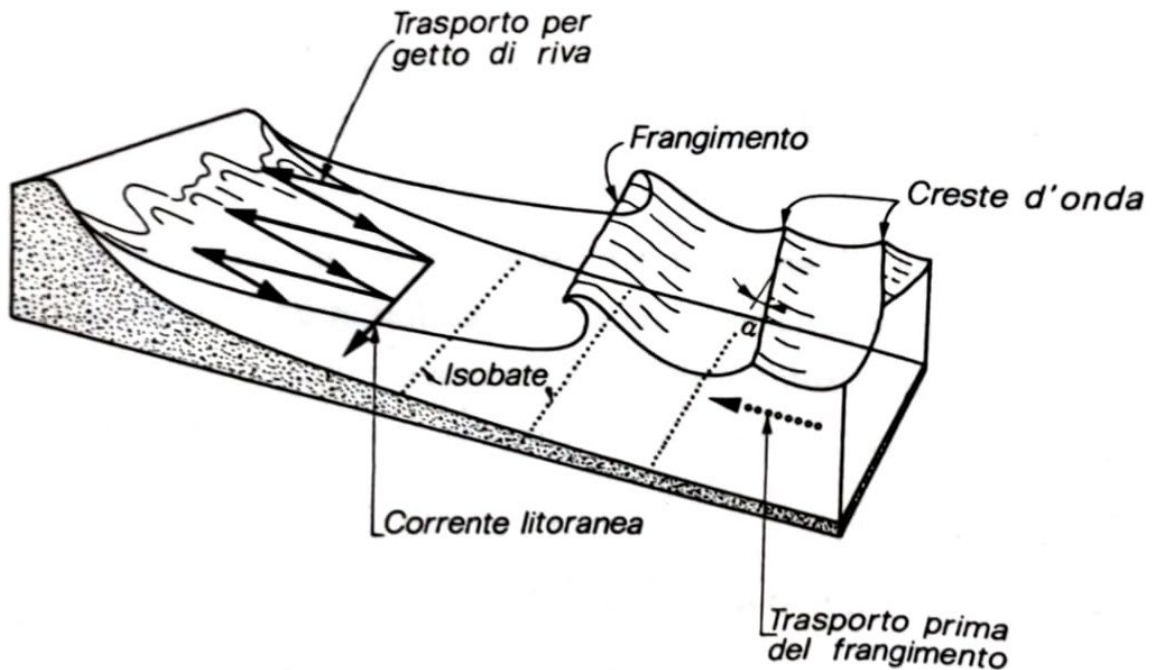


Fig. 1b Le azioni del mare

La corrente di trasporto solido lungocosta si sviluppa principalmente sottocosta, nella fascia dei frangenti e risulta responsabile delle variazioni planimetriche della spiaggia (in particolare delle linee batimetriche e di riva) che determinano problemi di eccessivo insabbiamento dei bacini portuali ma anche di erosione dei litorali sottoflutto delle opere, che creano enormi problemi di gestione e manutenzione a porti marittimi e spiagge, che si cerca di contrastare. L'insabbiamento portuale si combatte con operazioni di dragaggio, sempre più straordinarie. Per limitare il fenomeno le bocche portuali sono costruite a largo della zona dei frangenti.

### 1.3 L'importanza di conoscere l'entità del trasporto solido nella progettazione di opere portuali

Le disposizioni adottate per le opere esterne dei porti dipendono da vari fattori. Che possono essere elencati in:

- Destinazione ed importanza del porto
- Natura e conformazione delle coste
- Esposizione del paraggio ai venti, al moto ondoso, alle correnti ed altri fattori meteo-marini
- Movimenti dei materiali di fondo, in particolare riguardo al problema del mantenimento delle profondità portuali nel tempo.

Il quarto punto è particolarmente determinante in fase progettuale, in quanto il verificarsi del fenomeno può comportare, oltre a un rilevante onere economico per la sua eliminazione, la periodica inagibilità di una parte o di tutto lo specchio portuale. Anche se difficilmente si arriva all'inagibilità completa, restano notevoli gli inconvenienti apportati al normale svolgersi dei traffici a causa della presenza di draghe destinate ad eliminare il materiale depositato nel porto.

È di fondamentale importanza valutare gli oneri di dragaggio ricercando un minimo costo complessivo, a volte questa delicata fase progettuale può evidenziare l'inopportunità della localizzazione prescelta per l'insediamento portuale e abbandonarla completamente a favore di un'altra. È quindi necessario stimare la grandezza del trasporto litoraneo (per far ciò si ricorre, pur tenendo conto dei limiti delle approssimazioni, a modelli matematici o a prove su modello fisico).

In primo luogo, si distinguono coste senza trasporto litoraneo predominante e coste con trasporto litoraneo predominante.

Nel primo caso i fenomeni di interrimento sono relativamente ridotti; tuttavia, è comunque necessario spingere le testate dei moli ad una profondità tale da ridurre al minimo l'ingresso diretto di materiale rimosso e trascinato dalle onde, fenomeno temibile particolarmente nelle fasi di frangimento o successi ve (zona dei frangenti), per questo la bocca del porto è sempre costruita più a largo della linea di primo frangimento.

È per altro impossibile evitare un certo interrimento dovuto al materiale, messo in sospensione durante le mareggiate, che, trasportato da correnti di debole intensità, dovute ad esempio al solo effetto delle maree, si deposita all'interno dello specchio portuale.

Nel caso di prevalenza delle azioni lungo un verso del litorale si formano zone di deposito a ridosso delle opere foranee e al limite penetrazione e di materiale oltre l'imboccatura del portuale: in tali casi è quindi opportuno prevedere in sede di progetto un onere di drenaggio.

Nel caso di azione del moto ondoso prevalentemente obliqua rispetto alla linea di costa, la presenza di opere portuali interrompe il trasporto solido e altera l'equilibrio del litorale. È inevitabile un procedimento a monte ed un arretramento a valle delle opere (**FIG.3c**). Una volta pervenuto all'estremità delle opere stesse, il deposito tende ad ostruire la bocca del porto.



Per ritardare il raggiungimento di tale condizione è opportuno, in linea generale, studiare il tracciato delle opere in modo da consentire facilità di dragaggio dell'imboccatura; valutare la possibilità di ripristinare il transitto interrotto con tubazioni aspiranti la sabbia da una parte e riversanti la stessa dall'altra (**Fig.2**); studiare le eventuali possibilità di rinforzo di piccole correnti locali o delle correnti legate al moto ondoso stesso (**Fig.3a**), capaci di trascinare al largo, a profondità non ostacolanti la navigazione, il materiale sedimentato. In tale senso la presenza di una corrente litoranea può essere, in particolari casi, favorevole; essa può essere rinforzata con opportuno tracciato di opere (ad esempio con una disposizione a moli convergenti **Fig.3B**) e trascinare al di là dell'imboccatura il materiale trasportato. Come contropartita si ha una maggiore difficoltà di entrata delle navi. Anche nel caso dei porti canali, in presenza di una corrente litoranea, si è data talvolta una forma leggermente arcuata alla diga esterna (**Fig. 4**) per aumentare l'efficienza dell'azione di cacciata delle correnti di marea.

I tentativi di evitare i depositi lasciando dei fori o dei varchi alla radice delle opere foranee sono invece sempre falliti in quanto l'attenuazione delle velocità di trasporto all'interno del porto conduce sempre una sedimentazione del materiale passato attraverso i varchi stessi (**Fig.5**) questi fra l'altro possono favorire l'ingresso di una certa agitazione ondosa.

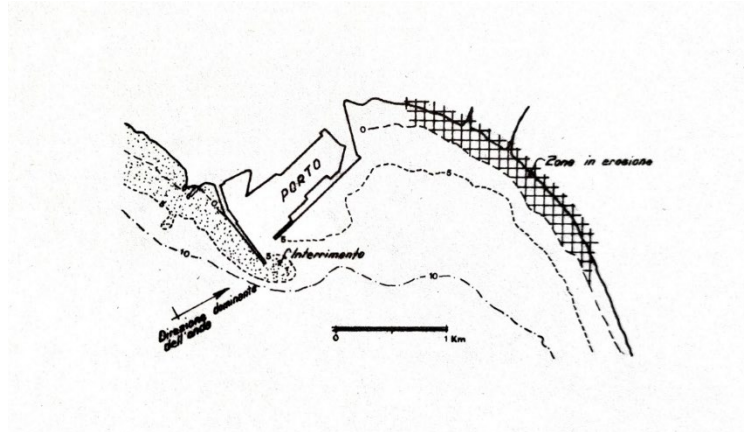


Fig. 3c Effetto tipico di un'opera portuale nel caso di presenza di un trasporto litoraneo di materiale

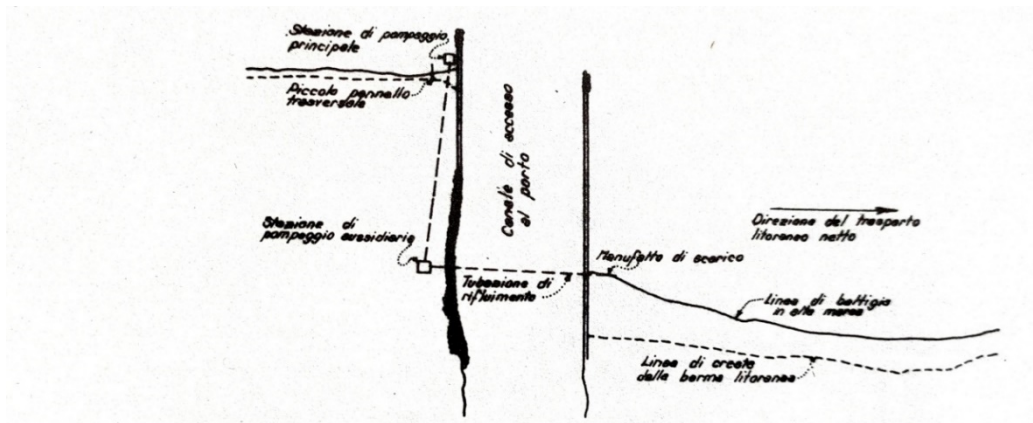
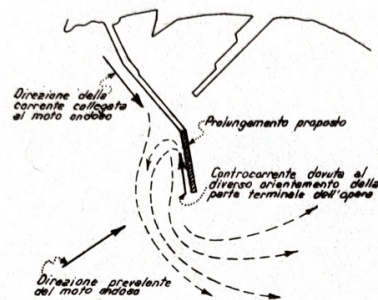
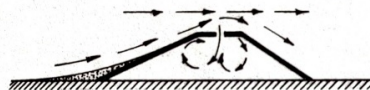


FIG. 2 - Ricostituzione del trasporto litoraneo per mezzo di un sistema meccanico di trasferimento della sabbia dalla parte in accrescimento alla parte in erosione



a) Disposizione particolare delle opere foranee per disperdere verso il largo il trasporto litoraneo



b) Porto a moli convergenti provocanti un rafforzamento locale della corrente litoranea, atto mantenere sgombra la bocca

FIG. 3 - Utilizzazione di una corrente litoranea per evitare A e B zone di deposito l'interrimento di imboccature portuali

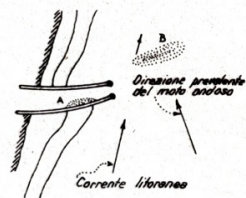


FIG. 4 - Configurazione di una imboccatura portuale per allontanare la zona di deposito del materiale trasportato dalla corrente litoranea

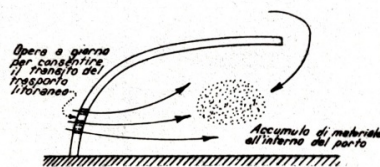


FIG. 5 - Risultato finale di un'errata soluzione studiata per evitare l'interrimento di un porto

## Cap. 2 Il trasporto dei sedimenti

### 2.1 Introduzione

I sedimenti depositati sul fondale Marino sono soggetti, come già detto, alle forze che l'acqua esercita ad opera delle onde e delle correnti.

Quando tali forze raggiungono un valore limite di equilibrio, sia a inizio del movimento dei grani.

Tuttavia, il loro peso è ancora in grado di mantenerli in contatto con il fondo o comunque in una ristretta fascia a ridosso del fondo.

Si genera così il trasporto al fondo caratterizzato da rotolamento, salti e scivolamento dei grani.

Allorché le forze esercitate dal fluido crescono ancora, si raggiunge una condizione limite caratterizzata dal raggiungimento della velocità di risalita pari a quella di sedimentazione.

In questo momento i grani cominciano ad andare in sospensione, ad allontanarsi considerevolmente dal fondo e ad essere sospinti dalla velocità della corrente: il trasporto in sospensione.

Un ruolo fondamentale nella sospensione dei sedimenti è svolto dalla turbolenza e dai vortici turbolenti che si generano al fondo ad opera della scadenza dei grani della scabrezza dovuta alle forme del fondo come i ripples.

In generale si può affermare che le onde sono le maggiori responsabili della messa in sospensione dei sedimenti, soprattutto grazie al fenomeno del frangimento e che le correnti giocano un ruolo principale nel mantenimento in sospensione e nel trasporto vero e proprio.

### 2.2 L'azione delle correnti sui sedimenti

Ci sono quantità di variabili veramente grandi che possono influire sulla velocità minima di una corrente necessaria per porre in moto un determinato materiale di fondo: ha grande importanza la composizione granulometrica ed in particolare la presenza di limi o fanghi nel corpo delle sabbie, quest'ultimo fattore innalza considerevolmente la velocità della corrente necessaria per porre in movimento le sabbie. D'altro canto, la presenza di argille nell'acqua diminuisce la velocità di caduta dei granuli, perciò le sabbie sottili e sollevate da vortici in acque contenenti limo sono più facilmente trasportate dalle correnti.

Le correnti marine di velocità ordinaria hanno prevalentemente direzioni orizzontale e non sono quindi in grado di mantenere in sospensione i granuli poiché in essa la velocità di caduta di un grave è uguale a quella che si osserva in acqua calma. La loro azione di trasporto si può quindi realizzare solo in presenza di azioni vorticoso sul fondo in grazia delle quali i granelli sollevati dalle cause perturbatrici sono trascinati dalle correnti durante la loro caduta.

In conclusione, in uno strato di sabbia sottoposto sperimentalmente all'azione di una corrente orizzontale crescente, fino ad un certo valore della velocità non si ha nessun movimento di granuli, ma se intervengono fenomeni locali capaci di innalzare verticalmente gli elementi sabbiosi, essi sono spostati anche dalle correnti più deboli. Con l'ulteriore aumentare della velocità il movimento avviene anche in assenza di moti perturbanti, pur assumendo però in questo caso un carattere non continuativo e procedendo ciascun granello per sobbalzi; in questa fase si formano sul fondale le caratteristiche ondulazioni a cresse della superficie o "ripple marks", aventi generatrice normale alla direzione del moto.

Reynolds chiama "carico limite" la quantità di materiale che può trasportare una corrente di data velocità; il carico limite varia con le dimensioni del peso specifico dei granuli.

(le correnti di marea hanno in qualche caso notevole capacità di trasporto come, ad esempio, nello Stretto di Messina dove assumono grande importanza nella distribuzione dei sedimenti in quella zona, capaci infatti di produrre spostamenti di massa di ghiaia media e sobbalzamento di ciottoli)

### **2.3 L'azione del moto ondoso sui sedimenti**

il moto ondoso, con la sua azione diretta ed indiretta sui sedimenti, è l'agente principale nella distribuzione dei materiali detritici sulla piattaforma litoranea.

Nella realtà il fondale è quasi sempre costituito da sabbia o ghiaia, cioè da materiali in cumulo con forte percentuale di vuoti. Esso è perciò ben distante dall'essere impermeabile come invece si assume spesso in certi modelli.

Al procedere dell'onda sul fondale, per effetto delle diverse pressioni a cui il manto sabbioso è sottoposto in seguito alle variazioni di livello della superficie liquida, si genererebbe in esso una circolazione di acqua con la conseguenza che il granello verrebbe, oltre che fatto oscillare parallelamente al fondo, anche sollevato da esso.

Inoltre, per effetto della maggiore rapidità della cresta dell'onda nella metà anteriore rispetto a quella posteriore, il granello sarebbe anche soggetto ad una spinta nel senso di propagazione dell'onda. Il meccanismo indicato darebbe ragione, di spostamenti di materiali di fondo altrimenti incomprensibili e spiegherebbe la perdita di energia del moto ondoso nel propagarsi su fondali sabbiosi anche notevolmente omogenei.

La profondità limite in cui si può verificare il movimento di materiali e quella per la quale la turbolenza generata dalle oscillazioni delle molecole sul fondo è sufficiente da sollevare il materiale ed aumenta con il diminuire delle dimensioni dei granuli.

Un secondo ordine di fenomeni si svolge nella zona di frangenti: in questa fase tutta l'energia cinetica e potenziale di cui ancora dispone l'onda viene dissipata in fenomeni vorticosi che hanno una notevolissima capacità di trasporto sui sedimenti.

Nel caso di fondo dolce pendenza è frequente la formazione di due o più linee di frangenti, dopo ciascuna delle quali l'onda procede attenuata sino a che non si verificano le condizioni per la formazione del frangente successivo. In prossimità della linea di battigia l'onda frange definitivamente, rovesciandosi in avanti con il getto caratteristico.

Nel caso di fondo con sensibile pendenza o più ancora nel caso di forte pendenza, il fenomeno del frangimento avviene invece bruscamente in energia contenuta nell'onda è violentemente liberata in una striscia sempre più ristretta. In tal caso si assiste a fenomeni di zappatura del fondo con conseguenti ingenti movimenti di materiali anche grossolani.

## **2.4 L'azione combinata del moto ondoso e delle correnti nel trasporto trasversale**

Nel profilo trasversale generico si possono distinguere tre zone:

Nella prima di esse, procedendo da terra verso il largo, il movimento dei sedimenti è dovuto prevalentemente ai frangenti.

Nella zona successiva l'azione del moto ondoso è limitata all'oscillazione delle molecole sul fondo che spostano i granuli direttamente, fino ad una certa profondità, e indirettamente oltre di essa, in concomitanza con le correnti.

Infine, la terza zona è quella che non risente più dall'azione del moto ondoso, cosicché la distribuzione dei sedimenti avviene ad opera solo delle correnti.

Nell'ambito della prima zona si svolgono le azioni di trasporto più appariscenti.

I limiti tra le zone dipendono dall'esposizione del paraggio.

In sintesi, l'azione del moto ondoso spinge sempre i materiali verso la riva, cioè, ne impedisce lo scoscendimento mentre l'azione della corrente sollecita sempre i granuli a discendere verso gli abissi salvo casi particolari di correnti di marea.

Nella seconda zona le correnti generate dal moto ondoso perdono gradatamente di importanza e divengono prevalenti quelle di densità, le quali hanno le direzioni più varie.

In sostanza, in una sezione trasversale il trasporto dei materiali per effetto del moto ondoso si verifica sempre verso terra, ma in conseguenza della presenza di altre forze (correnti e gravità) ciascun tipo di materiale è dal complesso delle altre forze sollecitato a discendere lungo la scarpata, ma solo fino alla posizione che ad esso compete a seconda delle sue caratteristiche (volume e peso specifico) in relazione alla pendenza del fondo e all'intensità dell'azione marina. In conclusione, il moto ondoso, per quanto riguarda il trasporto trasversale, esplica sempre un'azione benefica sulla stabilità dei sedimenti soggetti al complesso delle forze marine.

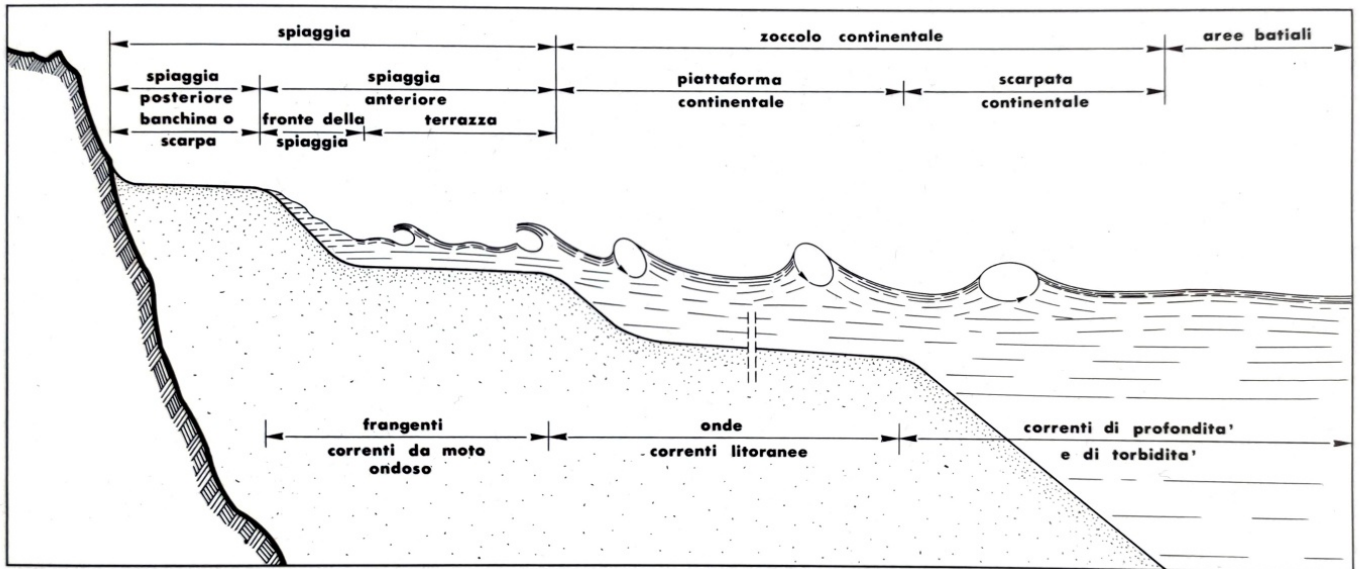
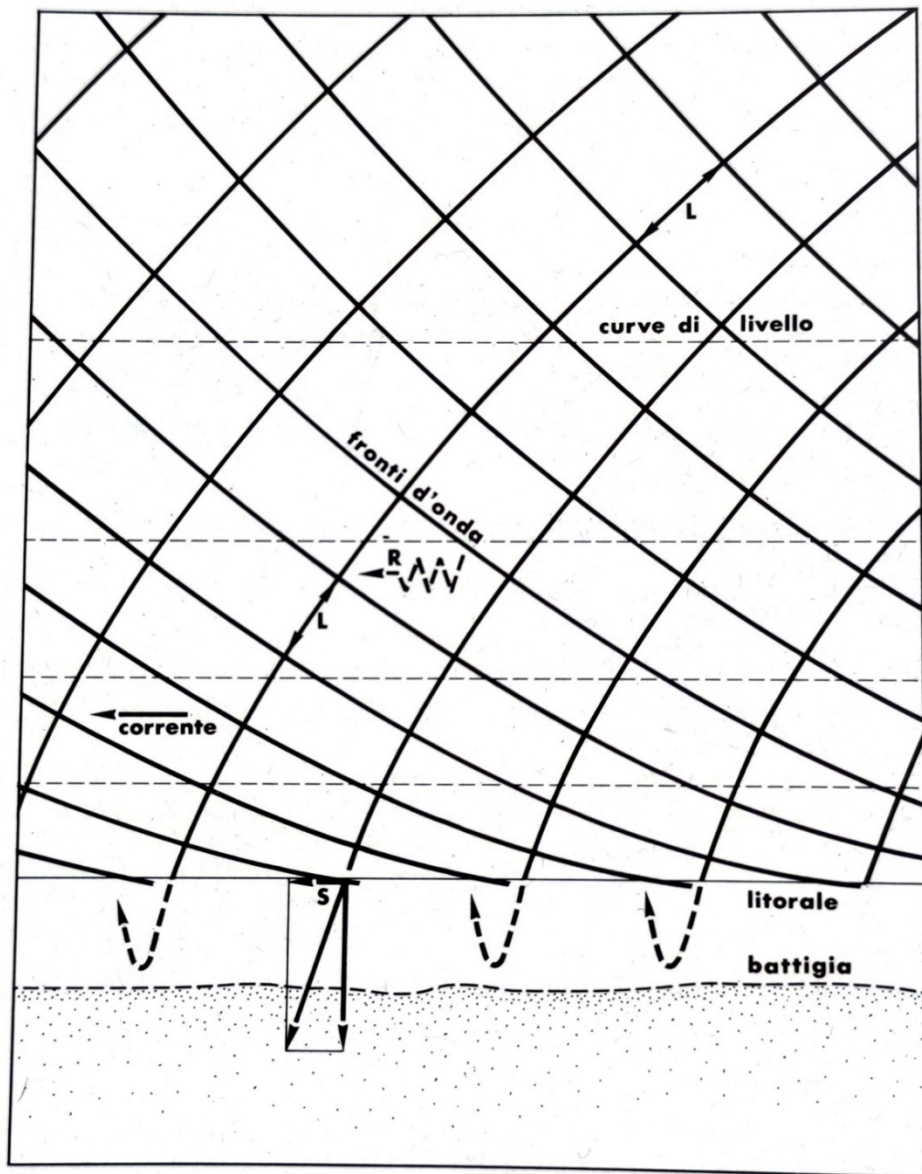


Fig.6: Procedendo da terra verso il largo lungo il profilo trasversale della spiaggia e dello zoccolo continentale, il movimento dei sedimenti è dovuto nell'ordine ai frangenti e correnti da moto ondoso, alle correnti litoranee ed onde di oscillazione ed alle correnti di profondità e di torbidità.

Qualunque particolarità della costa che possa, in qualche modo, attenuare, anche solo localmente, lo stato di moto delle acque, provocherà un deposito di almeno una parte (la più grossolana) del materiale trasportato, discorso simile è applicabile alla zona di calma create con i porti che favoriscono il deposito del materiale sospeso con conseguente insabbiamento.

**Il trasporto longitudinale:** Le onde per effetto della rifrazione nei bassi fondali modificano la loro direzione di propagazione tendendo a disporsi parallelamente alla riva, ma nella generalità dei casi mantengono un certo angolo con la direzione della battigia. Si può perciò immaginare di scomporre le forze generate dall'energia liberata dell'onda durante il frangimento nelle due direzioni della normale della parallela alla riva. L'effetto complessivo di un treno di onde sarà quindi uno spostamento longitudinale di sabbia lungo il litorale, nel senso della componente parallela la battigia.



- Le onde, angolate rispetto alla spiaggia, spostano i materiali di fondo lungo la battigia con i getti alla riva nella zona dei frangenti (componente S), con l'oscillazione delle molecole di fondo (componente R) e con le correnti generate dal moto ondoso stesso.

Sull'intero fenomeno del trasporto longitudinale hanno un'influenza decisiva le correnti da moto ondoso.

Il regime di trasporto longitudinale presenterà aspetti diversi a seconda dei differenti profili di equilibrio del fondale, che si stabiliranno per effetto dei vari tipi di agitazione. Con onde lunghe si avrà un predominare del trasporto da parte del getto alla riva e per vibrazione delle particelle del fondo, mentre con onde ripide, in conseguenza del diverso profilo che assume il fondo, si assisterà

al prevalere del trasporto per effetto della corrente longitudinale generata dal moto ondoso. Il trasporto litoraneo longitudinale è proporzionale all'energia contenuta nell'onda e alla frequenza delle mareggiate. Così, a differenza di quanto accade in altri casi, tutte le agitazioni hanno importanza anche se la loro intensità è limitata e può accadere che agitazioni secondarie per intensità ma di alta frequenza, abbiano un effetto prevalente.

## 2.5 Influenza della pendenza del fondo

La quasi totalità delle formule proposte nel corso degli anni derivano da esperimenti ed osservazioni condotte con fondo orizzontale o pendenza inferiore allo 0,001.

Bisogna subito distinguere il caso di:

- pendenza longitudinale (linee di massima pendenza allineate con la direzione della corrente)
- pendenza trasversale (linee di massima pendenza parallela al flusso della corrente)

Smart (1984) condusse esperienze di laboratorio su canali con fondi inclinato longitudinalmente dimostrando che il trasporto subiva un netto incremento.

La pendenza influisce sul meccanismo di trasporto con tre diverse modalità:

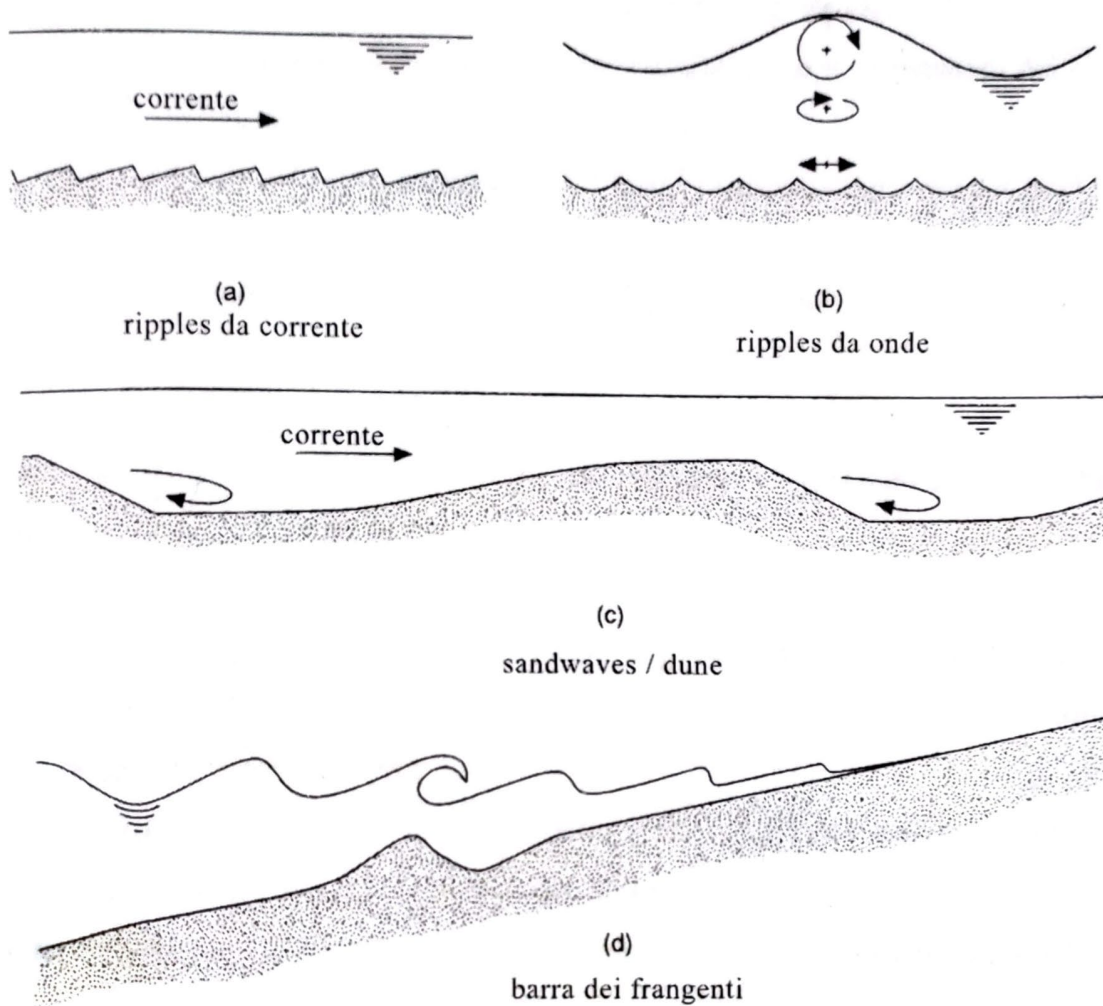
- viene influenzata la velocità locale in vicinanza del fondo
- vengono modificate le condizioni di inizio movimento
- la velocità di trasporto, mossi sedimenti e dal fondo, viene modificata



## 2.6 Influenza delle forme del fondo

Una caratteristica universale nei fiumi, negli estuari ed in mare è la tendenza dei fondali sabbiosi a creare diverse forme sul fondo a seconda del tipo di flusso che le genera.

La principale forma nei fondali sabbiosi sono i ripples: andamento ondulato del fondale con dimensioni caratteristiche (altezza e lunghezza) trascurabili rispetto alla profondità.



*Forme del fondo ( Soulsby, 1997 ).*

Queste influenzano in modo considerevole le caratteristiche funzionali del fondo sul fluido e il livello di turbolenza del fluido stesso.

Entrambi gli aspetti si ripercuotono direttamente sul trasporto solido.

Va tuttavia precisato che:

---

- Le forme del fondo si generano solo nel momento in cui vengono superate le condizioni critiche di inizio movimento
- Se le caratteristiche del fondo non sono sufficienti a garantire la movimentazione dei sedimenti, le forme del fondo sono quelle che erano state formate allorché la corrente era in grado di mettere in movimento i grani
- Per sedimenti con  $d > 0,8$  mm non si formano i ripples
- Sandwaves si formano invece qualsiasi siano le dimensioni di sedimenti
- Ad alte velocità (maggiori di 1,5 m/s) i ripples scompaiono per lasciare un fondale liscio
- In zone marine con alti livelli di attività biologica, i ripples possono scomparire nel giro di poche ore a causa degli esseri viventi

Un'altra forma del fondo che presenta notevole influenza sul trasporto solido è la barra sommersa (presente soprattutto nei mesi invernali).

Essa si forma naturalmente come meccanismo di difesa dall'erosione, attraverso una locale riduzione di profondità, viene indotto il frangimento più al largo rispetto ad un fondale liscio con dissipazione di energia ondosa che viene a mancare in seguito quando l'onda raggiunge la linea di costa.

Per una particella sedimentata l'inizio del movimento è causato da una forza di attrito dalle fluttuazioni turbolente sotto flusso alle creste dei ripples. Quindi lo sforzo tangenziale critico in presenza di forme di fondo risulta sempre maggiore rispetto al caso di fondo liscio.

## 2.7 Considerazioni sul trasporto solido

Le variabili da cui dipende il trasporto, concludendo sono:

- l'intensità e la frequenza dell'agitazione
- la pendenza del fondo
- il tipo e la distribuzione del materiale sul fondo
- la presenza di correnti e la loro direzione.

Risulta quindi difficile enunciare un'espressione matematica che consente di determinare il trasporto probabile di materiale lungo costa e tanto più la sua composizione.

Eminentissimi studiosi si sono tuttavia cimentati nella ricerca di una formula per il calcolo del trasporto solido in particolare le esperienze di Larry hanno dimostrato che il volume di trasporto decresce con il crescere della ripidità delle onde.

Le formule ricavate da tali studiosi per il trasporto litoraneo hanno più che altro una valenza concettuale e mentre sono senz'altro valide per un'indicazione qualitativa sul trasporto, non forniscono valori quantitativi sicuri.

## Cap. 3 Effetti di alcune opere rigide artificiali sulla costa

### 3.1 Effetto di un oggetto qualsiasi sulla costa

In figura è tratteggiato l'effetto che può provocare un oggetto qualsiasi, ad esempio, un molo perpendicolare alla costa. Essendo il flusso detritico rivolto da sinistra verso destra, la costruzione del molo in B costituisce un ostacolo al fluire dei materiali. Si verifica perciò un avanzamento della battigia in B che si propaga gradualmente verso A. Nella zona sottoflutto, almeno in un primo periodo, si ha una diminuzione del flusso di materiale, perciò, nell'arco CD si verifica erosione.

Tuttavia, uno stesso manufatto disposto normalmente alla battigia su una stessa spiaggia può, in diverse condizioni di agitazione, comportarsi in modo opposto a seconda della direzione di provenienza delle onde e quindi del trasporto litoraneo. In figura si tratteggia l'effetto che può provocare un oggetto qualsiasi.

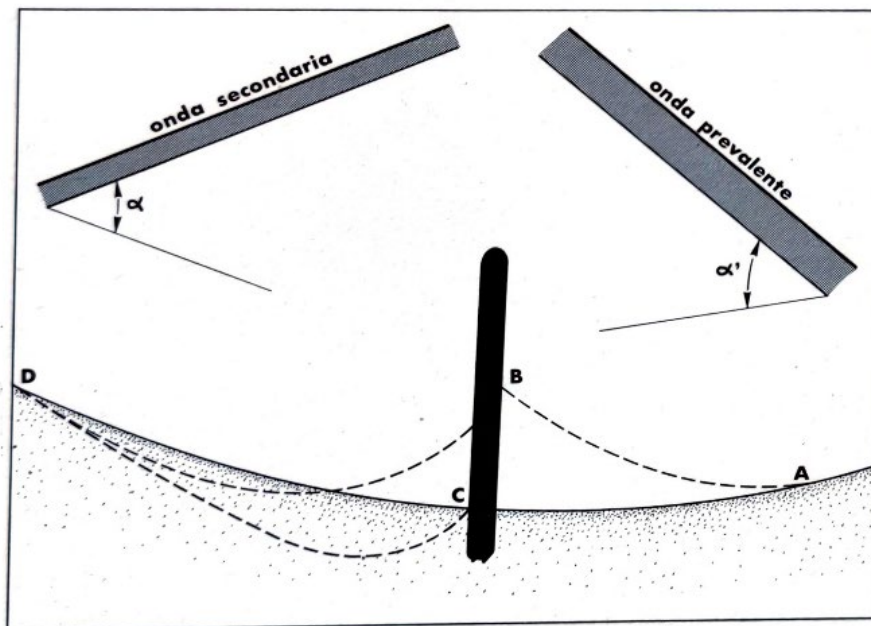


Fig. 7 effetto di un oggetto sulla costa

### 3.2 Effetto di un ostacolo distaccato dalla costa

Un'isola o una scogliera o un qualunque ostacolo emergente disposto di fronte alla spiaggia ma distaccato da essa, provoca modifiche sulle caratteristiche delle onde e sul loro frangimento e quindi sul meccanismo di trasporto litoraneo. La conseguenza dell'ostacolo sull'equilibrio del litorale sarà in genere, quella di favorire un deposito di materiale nel tratto ridossato rispetto all'agitazione dominante e di privare dell'alimentazione il tratto di lido sottoflutto.

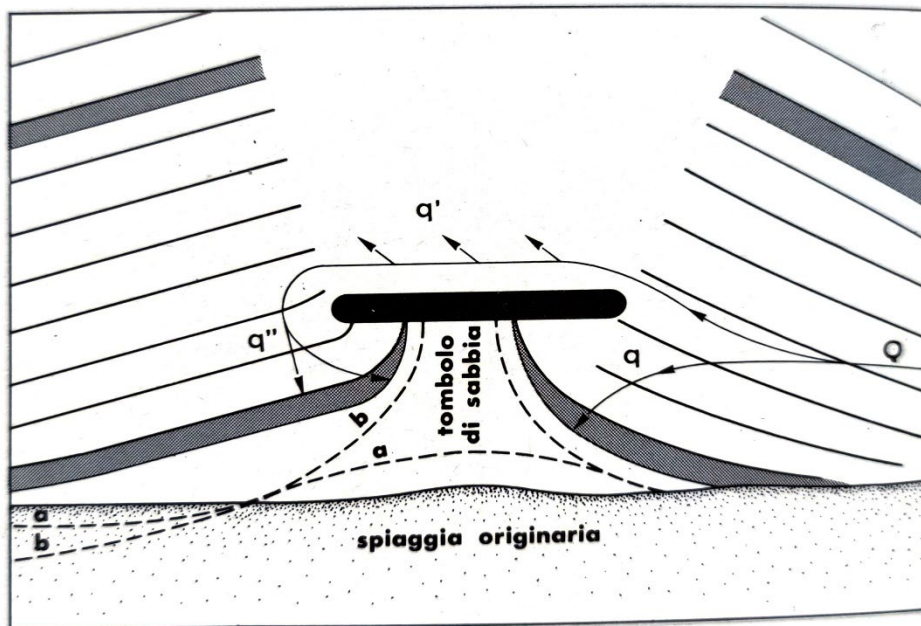


Fig. 8 modifiche indotte da una scogliera isolata, nei fronti d' onda e nella linea di spiaggia

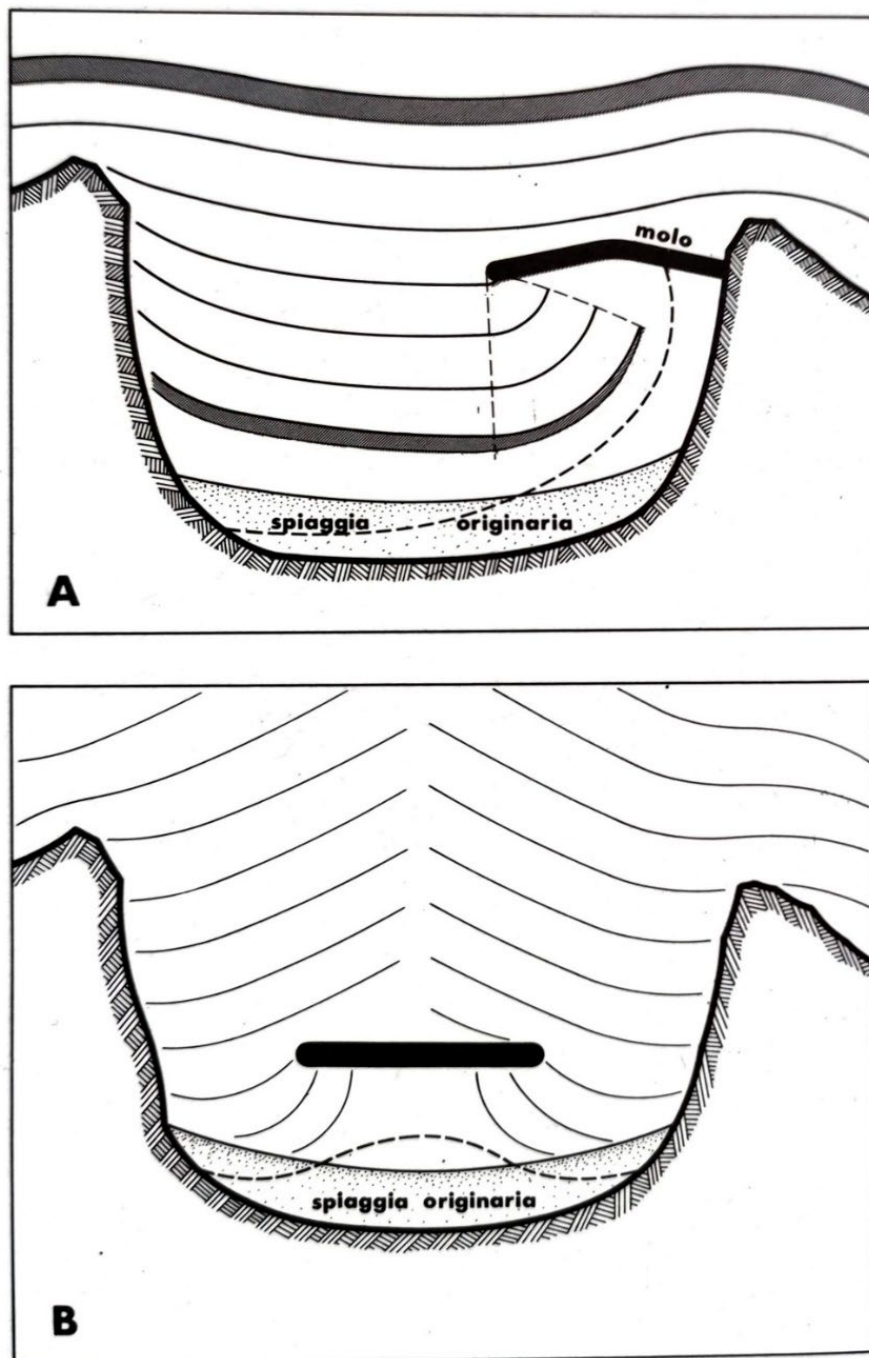


Fig. 9 Schema delle variazioni indotte da un molo (A) o da una scogliera parallela (B) in una spiaggia con prevalente trasporto trasversale.

### **3.3 Effetti di un molo che modifica i fronti d'onda**

Si supponga di costruire un molo come indicato in figura A, in una spiaggia a prevalente trasporto trasversale: in conseguenza del cambiamento di direzione dei fronti d'onda, si instaurerà la tendenza ad un nuovo equilibrio con erosione della spiaggia da un lato e imbonimento dall'altro. Questo genere di fenomeno è sempre accompagnato da una differenziazione della granulometria nei due settori della spiaggia. nel caso dell'esempio il materiale più sottile si andrà raccogliendone nella parte ridossata dal molo in quanto solo in quella zona potrà verificarsi il deposito (in quanto zona di calma). Nella parte esposta la spiaggia andrà in corrosione e rimarrà costituita dalla frazione più grossolana. Ciò avrà per conseguenza anche un addolcimento del profilo nella parte ridossata con corrispondente accentuarsi della pendenza nell'altra. In sostanza la costruzione del molo instaura una tendenza in tutto l'arco verso un nuovo equilibrio che potrà essere raggiunto attraverso una successione di eventi che interesserà un tempo generalmente abbastanza lungo.

Gli effetti descritti per la costa avvengono anche in riferimento ad opere di difesa portuali, con conseguenti squilibri delle profondità degli specchi acquei del porto e del profilo delle coste adiacenti al porto.

### **3.4 Difese trasversali o pennelli**

Sono tra le strutture più antiche a cui l'uomo ricorre nel suo intento di difendere le coste o evitare l'interramento dei porti. Esse si trovano realizzate ovunque nel Mediterraneo con l'uso dei materiali più svariati, a seconda di ciò che più facilmente poteva offrire la costa.

L'efficacia di queste strutture è fuori discussione, quando il trasporto avviene prevalentemente per trazione, il pennello è in grado di imporre alla spiaggia una linea evolutiva che, almeno teoricamente, è perfettamente prevedibile. (L'evoluzione che una serie di pennelli induce nella posizione linea di battigia e nell'andamento dei fondali antistanti è tale da far diminuire il trasporto litoraneo: infatti l'angolo tra il fronte d'onda e la linea di battigia viene diminuito, frazionando la linea di spiaggia in tante curve e spezzate.)

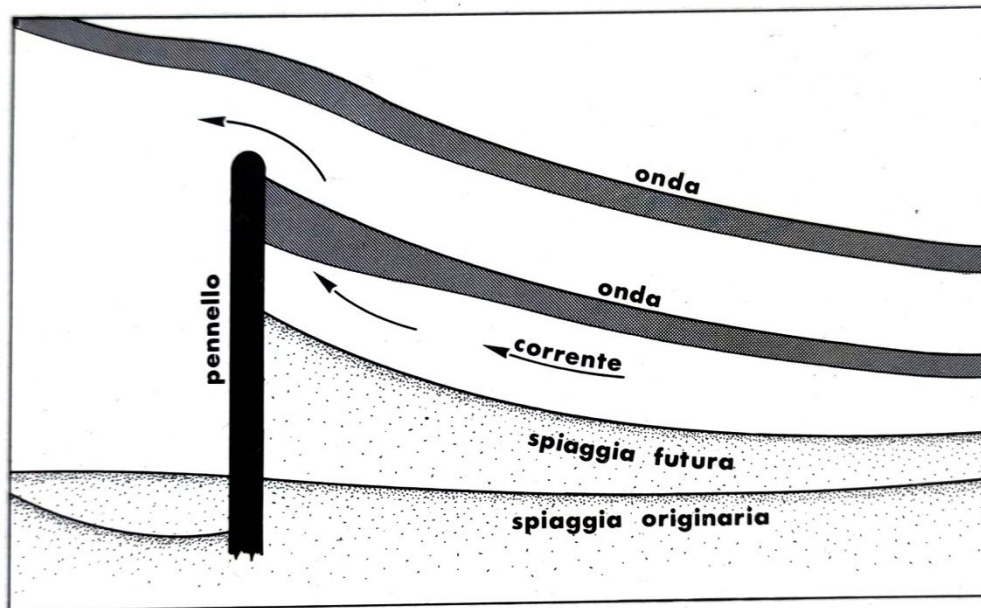


Fig.10 La concentrazione di energia in corrispondenza della radice di un pennello, provoca sopraflutto un aumento della granulometria della ripidità della spiaggia

Se è vero che con un pennello in regime di trasporto per trazione si può ottenere un rallentamento del flusso longitudinale e far avanzare la linea di battigia, non bisogna dimenticare che esso come contropartita implica un peggioramento granulometrico della spiaggia e la perdita di una certa quantità di materiale per le spiagge sottoflutto. Al primo di questi inconvenienti, si può porre solo parzialmente rimedio con accorgimento di orientare opportunamente la testata del pennello rispetto al moto ondoso predominante: l'inconveniente della concentrazione dell'energia sarà così in parte eliminato e con esso il decadimento granulometrico.

Non è invece possibile evitare la perdita di materiale di alimentazione della spiaggia sottoflutto.

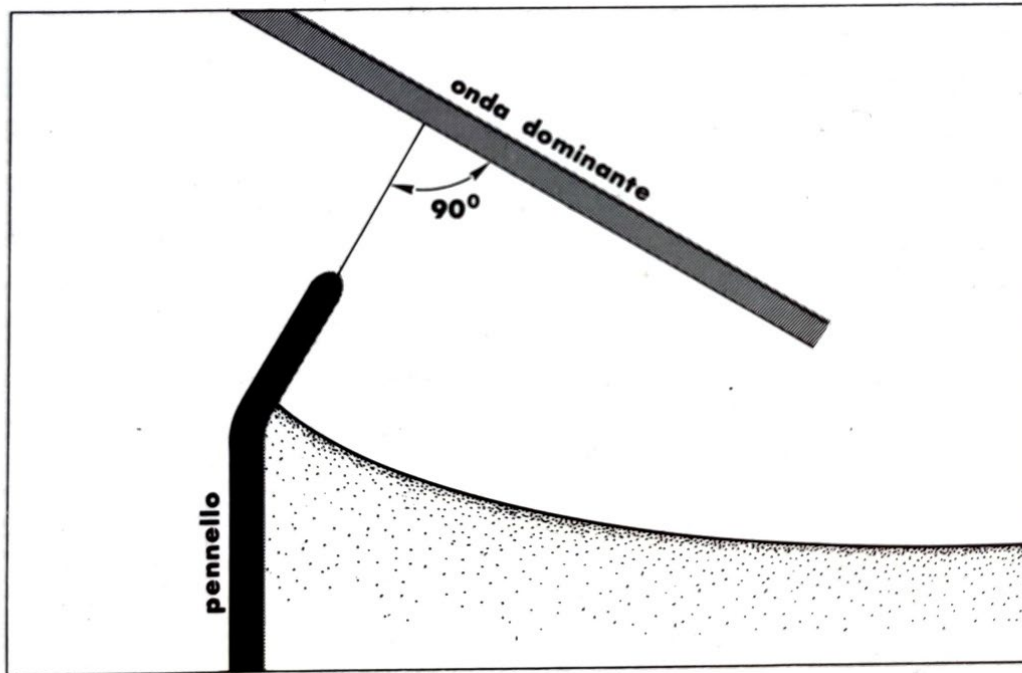


Fig. 11 Pennello orientato secondo l'onda dominante ad evitare il concentrazione di energia alla radice

Riassumendo, le strutture costiere responsabili della modificazione del trasporto dei sedimenti sono:

- A. Dighe, paratie e rivestimenti. Tali strutture parallele alla costa accelerano la perdita di sedimenti a causa dell'eccessivo lavaggio dovuto all'azione delle onde alla base della struttura verso il mare, specialmente nel caso di costruzioni vicine verticali
- B. Pennelli e pontili. Queste strutture di solito corrono perpendicolarmente alla riva e possono diventare trappole di sedimenti sul lato ascensionale. I pali dei pontili possono essere setacciati intorno alla base alterando il profilo e la dinamica della spiaggia.
- C. Canali di navigazione dragati. Tali canali possono diventare trappole di sabbia e privare la regione discendente del flusso di sedimenti portato alla sua progressiva erosione.
- D. Frangiflutti al largo. Questi sono posizionati a una distanza dalla costa e sono allineati approssimativamente parallela alla costa. Forniscono un ambiente a bassa energia tra la struttura e la spiaggia consentendo la deposizione senza alcuna grande alterazione della deriva del litorale.



## Cap. 4 Attività di dragaggio

Le attività di dragaggio consiste nell'eseguire uno scavo subacqueo di terreni o rocce. Tale attività si sviluppa in quattro fasi:

1. Scavo
2. Trasporto verticale
3. Trasporto orizzontale
4. Posizionamento o uso del materiale dragato

la visibilità durante le operazioni di dragaggio sono molto limitate visto che le operazioni si sviluppano sotto il livello del mare; nel tempo si sono sviluppate tecnologie sofisticate per poter visualizzare il lavoro.

Voi per definire la quantità o la zona da dragare, sono spesso utilizzati per i rilievi batimetrici sfruttando il ritorno del suono acustico, costruendo così la morfologia del fondale.

Per poter comprendere al meglio le condizioni in cui si opera, risulta necessaria la conoscenza dei materiali da dragare; quindi, metodi geologici geofisici e metodi di esplorazioni possono essere impiegati.

### 4.1 I mezzi di dragaggio

Per lo scavo subacqueo o dragaggio, vengono usati speciali natanti detti draghe. Essi possono essere equipaggiati con apparecchiature diverse:

1. **Draga a noria o catenaria di tazze** che consiste in uno scafo portante una catena di tazze che ruota con le tazze a contatto del fondo. È adatta per una vasta gamma di terreni. Il materiale scavato viene versato su di una betta. Questo tipo di draga è generalmente trainato. Il complesso è quindi formato da draga-rimorchiatore e betta e richiede un elevato numero di addetti, per cui questa attrezzatura è troppo onerosa per i piccoli porti.
2. **Draga a cucchiaia o badilone:** porta un'unica cucchiaia di capacità fino a 5-6 m<sup>3</sup>. I puntoni retrattili le permettono sia di fissarsi al fondo del mare, sia di avanzare. Questo tipo di draga è così in grado di effettuare lo scavo con grande precisione ed è stato soprattutto usato per l'escavazione di canali di piccola sezione per bassi fondali, può essere automotore ed è manovrato da un equipaggio poco numeroso adatto quindi anche per porticcioli.
3. **Draga benna mordente o gappo:** È costituito da un natante portante un Derrick (un dispositivo di sollevamento) con benna. Questa può essere a due o più valve, di capacità fino a circa 1 m<sup>3</sup>. Ha scarso rendimento, tuttavia è fra le attrezzature meno costose; infatti, trova frequentemente applicazione per piccoli porti.

4. **Draga spirante:** Il materiale viene aspirato dal fondale con l'ausilio di una tubazione immersa e di una pompa centrifuga. Il materiale aspirato può essere versato nelle tanche della draga stessa, che di solito è semovente e lo trasporta a scarica negli alti fondali o sottoflutto, oppure versato su di una betta o pompato direttamente in tubazione galleggiante, che può raggiungere la lunghezza di qualche chilometro fino alla scarica sulla riva sottoflutto. Queste tubazioni sono però da usarsi in paraggi riparati, non potendo resistere al moto ondoso. La testa del bulbo di aspirazione è spesso munita di un agitatore idraulico, cioè di un getto d'acqua in pressione per smuovere il materiale del fondo. Se il fondo è costituito di argille compatte, la testa viene integrata con un disgregatore rotante, o testa coltelli disgregatori.
  
5. **Impianto di dragaggio aspirante fisso.** Già visto nel porto di Carrara, per creare un by-pass adibito allo scavalco delle sabbie del fiume Magra. In esso la draga aspirante consiste in un braccio di aspirazione girevole, sistemato sulla testa circolare di un pontile, capace di aspirare circa 700 m<sup>3</sup>/h di miscela, in cui viene raggiunta una percentuale di sabbia del 15%. La miscela aspirata viene scaricata sottoflutto al porto e alle scogliere, sulla spiaggia di Marina di Massa, tramite una Fondazione di lunghezza di 5800 m ed il diametro di 250 mm, in cui viene spinta da una stazione principale di dragaggio e da quattro successive stazioni di spinta dette stazioni relè.

In questi impianti, per evitare deposizioni di sabbia nella condotta, occorre adottare un'alta velocità della miscela acqua-sabbia, da aumentarsi al crescere della granulometria. Perciò dovranno essere dotati di diametri relativamente piccoli. Ciò comporta un'attenta scelta del tipo delle tubazioni delle apparecchiature, ad evitare una rapida usura. Le forti perdite di carico conseguenti all'alta velocità di trasporto sono la ragione delle stazioni di pompaggio relè distribuite lungo la tubazione.

Per la raccolta della sabbia viene utilizzato un tubo di aspirazione con un numero adeguato di fori.

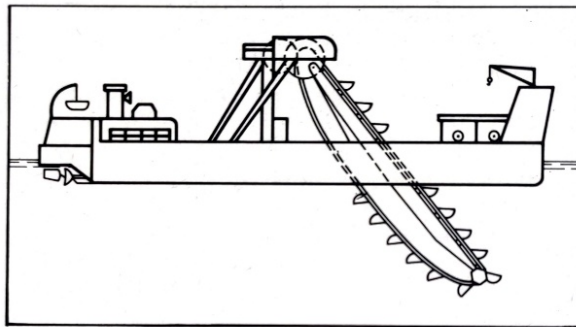
Attorno al tubo che aspira si forma una sorta di trincea.

Sotto il tubo di aspirazione sono installate uscite per getti d'acqua per fluidificare la sabbia circostante e affondare il tubo di aspirazione. Quando la pompa per liquami viene avviata, una miscela di sabbia fluidificata e acqua di mare scorre nel tubo di aspirazione attraverso i fori nel tubo.

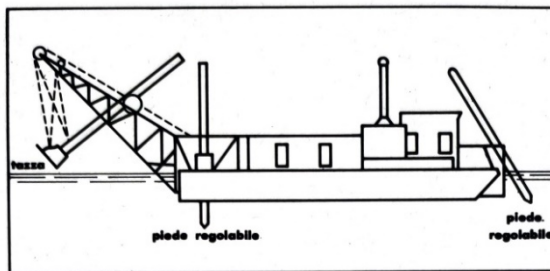
Il fluido sabbia e acqua di mare scorre attraverso il tubo di aspirazione, viene aspirato dalla pompa e quindi trasportato attraverso il tubo al sito di deposito della sabbia, dove viene scaricato.

Il fluido si infila nello strato di sabbia sul fondo del banco e filtra attraverso la sabbia esistente.

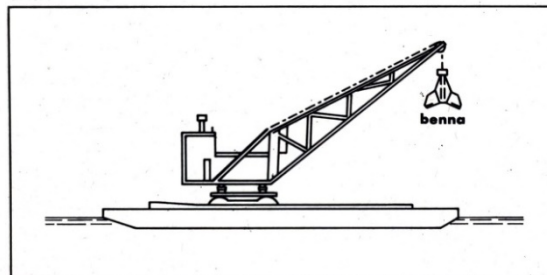
L'acqua di mare filtrata sale lentamente verso l'alto mentre la sabbia si accumula nell'area di scarico.



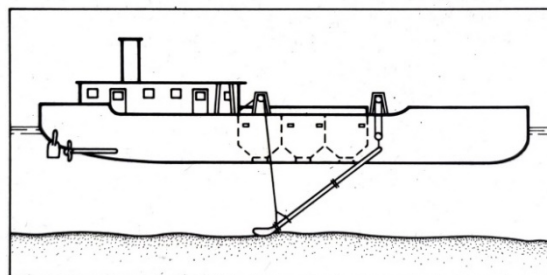
- Draga a noria o catenaria di tazze.



- Draga a cucchiaia o badilone.



- Draga a benna mordente o grappolo.



- Draga aspirante.

Fig. 17: I vari mezzi di dragaggio

## 4.2 Effetti sull'ambiente causati dall'attività di dragaggio

L'attività di dragaggio dei sedimenti quando anche non contaminati, comporta una serie di effetti sull'ambiente circostante principalmente dovuti all'aumento della torbidità legata alla risospensione dei sedimenti.

Tali effetti si hanno sia sul comparto abiotico (cioè la componente non vivente di un ambiente naturale) che sul comportamento biotico (componente vivente di un ambiente naturale).

Quando i sedimenti sono contaminati, a tali effetti di tipo prevalentemente fisico si aggiungono quelli causati dalla dispersione delle sostanze contaminanti presenti nei sedimenti.

Voi i principali effetti che si hanno sul comparto biotico sono:

- l'aumento della torbidità associata alla risospensione dei sedimenti;
- la diminuzione temporanea della concentrazione di ossigeno disciolto nella colonna d'acqua;
- la variazione della concentrazione di nutrienti nella colonna d'acqua;
- la mobilitazione dei contaminanti associati alle particelle in sospensione;
- la solubilizzazione di contaminanti in seguito al cambiamento delle condizioni chimico-fisiche del sedimento;

i principali effetti che si hanno sul comparto biotico:

- impatti diretti di tipo propriamente fisico su organismi e sulle si sensibili, voi causati dall'aumento della torbidità e della concentrazione delle particelle di solidi in sospensione (diminuzione della penetrazione della luce);
- effetti dei contaminanti rimessi in circolo dall'attività dragaggio, presenti in fase disciolta nella colonna d'acqua associate alle particelle di solido in sospensione, sui differenti organismi marini;
- possibile contaminazione microbiologica degli organismi presenti nell'area;
- possibile bio-accumulo dei contaminanti nei tessuti di microrganismi, con conseguente trasferimento nella catena alimentare;

Spesso draghe e imbarcazioni utilizzate a servizio delle draghe possono potenzialmente avere effetti negativi sull'ambiente.

In generale le attività di dragaggio possono inoltre avere effetti di tipo socioeconomico, in particolare di disturbo alla navigazione, voi alle attività di pesca e alle attività ricreative.

### 4.3 Sistemi di dragaggio ambientale

Il drenaggio ambientale deve rispondere ad alcuni requisiti, finalizzati alla minimizzazione degli impatti sull'ambiente circostante. Tali requisiti sono:

- elevata selettività e precisione nel posizionamento e nel taglio: nel caso di sedimenti contaminati in maniera eterogenea o puntuale, un'accurata campagna di caratterizzazione consentirà di individuare volumi di sedimento con differenti caratteristiche di contaminazione, nonché di hotspots; un sistema di posizionamento ad elevata precisione di monitoraggio in tempo reale della posizione nello spazio del sistema dragante e, più in particolare della testa da grande è quindi essenziale per permettere la realizzazione di un profilo di scavo accurato e minimizzando così volumi dragati energia ed i costi associati alle differenti opzioni di gestione ipotizzate.
- Prevenzione della perdita di materiale: voi durante le operazioni di dragaggio, così come nelle successive fasi di trasporto e di ricollocamento del materiale dragato, si devono evitare il rilascio e la perdita del sedimento nella colonna d'acqua. In particolare, in fase di scavo, la testa da grande deve essere opportunamente dimensionata e manovrata affinché tutto il materiale tagliato smosso dalla testa dragante sia poi allontanato.
- Prevenzione dell'incremento di torbidità e della dispersione delle sostanze dannose: durante le operazioni di dragaggio, così come nelle successive fasi di trasporto di ricollocamenti del materiale dragato, devono essere minimizzate la risospensione dei sedimenti e la produzione di torbidità. In particolare, la testa dragante deve essere progettata in modo tale che il meccanismo di rimozione arrechi il minimo disturbo al sedimento.
- Ottimizzazione della concentrazione del materiale dragato, in relazione alla sua destinazione finale: il processo di dragaggio deve minimizzare la quantità d'acqua rimossa insieme al sedimento, prelevando quindi un materiale con densità il più possibile prossima alla densità del sedimento in situ. Ciò al fine di minimizzare il volume dragato ed i successivi costi di gestione, poiché nella maggior parte dei casi l'acqua contenuta nel fango derivante dal dragaggio dei sedimenti contaminati non ha le caratteristiche di qualità richiesti per eventuali scarichi in acque superficiali e deve essere successivamente trattata.
- Sicurezza: il processo di dragaggio deve essere essenzialmente costituito da un sistema chiuso poiché deve garantire che i lavoratori vengano almeno possibile in contatto con il materiale dragato. Inoltre il processo di dragaggio deve essere poco sensibile all'eventuale presenza di detriti grossolani, così come deve limitare al massimo il numero di attività in cui il personale può venire in contatto con il materiale contaminato. In questo senso, un sistema di trasporto mediante betta di appoggio è meno sicuro di un sistema di dragaggi idraulico con rifluimento dei fanghi fino al sito di scarico mediante tubazione.

Le draghe ambientali più moderne possono contare su un'elevata accuratezza del sistema di posizionamento che con processi automatizzati consentono la visualizzazione in tempo reale, su un accurato modello di fondale, di dati che permettono di regolare immediatamente la modalità operativa del sistema dragante in funzione degli obiettivi stabiliti.

#### 4.4 Misure di mitigazione

Le attività di rimozione dei sedimenti contaminati dovranno prevedere adeguate misure di mitigazione degli eventuali impatti.

Vs tali misure devono essere dimensionate sulla base delle caratteristiche ambientali locali, dei potenziali bersagli della loro sensibilità, delle caratteristiche fisico-chimiche dei sedimenti da rimuovere dalla metodologia di escavo prescelta.

In generale, le misure di mitigazione possono:

- agire sulla sorgente dei potenziali impatti ambientali: accorgimenti costruttivi o d'uso delle draghe prescrizioni sulla frequenza delle attività di manutenzione e sulle modalità di esecuzione delle attività di dragaggio o ad esse complementari, le limitazioni temporali dell'attività di dragaggio, utilizzo di barriere anti torbidità attorno alla draga, ecc.;
- agire sui possibili bersagli: limitazione temporanea d'uso dell'area, barriere anti torbidità a protezione degli obiettivi sensibili, etc.;
- riguardare in generale le modalità di gestione o controllo delle operazioni di dragaggio:
- pianificazione attenta delle attività e costante controllo dell'operazione, esecuzione di un piano di monitoraggio degli effetti delle attività di dragaggio e dell'efficienza delle misure di mitigazione adottate, adozione di misure di compensazione degli effetti attesi e riscontrati informazione costante e trasparente sulle attività intraprese, sugli effetti attesi e su quelli riscontrati in base ai risultati forniti dal monitoraggio, etc.

Uno degli strumenti più conosciuti di mitigazione degli impatti e l'utilizzo di barriere fisiche per limitare la diffusione dei sedimenti movimentati dell'attività di dragaggio degli eventuali contaminanti associati alla loro frazione fine, individuando un'area di controllo ben definita.

Le barriere anti torbidità sono utilizzate per limitare sia l'estensione e la visibilità della nube di torbidità potenzialmente causata dall'attività di dragaggio, serie potenziale integrazioni chimiche acqua-sedimento, grazie alla riduzione di volume di interazione. Esistono diverse possibilità di utilizzo e vari tipi di barriere fisiche.

## 4.5 Attività di monitoraggio e controllo

Una volta selezionata la tipologia di dragaggio ambientale, risulta indispensabile prevedere ed attuare un piano di monitoraggio estensivo per la verifica dell'assenza di effetti sull'ambiente circostante e per il controllo dell'efficienza delle misure di mitigazione adottate.

Una delle principali finalità del piano di monitoraggio è quella di salvaguardare l'ambiente, le risorse viventi e gli usi legittimi del mare attraverso l'acquisizione delle informazioni volte a prevenire i possibili effetti negativi.

Il monitoraggio deve essere avviato con sufficiente anticipo rispetto all'inizio delle operazioni di dragaggio, per proseguire anche dopo la loro conclusione per un periodo di tempo sufficiente alla valutazione degli effetti sul comparto biotico e del ripristino delle condizioni chimiche-fisica iniziali o, alternativamente, al raggiungimento di una situazione stabile.

Il monitoraggio deve garantire il controllo costante dei bersagli più sensibili agli effetti delle attività di dragaggio, trasporto e deposizione, nonché l'individuazione dell'estensione degli effetti delle attività di dragaggio, voi fino ad arrivare ad una profonda conoscenza delle condizioni locali e ad un adeguato controllo dei valori del fondo naturale di parametri investigati, in modo tale da fornire gli strumenti decisionali per interventi tempestivi di tutela ambientale.

## 4.6 Deposito

Si distinguono quattro fasi del deposito dei materiali:

- **Discesa convettiva dei sedimenti:** sotto l'impulso della loro massa, i materiali di greggio scendono alla maniera di un getto denso nei primi 100 m del loro movimento. È durante questa fase che urtano il fondo. Questi materiali possono contenere degli agglomerati di materiali molto densi. La proporzione dipende dalle proprietà meccaniche dei sedimenti (in particolare dal tenore in acqua e la loro plasticità) insieme agli impatti delle operazioni di dragaggio.
- **Dispersione passiva a lungo termine:** le particelle fini si separano dal getto in discesa possono essere influenzate dalle correnti. Questo costituisce un grave problema nel caso di contaminazione.
- **Si stima la dispersione a partire dalla discesa,** tenendo conto del campo delle correnti e della velocità di decantazione facendo ricorso ai coefficienti di dispersione supposti.
- **Impatto sul fondo:** al momento dell'impatto, i materiali si espandono radialmente per stabilizzarsi, una volta che l'energia si è dissipata.
- **Formazione dei tumuli:** infine, un tumulo si costituisce e si consolida, sotto l'effetto delle proprie proprietà meccaniche delle tecniche di messa in opera.

I diversi tipi di attrezzature e di tecniche per la messa in opera dei sedimenti influenzano il comportamento di materiali in corso scarico.

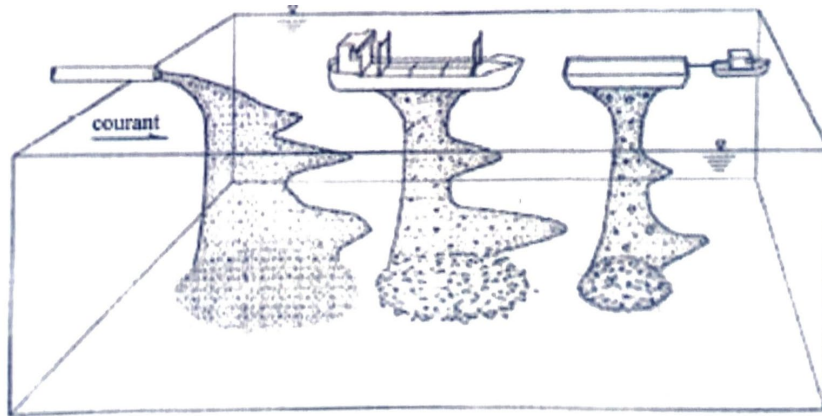


Fig. 18 il comportamento dei sedimenti per diverse tipologie di deposito

Se non è possibile mettere il luogo né in maniera durevole e né valorizzare i lavori di dragaggio, non resta altro che l'opzione di deposito. Il deposito è diversificato in funzione del sito, in ambiente acquatico, in mare, in estuari, laghi e fiumi, o a terra, in siti confinati o non confinati.

Il deposito in mare deve essere evitato per materiali di dragaggio impropri, particolarmente negli ambienti che favoriscono la dispersione. Gli effetti, essenzialmente di natura fisica, sono tanto permanenti quanto temporali. Gli effetti permanenti non consistono solo nella modifica dell'ambiente Marino, ma anche in funzione delle caratteristiche dei sedimenti, effetti sulla totalità dell'habitat Marino. Gli effetti temporanei eventuali vanno dalla torbidità al recupero di organismi viventi. La ricerca del sito di deposito deve tenere conto di altri utilizzi legati all'acqua e alla necessità di minimizzare eventuali effetti nocivi.

È possibile effettuare trattamento dei sedimenti lavorando i materiali di dragaggio contaminati così da ridurre il loro tenore di contaminanti, o allo scopo di ridurre la contaminazione per rispettare le norme in vigore.

Delle diverse tecniche di trattamento esistono per diversi tipi di contaminanti presenti nei materiali dragati. I materiali di dragaggio contaminati, possono contenere diverse combinazioni di metalli pesanti, di idrocarburi e composti organo clorurati. In maniera generale, queste combinazioni non possono essere trattate globalmente, ma richiedono l'intervento sequenziale di più tecnologie disponibili:

- Pretrattamento
- trattamento biologico
- trattamento chimico
- trattamento termico
- stabilizzazione



## Cap. 5 La difesa dall'insabbiamento

La conseguenza del trasporto delle sabbie lungo il litorale costituisce uno dei problemi più onerosi da risolvere nella realizzazione di un porto turistico. Si possono adottare due soluzioni principali:

- a) Progettare i moli o trappole per sabbia in modo da escludere la possibilità di trasporto delle sabbie fino all'imboccatura
- b) Accettare un più o meno rapido insabbiamento dell'imboccatura e progettare i moli in conseguenza, prevedendo delle operazioni di dragaggio.

Come abbiamo visto nella trattazione del trasporto litoraneo, la sabbia sotto l'azione dell'onda si sposta parallelamente al litorale ed incontrando un ostacolo procede nel suo percorso lungo l'ostacolo tendendo a scavalcarlo. Questo nel nostro caso è rappresentato dal molo sopraflutto ed il percorso si interrompe con l'imboccatura del porto, qui l'onda diffratta si espande nell'imboccatura e ne provoca l'insabbiamento, depositando granulometrie sempre più fini, a mano a mano che si smorza espandendosi nel bacino e ciò finché l'innalzarsi della barra di sabbia attraverso l'imboccatura la ostruisce, ripristinando la continuità dell'ostacolo e favorendone lo scavalramento. Volendo quindi adottare la soluzione a) non si dovrà fare altro che spingere i moli in quei fondali elevati in cui l'onda non può più dare luogo al trasporto delle sabbie.

Ciò presenta due inconvenienti:

- 1) il costo elevato dei moli in alti fondali
- 2) la corrosione della costa sottoflutto, completamente priva dell'alimentazione

Per il primo punto occorrerà eseguire un raffronto economico sulla convenienza tra una forte spesa iniziale (i moli) ed una spesa ripartita negli anni per i dragaggi.

Il secondo inconveniente esclude in genere che si possa adottare la soluzione a), a meno che il litorale sottoflutto non presenti alcun interesse.

È da tenere presente che il successo di un'opera studiata contro l'insabbiamento, presuppone che non vengano esaltate le condizioni di normale trasporto solido nel paraggio.

Lo schema generalmente adottato nella maggior parte dei porti, consiste in un molo sopraflutto avente il primo braccio radicato ad un promontorio e la seconda parte già in discreti fondali e quasi parallela alla costa, dà un'ulteriore sicurezza, perché obbliga le sabbie che riescono a scavalcare lo spigolo fra i due bracci, a percorrere tutto il tratto parallelo alla costa ove il riflesso provocato al piede della scogliera dall'onda incidente favorisce l'allontanamento delle sabbie verso gli alti fondali e quindi la loro dispersione. Tuttavia, queste soluzioni, se si possono adottare ad esempio in Liguria, dove gli alti fondali si raggiungono facilmente, perché la piattaforma è molto acclive, non si possono pensare in litorali a spiaggia continua e a deboli pendenze, come ad esempio quelli versiliesi ed adriatici, dove gli alti fondali sono molto al largo ed il danno sottoflutto sarebbe drastico e molto

esteso. Ne consegue l'obbligo di adottare la soluzione b), prevedendo il dragaggio ed impostando i moli in modo tale da facilitare lo scavalco della sabbia.

Sarà da evitare la disposizione con la diga antemurale dinnanzi ai moli guardiani, che costituisce una vera trappola per sabbia ed ormai da tempo abbandonata in litorali di questo genere. La soluzione quasi universalmente adottata è quella di due moli guardiani, con un'imboccatura molto stretta. Quest'ultimo accorgimento va a scapito della facilità della rotta di entrata, tuttavia riduce la zona da dragare, ciò favorisce la rapidità di riapertura dell'imboccatura dopo la mareggiata.

Si tenga presente, infatti, che una sola mareggiata violenta può completamente ostruire l'entrata e che in questi porti occorre avere un mezzo a disposizione, per liberare l'accesso non appena le condizioni del mare permettono l'uso della draga. Sarà utile disporre dell'attrezzatura per dragare preventivamente non solo sull'imboccatura, ma anche sopraflutto a questa, ciò ridurrà l'effetto dannoso della mareggiata successiva.

Un impianto particolare sarà necessario in tutti quei casi in cui si dovrà ripristinare il passaggio naturale delle sabbie. Ciò può essere ottenuto con una draga su pontone che scavi sopraflutto e scarichi sottoflutto o con un sistema di pompe succhianti collegato ad una pipe-line, che superi l'ostacolo (un bypass), sistema recentemente realizzato a Marina di Carrara.

Se il sistema di bypass viene analizzato e, ove opportuno, progettato e realizzato in coordinazione con le strutture portuali, esso risulta assai più economico e non comporterà la necessità di riparare i danni diversamente arrecati.

Queste attrezzature e questi impianti sono costosissimi. Il dragaggio costituisce in Italia un capitolo molto importante nel quadro delle spese di manutenzione dei porti, anche perché molti porti italiani sono stati costruiti in zone inadatte che presentano forti regimi di trasporti solidi. Il dragaggio, quindi, ha una forte incidenza sul bilancio di gestione portuale e l'opportunità di scegliere accuratamente la forma più opportuna dei moli che permetta un più facile scavalco della bocca da parte delle sabbie è fondamentale. Al costo del dragaggio, occorrerà in molti casi aggiungere quello del trasporto dei materiali escavati fino alla zona sottoflutto, per far, cioè, scavalcare l'ostacolo alle sabbie e ripristinare artificialmente il trasporto litoraneo.

L'uso del prodotto delle escavazioni per il ripascimento di spiagge non è esente da problemi; infatti, esso è spesso ricco in fanghi, organici e non, che verrebbero messi in circolo all'atto della discarica, arrecando degrado alla qualità delle acque e danno all'ambiente biologico. A tal riguardo giova osservare che l'inquinamento delle sabbie avviene, in genere, all'interno dei porti, e sarà sufficiente intrappolarle prima dell'ingresso nel sorto per poterle impiegare per ripascimenti artificiali.

A Viareggio un diverso orientamento del molo foraneo, provocando un'incidenza dell'onda meno diretta, ha favorito il formarsi di una più vivace corrente longitudinale con un allungamento della zona di deposito verso il litorale sottoflutto, attenuando l'effetto di deposito a cono della sabbia dovuto alla diffrazione dell'onda intorno alla testa del molo.

## 5.1 Misure per minimizzare gli impatti delle opere

Se si vuole minimizzare l'impatto di una nuova opera costiera è necessario:

- Mantenere i frangiflutti collegati alla costa il più corti possibile
- Orientare i frangiflutti in modo da avere il minor impatto sulla deriva lungo la costa, cioè perpendicolarmente al volume massimo di sabbia della trappola della costa, paralleli alla costa hanno il minimo impatto
- Evitare i canali di navigazione dragati ove possibile
- Frangiflutti a struttura aperta preferibili a strutture solide
- Estremità dei frangiflutti arrotondata per offrire la minima separazione del flusso
- Utilizzare al meglio la topografia

Abbiamo descritto il problema di base dell'accrescimento sul lato ascensionale di un porto turistico costiero e dell'erosione sul lato discendente. vengono fornite informazioni per identificare e minimizzare alla fonte modellando l'impatto ambientale e modificando il design e il posizionamento dei canali e delle strutture di protezione per ridurre il più possibile gli effetti negativi. Tuttavia, di solito si verificano ancora modifiche al modello di deposizione/erosione derivanti dall'interferenza con le correnti delle celle litorali. Ci sono due possibili misure per mitigare l'effetto, il sand-bypassing e gli schemi di ripascimento della spiaggia.

## 5.2 Le reti di polipropilene

Fin dall'antichità si usava appoggiare le scogliere su di uno strato di fascine che ne impediva l'affondamento, da alcuni anni l'uso delle fascine è stato soppiantato dall'uso di robusti tessuti in reti di polipropilene che hanno trovato importanti applicazioni soprattutto nella realizzazione del Piano Delta che si propone di sottrarre un'enorme superficie di terreno al Mare del Nord.

In Italia la nuova tecnica fu sperimentata da parte del genio civile delle opere marittime di Genova in lavori foranei del porto di Viareggio, dove è stata applicata sia alla fondazione delle scogliere sia alla protezione del piede dei moli dallo scalzamento dell'onda riflessa.

Le reti di polipropilene potrebbero essere impiegate anche per fissare il materiale di fondo della zona sommersa, si otterrebbe il doppio effetto di sottrarre gli elementi al fenomeno di usura e di impedire l'asportazione di materiale da parte delle agitazioni marine.

## Cap. 6 Interventi per ripristinare un trasporto litoraneo intercettato da un ostacolo

Quando un trasporto detritico intercettato non è intenso, è possibile riequilibrare il litorale per mezzo di una discarica artificiale o provvedere a scavare il materiale che si deposita sopraflutto all'opera riversandolo sottoflutto, per mezzo di draghe e bette.

Quando invece la portata solida è notevole può convenire la realizzazione di un impianto fisso di rifluimento (**Sand Bypassing**), questa tecnica consiste nel rifluire la sabbia mista ad acqua in tubazioni metalliche per mezzo di speciali impianti di mandata.

### 6.1 Schemi di Sand-Bypassing

Questo impianto non può però sostituire pienamente il complesso di azioni naturali che promuovono il movimento detritico costiero: innanzitutto un impianto di riferimento dovrà funzionare con una certa continuità mentre il trasporto costiero avviene naturalmente in occasione delle sole mareggiate; ciò produce nelle zone di prelievo, il verificarsi di situazioni del tutto anormali, come creazioni di voragini, arretramenti localizzati del litorale, ecc..., sono inconvenienti a cui si può parzialmente ovviare con apparecchiature in grado di allargare il campo di prelievo.

In secondo luogo, poiché il prelievo non può comunque interessare che un'area limitata e deve essere ubicato in una zona di forte accumulo detritico in generale la granulometria della sabbia rifluita è molto minuta rispetto al trasporto solido che si avrebbe naturalmente in mancanza dell'ostacolo.

È buona norma in caso di ripascimenti per mezzo di impianti di refluento, adottare alcuni accorgimenti secondari:

- evitare che il detrito sia riversato in posizione troppo esposta o, peggio, in corrispondenza di strutture di difesa anche solo parzialmente riflettenti
- correggere la granulometria con versamenti artificiali di granulometria superiore
- predisporre di rilasciare opportune opere fisse, atte a rallentare localmente il flusso longitudinale ed eventualmente trasversale.

Fondamentalmente si dragano i sedimenti dal lato di accumulo e si trasportano tramite condotta al lato eroso affamato di sedimenti. Ciò può essere ottenuto attraverso sistemi di dragaggio fissi e galleggianti. I primi sistemi sono costituiti da un impianto di dragaggio a terra, che può essere mobile o da un impianto di dragaggio idraulico fisso montato su un molo. Lo scarico deve essere effettuato in un punto della spiaggia discendente tale che il materiale non debba finire nel canale di ingresso.

Per un sistema galleggiante, è possibile adattare una draga aspirante o una draga a tramoggia per il bypass della sabbia. Il funzionamento di tali sistemi è limitato dall'attività delle onde vicino alla

costa. Se il materiale dragato viene depositato sul lato discendente direttamente dalla draga, verrà disperso nell'acqua vicino alla costa.

In alcuni casi il nuovo terreno formatosi a monte del porto turistico è ben accetto e può essere utilizzato come area ricreativa o per nuova costruzione. Supponendo che l'erosione discendente non stia causando problemi per altri, si può decidere di lasciare che il sistema formi un nuovo equilibrio

La prima considerazione nell'aggiramento della sabbia è determinare quanta sabbia deve essere spostata. La modellazione numerica e fisica si basano su dati di input ragionevolmente accurati e questo può essere difficile da valutare con conseguenti stime significativamente al di sopra o al di sotto della quantità di sedimenti da spostare. In oltre, l'altezza e la direzione delle onde dovrebbero essere monitorate per un periodo di anni complicato da variazioni stagionali e tempeste occasionali. La pratica di bilanciare la quantità netta calcolata di movimento dei sedimenti da direzioni opposte potrebbe non essere una stima valida della quantità necessaria per il bypass della sabbia poiché non tiene conto della quantità persa per la componente offshore del movimento dei sedimenti causata dalla costruzione di un canale di navigazione. Al contrario, il trasporto di sedimenti individuale associato a ciascuna direzione dovrebbe essere preso in considerazione per arrivare a un valore più sicuro della sabbia da bypassare. Un approccio alternativo consiste nel costruire il porto turistico e quindi monitorare e misurare la quantità di accrescimento sopraflutto e di erosione sottoflutto. Questo darebbe una comprensione accurata dei processi di cambiamento.

Il secondo compito sarebbe escogitare un modo per raccogliere la sabbia dall'area di accrescimento. La deposizione avverrà su un'area estesa. Sarà necessario disporre di una draga aspirante mobile in grado di prelevare la sabbia da diversi punti o in alternativa installare misure di cattura della sabbia con un aspirante fisso.

L'intrappolamento della sabbia potrebbe essere ottenuto posizionando piccoli frangiflutti al largo nelle aree di deposito che accumuleranno la sabbia nel loro lato sottovento ( Figura 4.2) predisponendo una piccola intercapedine sul lato a monte del molo principale attraverso il quale la sabbia verrà aspirata e depositata all'interno del molo stesso (Figura 4.3), oppure dragando un canale di raccolta e posizionando cavalletti con eiettori accanto al molo canale (Figura 4.4).

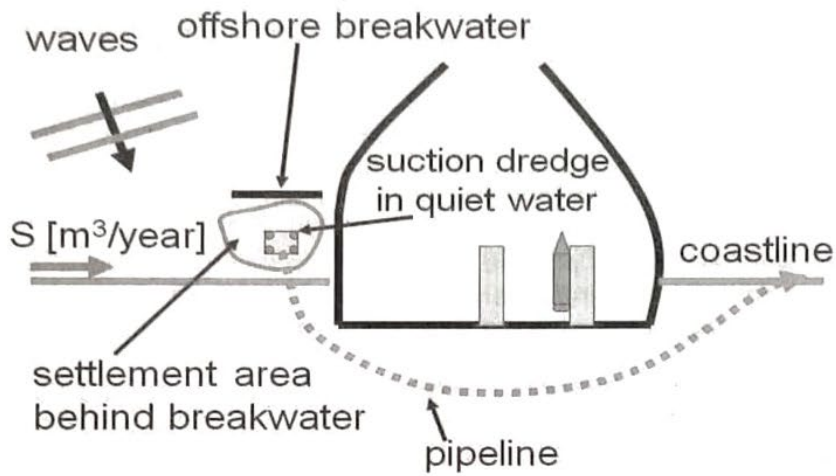


Figure 4.2 Sand trap behind offshore breakwater (Van de Graaff, 2012)

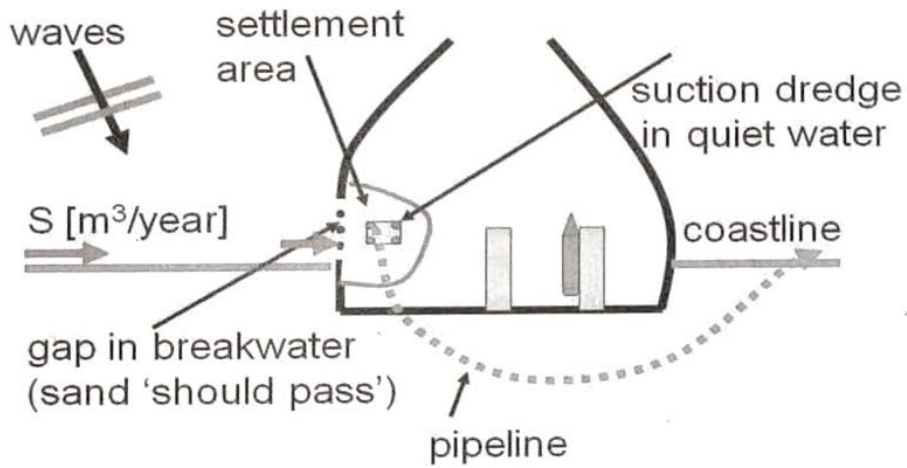


Figure 4.3. Sand trap by gap in marina breakwater (Van de Graaff, 2012)

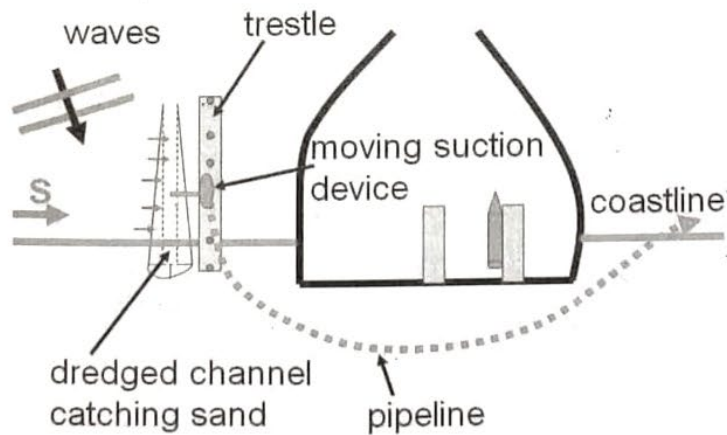


Figure 4.4: Sand trapped by a dredged channel [Van de Graaff, 2012]

Fig. 12 Vari schemi di sand by-pasing

Il terzo problema da superare è quello di trasportare la sabbia raccolta nelle zone di erosione. Un metodo di trasporto semplice ma costoso e inefficiente sarebbe quello di rimuovere la sabbia con una scavatrice durante la bassa marea o mediante dragaggio tradizionale e rimuovere in modo tradizionale. Poiché è probabile che i siti di accrescimento/erosione si trovino in acque poco profonde e soggetti a onde che si infrangono, è un ambiente difficile in cui operare con una draga. Inoltre, si disturba il traffico e si creano emissioni di CO<sub>2</sub>. Tuttavia, potrebbe essere ancora un'opzione per operazioni su piccola scala.

I sedimenti possono essere trasportati da un gasdotto, sia prendendo una rotta marittima intorno allo sviluppo, sia tramite attraversamento di terra se la topografia e l'uso del suolo sono adatti.



Fig. 13: Pipeline su rotta marina del complesso del fiume Tweed in Australia

## 6.2 Piani di ripascimento delle spiagge

Nel contesto dello sviluppo di un porto turistico che influenza la costa adiacente, potrebbe essere necessario prendere in considerazione schemi di ripascimento per migliorare qualsiasi effetto negativo di erosione/deposizione derivante da un nuovo sviluppo. L'aggiramento della sabbia può essere considerato una forma di ripascimento della spiaggia, ma gli schemi di ripascimento possono essere attuati senza aggiramento. Se si scopre che l'area di accrescimento è una risorsa, potrebbe essere preferibile cercare altri modi per modificare l'erosione discendente. Il ripascimento della spiaggia può essere ottenuto imitando il processo di trasporto della sabbia, riempiendo la spiaggia di sabbia importata da fonti esterne. Questa è considerata ingegneria "soft" in quanto non sono coinvolte strutture fisse. È importante che la granulometria della sabbia importata sia uguale o superiore a quella dei sedimenti nativi. Se viene posizionata sabbia più fine, presto si eroderà poiché

non corrisponde all'equilibrio energetico della spiaggia. Le particelle più grossolane della sabbia esistente tenderanno a corazzare la spiaggia.

Bisogna anche considerare dove verrà depositata la sabbia. Una soluzione è depositare sulla riva e fornire un banco di sabbia al largo per proteggere la spiaggia da un'ulteriore erosione. Ciò ha il vantaggio che la sabbia può essere dragata, nel caso ideale dal canale di navigazione del porto turistico e depositata dalla draga evitando così la doppia movimentazione. Ciò, tuttavia, non andrebbe ad aggiungersi al profilo della spiaggia e la spiaggia manterrebbe la stessa larghezza. Il ripascimento ben al di sopra della linea di alta marea aumenterà la protezione dell'entroterra aumentando l'altezza delle dune. Il ripascimento secco della spiaggia è la sabbia posta vicino alla linea di battigia, una pratica che aumenta immediatamente la larghezza della spiaggia. Tuttavia, nel tempo la sabbia verrà ridistribuita fino al raggiungimento di un profilo stabile. Il ripascimento del profilo prevede la distribuzione della sabbia su tutto il profilo della spiaggia. A volte questo è difficile da raggiungere e la spiaggia può raggiungere un equilibrio immediato, non offrendo così alcuna ulteriore protezione dall'erosione delle tempeste.

Il ripascimento non è un "processo una tantum e saranno necessarie ulteriori azioni in futuro".

L'aggiunta di strutture "dure" come i pennelli può aumentare ulteriormente la longevità del processo.

Sempre più ingegneri e studiosi affermano che i sistemi di by pass della sabbia sembra essere la soluzione migliore per mitigare il problema dell'insabbiamento e dell'erosione. Il sistema deve essere obbligatorio per i progetti di sviluppo portuale e dovrebbe costituire parte integrante del progetto nella fase di pianificazione.



## Cap. 7 Tecniche anti-sedimentazione

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

L'obiettivo della trappola è quello di intercettare il trasporto dei sedimenti e convogliarlo in un punto in modo da concentrare le operazioni di dragaggio senza compromettere la funzionalità del porto.

### 7.1 Sand Pit, avvallamento del fondo

La trappola di sabbia è una forma convenzionale di misura di controllo della sedimentazione per un porto turistico in un ambiente di mare aperto. In generale si draga, durante la bella stagione, la sabbia intrappolata in un avvallamento del fondo scavato artificialmente. Il movimento lungo la costa dei sedimenti verrebbe catturato dalla trappola di sabbia a causa della ridotta velocità del flusso nelle sue vicinanze. Questo metodo di controllo è efficiente laddove il trasporto di sedimenti lungo la costa è dominante con una direzione ben definita. La posizione del separatore di sabbia dovrebbe essere conveniente per le operazioni delle draghe e, quindi, deve essere collocata in un luogo relativamente più profondo e calmo. La frequenza di dragaggio richiesta per un porto turistico dovrebbe essere ridotta al minimo. La fattibilità del dragaggio di manutenzione nel sito della trappola deve essere analizzata prima di fare questa scelta di controllo. Negli anni a venire, la manutenzione di una trappola di sabbia potrebbe essere successivamente ridotta a causa di un profilo batimetrico vicino alla costa equilibrato, a meno che la deriva del litorale non rimanga immutato.

La trappola di sabbia deve essere posizionata sul lato sopraflutto del porto turistico, esposta alla direzione principale che le onde seguono, e il volume della trappola deve essere calcolato in base alla quantità stimata di trasporto litoraneo lordo. Una trappola meno profonda distribuita su un'area più ampia è preferibile a una trappola più profonda per un efficiente sistema di cattura dei sedimenti. La figura mostra una tipica ubicazione del separatore di sabbia rispetto al porto turistico. Le trappole di questo tipo dovrebbero essere posizionate fuori dal canale di navigazione del porto turistico, dove l'operazione di dragaggio non pregiudicherebbe il traffico delle navi.

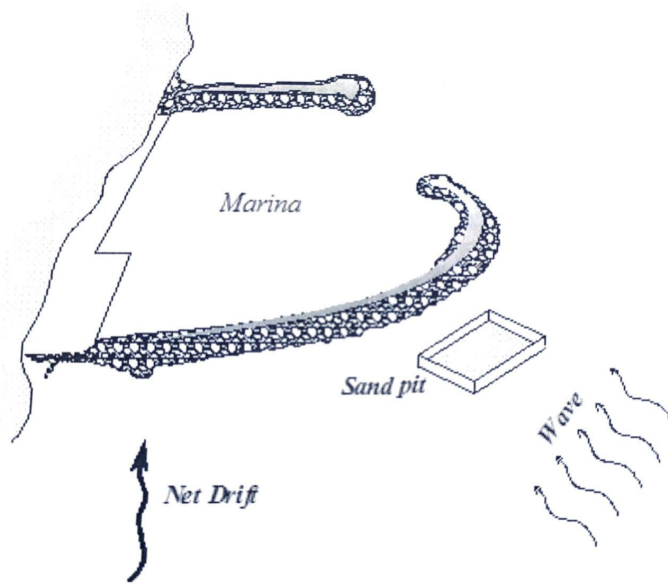


Fig. 14 Sand Pit

Per lo sviluppo di un porto turistico, si raccomanda di avere nelle vicinanze un volume di trappola di sabbia equivalente al tasso di trasporto sedimentario lordo lungo la costa. Questo nell'ipotesi che la relativa quantità di dragaggio annuale possa essere affrontata. Tuttavia, per i porti turistici, il dragaggio di manutenzione è un'attività costosa e, pertanto, il volume della sabbiera può essere volutamente sovradimensionato a seconda delle esigenze specifiche. In sostanza, il volume della trappola in termini di trasporto di sedimenti lordi dipende dalla frequenza prevista delle operazioni di dragaggio.

Le trappole per sedimenti possono anche essere costruite all'interno di un porto. Una variante di queste è un fondo inclinato all'uscita del porto turistico che sosterebbe la deposizione di sedimenti, trasportati da flussi di densità.

**Esempio di applicazione:** trappola di sabbia nel Tidal Elbe, Amburgo.

Nel 2008 è stata costruita una trappola per sedimenti nel fiume Tidal Elbe pochi chilometri a valle del porto di Amburgo. Si estende per circa 2 km di terra attraverso l'intero canale di navigazione largo 300 m con una profondità di 2 m.

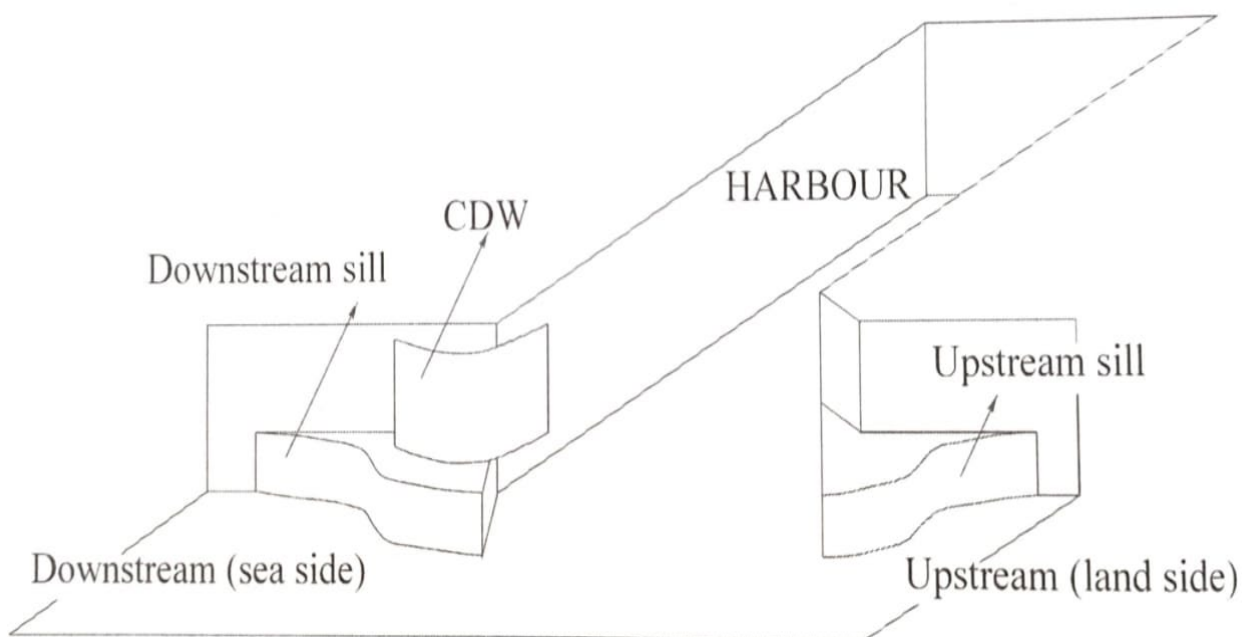
Il rateo di sedimentazione massimo e la sedimentazione dei depositi più fini sono stati osservati in particolare durante l'estate quando lo scarico di acqua dolce era basso. Il funzionamento mostra che la trappola per sedimenti può essere una componente efficace nella gestione dei sedimenti se viene ripulita una volta all'anno in primavera. Garantisce inoltre la facile manutenzione del canale di navigazione senza la necessità di ulteriori dragaggi con breve preavviso per motivi di navigazione. Inoltre, il dragaggio per la manutenzione rientra nel periodo di tempo di un aumento dello scarico di acqua dolce che sostiene la gestione in quanto porta i sedimenti fini a uno stato più stabile di equilibrio.

## 7.2 Pareti devia correnti

Il muro di deflessione è pensato per la deviazione delle correnti/percorso dei sedimenti in modo tale da ridurre al minimo l'ingresso dei sedimenti nel bacino portuale. Ciò si ottiene impedendo la separazione del flusso in corrispondenza del bordo di ingresso sopraflutto e quindi sopprimendo la generazione di vortici nella regione di ingresso. Di conseguenza il volume di scambio si riduce insieme al tempo di ritenzione dei sedimenti nel bacino. Un muro di deflessione opportunamente orientato può ridurre sostanzialmente la necessità di dragaggio all'interno del bacino e in prossimità dell'imboccatura del porto. Le caratteristiche del sistema sono la sua forma in pianta, il suo orientamento rispetto alla direzione delle correnti, la sua lunghezza e il suo allineamento. La riduzione dell'ingresso dei sedimenti nel bacino portuale si ottiene prevenendo la formazione di flussi turbolenti all'ingresso del bacino in modo tale che la direzione del flusso si allontani dall'ingresso. A causa del flusso turbolento all'imboccatura del porto, il sedimento verrà tenuto in sospensione e poi deviato, in modo da scalcare l'imboccatura. In un sistema fluviale, negli anni Novanta è stato costruito un efficiente muro deviatore di corrente all'ingresso del bacino portuale di Kohifieet, che ha dimostrato di ridurre il tasso di sedimentazione fino a circa il 50% [Winterwerp e Kuijper, 2003].

Il vantaggio è che la frequenza dei dragaggi può essere notevolmente ridotta.

Tuttavia, è da sottolineare che l'efficacia di un muro deviatore di corrente dipende fortemente dalle condizioni idrodinamiche locali e dalla geometria dettagliata dell'insieme del muro e dell'ingresso. La necessaria ottimizzazione del progetto della parete può, quindi, essere raggiunta principalmente attraverso opportune prove di laboratorio, dato anche che il costo di tale intervento è piuttosto elevato. Un disegno schematico di un layout di parete di deflessione dotata di soglia di marea sommersa in un ambiente di estuario è mostrato in Figura:



### 7.3 Soglie

Poiché il trasporto sul fondo può essere una modalità dominante di movimento dei sedimenti in prossimità di un porto turistico, la realizzazione di una soglia all'ingresso del porto potrebbe ridurre sostanzialmente l'insabbiamento all'interno del bacino portuale. Tuttavia, il pescaggio disponibile al canale di ingresso può essere limitato a causa all'altezza della soglia.

L'efficacia della soglia in un porto turistico soggetto a marea può essere superiore rispetto a uno in costa aperta, dove l'escursione di marea è insignificante. Ciò è ancora più vero quando viene fornito una soglia mobile che viene sollevata per consentire un'azione di lavaggio.

Alcuni studi dimostrano come una soglia curva risulti più efficace di una dritta.

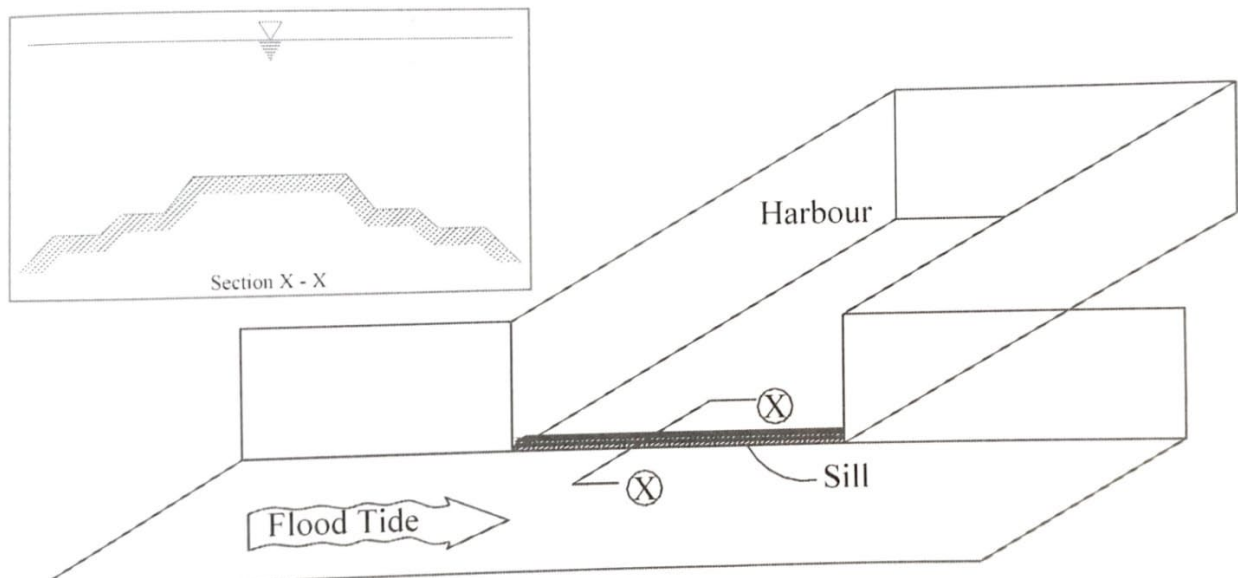


Fig. 15 Configurazione di una soglia dritta di un porto turistico

## 7.4 Mantenere la circolazione del flusso

Poiché i porti turistici sono tipicamente costruiti in acque relativamente poco profonde, oltre al flusso di marea sono presenti la corrente indotta dalle onde. Lo scambio idrico tra l'interno e l'esterno del mare deve essere ridotto al minimo per ridurre l'afflusso di sedimenti. La capacità di carico di sedimenti del deflusso è in genere inferiore a quella dell'afflusso. Questo deficit può essere ridotto mantenendo la circolazione del flusso all'interno del bacino. Fattori determinanti, tuttavia, sono le esigenze di navigazione e le esigenze di tranquillità che non trovano facilmente corrispondenza con la circolazione desiderata. Una volta progettato l'ingresso del porto in base ai fattori determinanti, si consiglia di mantenere un livello di intensità idrodinamica all'interno del bacino ed evitare la formazione di grandi gradienti nel campo di velocità. Ciò può essere ottenuto razionalizzando la disposizione delle linee di ormeggio, evitando sacche d'acqua stagnanti, corpi idrici oblunghi, ecc. Una superiore intensità idrodinamica all'interno di un porto turistico può essere ottenuta attraverso l'inizio dell'erosione associata all'ingresso, dove le particelle d'acqua raggiungono le velocità massime.

### **Agitazione a flusso forzato**

Inoltre, per mantenere il flusso all'interno del bacino, possono essere utilizzati dispositivi meccanici come schiere di getti di lavaggio, getti ad elica, ecc... Va notato che il funzionamento di tali dispositivi deve essere sintonizzato con il ciclo delle maree per ottenere le prestazioni richieste.

## 7.5 Conclusioni

La configurazione del porto gioca un ruolo fondamentale nel controllo della sedimentazione all'interno dei suoi bacini. Tuttavia, ci sono molti altri criteri che determinano la configurazione del porto turistico. Ciò richiede l'analisi ed il confronto delle varie misure anti-sedimentazione, discusse in precedenza. Oltre al metodo del bypass della sabbia, ci sono diverse possibili misure strutturali che potrebbero essere prese in considerazione. Con riferimento agli interventi strutturali l'obiettivo è quello di ridurre l'intensità delle correnti ondose in prossimità dell'imbocco del porto turistico e quindi di ridurre la capacità di trasporto dei sedimenti in tale zona. La parete deviatrice di corrente e lo sperone non sembrano ridurre significativamente la velocità della corrente e il trasporto di sedimenti ma deviano la corrente e quindi la quantità di sedimento trasportato in un'area lontana dal porto turistico in modo che l'ingresso ne sia meno influenzato. Un dragaggio di sedimenti al fine di creare una cava di sabbia accuratamente posizionata offre anche vantaggi operativi e di altro tipo.

## Cap. 8 Esempi applicativi

### 8.1 Lo studio del litorale toscano da Bocca di Magra a Forte dei Marmi:

#### (esempio reale di ripristino del trasporto litoraneo)

Il litorale toscano, compreso tra lo sperone roccioso costituito dalle ultime propaggini dell'appennino ligure ed i Monti livornesi, costituisce un'unica grande unità fisiografica alimentata da tre importanti corsi d'acqua: il Magra, il Serchio e l'Arno, fra i quali sfociano pure a mare altri torrenti minori. L'equilibrio del litorale è perciò assicurato dalle alluvioni del Magra a nord e dell'Arno e del Serchio a sud: se diminuiscono le alluvioni dei tre grandi fiumi il litorale tende a rettilinearsi arretrando agli estremi pur continuando ad avanzare al centro; viceversa aumenti della portata solida provocano un avanzamento di tutto il litorale ma con maggiore velocità e gli estremi.

Furono innanzitutto tracciati i piani d'onda per le tre agitazioni: per le mareggiate di ponente di intensità limitata, per le agitazioni di libeccio (prevalenti a nord), che hanno forti intensità, e infine per le onde di mezzogiorno (prevalenti a sud).

Passiamo ora all'analisi che ci interessa di più: l'equilibrio originale della spiaggia e gli interventi umani modificatori che hanno stravolto tale equilibrio.

L'intero litorale alla fine del 1800 era in equilibrio ed anzi il lento procedimento per il prevalere degli apporti del fiume Magra sulle azioni di trasporto del mare. L'equilibrio naturale dell'arenile era di natura essenzialmente dinamica, specialmente nelle adiacenze della foce dove la linea di spiaggia era soggetta a forti oscillazioni, dovute a fasi alterne di intenso trasporto da parte del fiume e di periodi di magra.

Nella parte centrale, a Marina di Carrara e nel primo tratto settentrionale di Marina di Massa, essendo i fronti d'onda meno inclinate rispetto alla spiaggia, l'equilibrio risultava più stabile, ma ancora caratterizzato da un intenso trasporto longitudinale verso sud. Nella parte estrema, verso Forte dei Marmi, il trasporto longitudinale se faceva più lento e perciò si aveva la maggior tendenza all'accrescimento alla stabilità.

Con il diminuire delle portate solide del fiume Magra si assiste all'arretramento immediato dalla parte quando del rito e successivamente di quella centrale, mentre per quanto riguarda la terza, si registra, perlomeno in un primo tempo, solo una diminuzione o un arresto dell'accrescimento.

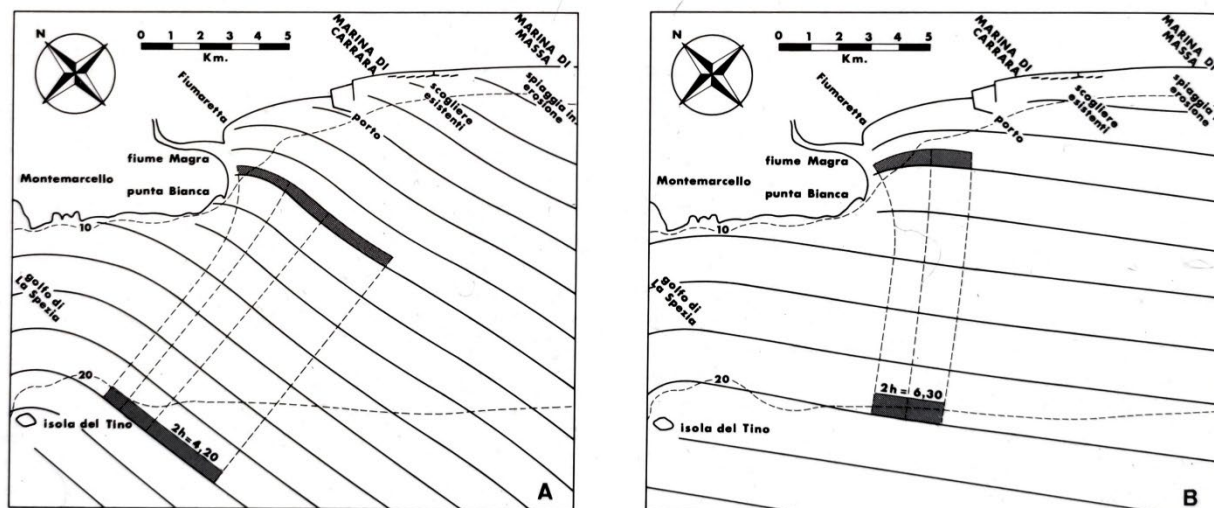


Fig. 19 Studio delle agitazioni principali interessanti il litorale toscano da Bocca di Magra a Forte dei Marmi: A) Piano d'onda di ponente; B) Piano d'onda di libeccio

Nei primi anni del secolo furono effettuate opere di sistemazione del bacino e di arginamento del fiume, che, in conseguenza della particolare sensibilità del tratto di costa sottoflutto alla foce, vi provocarono fortissimi arretramenti. Infatti, la linea della spiaggia alla foce tendeva ad adeguarsi al nuovo equilibrio ritirandosi e ridossandosi al promontorio di Monte Marcello, ciò che attenuava l'esposizione al moto ondoso ed in conseguenza anche l'asporto di materiale di deltazione.

Nel frattempo, si andava attuando la costruzione dapprima dei pontili ed in un secondo tempo del porto a Marina di Carrara. Queste nuove opere provocarono sottoflutto al porto un vistoso fenomeno di corrosione, perché intercettarono completamente il trasporto nord-sud delle sabbie. Si fu così costretti a deviare a monte la viabilità litoranea.

A questo quadro già desolante si aggiunsero le estrazioni di ghiaia dell'alveo del Magra, nello stesso periodo veniva costruito il molo in sponda sinistra alla foce che facilitò il disperdimento di parte delle alluvioni del fiume verso il largo.

A difesa del litorale in corrosione, immediatamente a sud del porto, venne infine costruita una schiera di dighe parallele; la loro conseguenza sul lido sottoflutto di Marina di Massa fu un'estensione a sud del processo di arretramento della battigia.

Fra le cause della corrosione si è valutato che la principale fu, senza dubbio, la costruzione del porto di Carrara, che con il suo marcatissimo aggetto ostacolò il fluire lungo la costa delle sabbie che si accumularono sopraflutto all'ostacolo.

Anche se, dopo un periodo iniziale di arresto pressoché totale del trasporto litoraneo, in conseguenza all'accumulo le sabbie riuscirono a superare l'ostacolo in quantità sempre maggiore, prova di ciò è l'interramento della bocca del porto, però una gran parte va dispersa

dalle riflessioni nel tragitto lungo il molo foraneo; infine, le estrazioni di inerti dal Magra hanno preso un ritmo tale da porre in recessione tutto il litorale.

Il genio civile di Genova per consentire alle sabbie di superare l'ostacolo del porto di Carrara realizzò un complesso impianto costituito da una draga aspirante fissa ed una pipe-line in grado di fluire la sabbia dalla radice del molo foraneo del porto fino oltre le scogliere parallele in corrispondenza della colonia Edison. L'impianto ha una portata solida corrispondente al 100 m<sup>3</sup>/h e si pensò di farlo funzionare per un massimo di 8 ore al giorno e quindi di rifluire 800 m<sup>3</sup>: la sua capacità è sufficiente perché praticamente simile all'intera portata annuale che vi si trasferirebbe con la sola portata solida del Magra se fosse indisturbata. Purtroppo, la portata dell'impianto sarà limitata dalla debole portata solida del fiume magra che in conseguenza alle indiscriminate estrazioni impiegherà diversi anni a colmare i vuoti del suo alveo; è infatti evidente che non potrà essere riferito dalla spiaggia sopraflutto più di quanto vi giunga dal fiume.



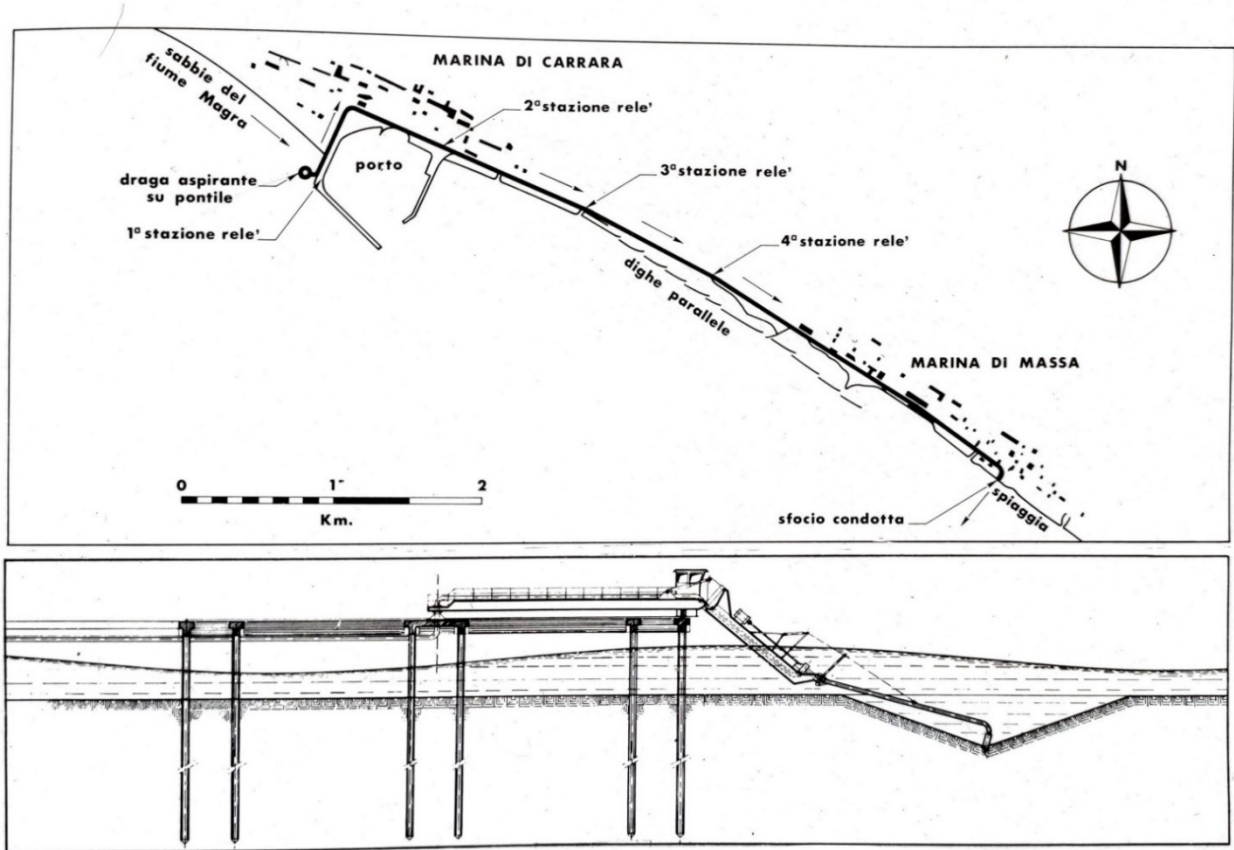


Fig. 20 Disposizione del sistema di sand By-passing

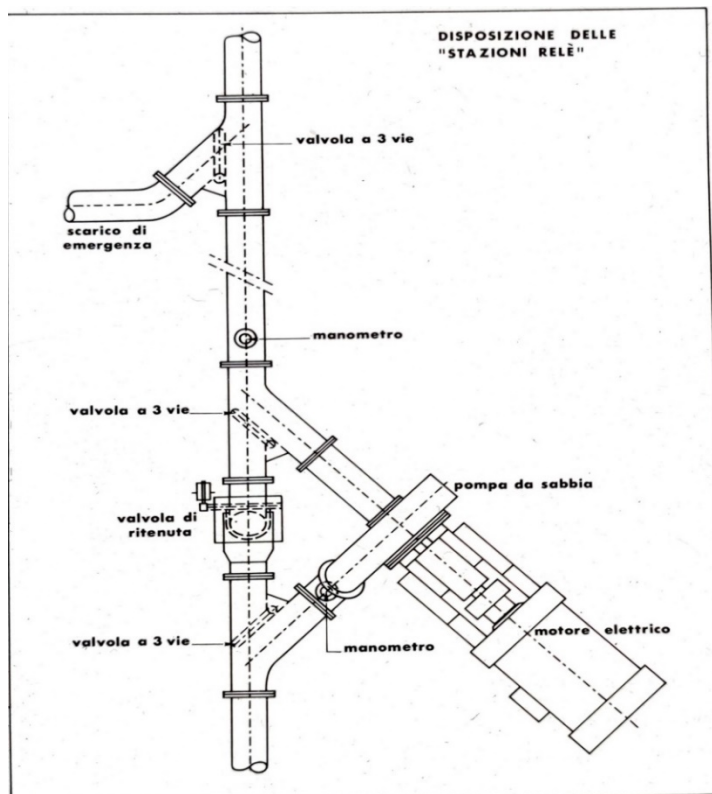


Fig. 21 Particolare della stazione relè

Inoltre, bisogna anche tenere conto che la sabbia rifluita, essendo prelevata da una zona di sedimentazione con pendenza del fondo lievissima, sarà sempre di granulometria molto fine, e quindi nella situazione attuale non potrà depositarsi nella zona dov'è riversata dove, oltre ad essere sede di moto riflesso prodotto dalla scogliera aderente, è caratterizzata da una pendenza del fondo certamente superiore alla pendenza di equilibrio corrispondente alla granulometria della sabbia rifluita.

In presenza di litorali soggetti a forti movimenti longitudinali di sabbia, comportanti il pericolo di interrimento dell'imboccatura dei porti, in generale si provvede ad individuare le zone con minor trasporto litoraneo e ad adottare sistemi di due moli guardiani delimitanti un avamposto con il molo sopraflutto più sporgente del sottoflutto, quest'ultimo provvedimento è classico ed è da sempre adottato in Italia.

In realtà, alla luce dell'esperienza italiane, si può arguire che queste disposizioni non impediscono ma soltanto attenuano l'inconveniente dell'insabbiamento e che questa catena di porti dovrà reggersi come già tutti i porti italiani e spagnoli litorali di tipo questo su una ben studiata organizzazione di dragaggio.

In più, spesso si può assistere sottoflutto ad un arretramento della battigia.

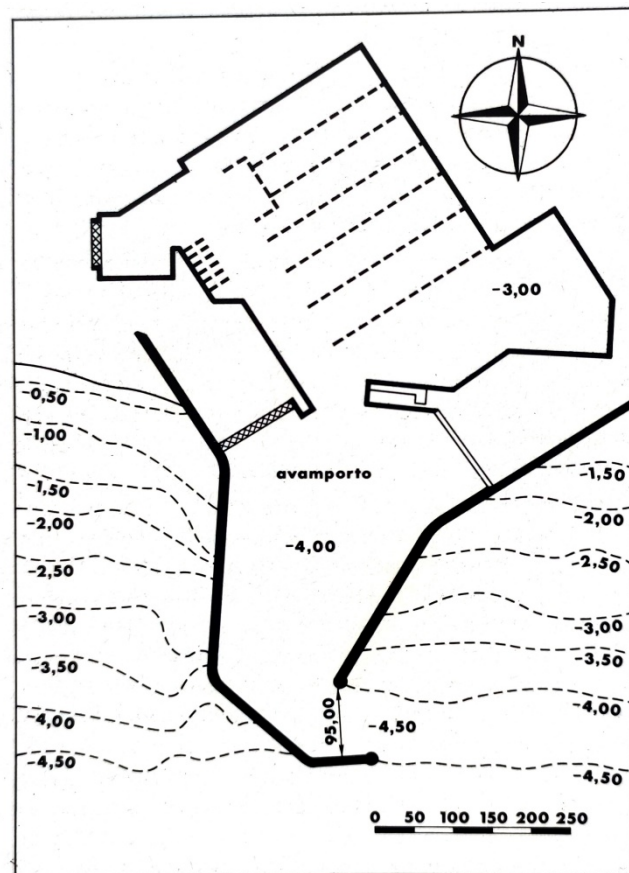


Fig. 22: La batimetria della costa arretra sottoflutto all'opera

## 8.2 il caso del porto di Viareggio

Si tratta, ripercorre, lo studio del progetto di realizzazione di un sistema continuo di dragaggio e trasferimento di sedimenti nel porto di Viareggio. Tra le priorità per il porto di Viareggio si ha la realizzazione di interventi strutturali volti a risolvere il problema dell'insabbiamento dell'imboccatura portuale attraverso un sistema continuo di dragaggio. Lo studio di fattibilità ha individuato fra le alternative possibili la soluzione migliore, costituita da un impianto di bypass dei sedimenti con sabbiodotto fisso, da un sistema di dragaggio mobile e da una trappola sedimentaria.

L'intenso flusso solido litoraneo che si sviluppa in corrispondenza del litorale viareggino ha inevitabilmente condizionato il processo di sviluppo del porto influenzandone ancora oggi l'operatività. I numerosi tentativi, effettuati in passato, di migliorare l'agibilità del porto, spingendo sempre più al largo le opere di difesa, non sono riusciti ad eliminare l'insabbiamento dell'imboccatura ed hanno finito solo con l'interferire in modo sempre più accentuato con il flusso dei sedimenti, innescando fenomeni erosivi sottoflutto alle opere stesse.

È inoltre fondamentale rilevare come negli ultimi 7 anni il tasso annuo di dragaggi sia sostanzialmente raddoppiato rispetto agli anni precedenti e contemporaneamente la spiaggia di ponente sia notevolmente avanzata, grazie soprattutto ai ripascimenti del materiale dragato.

L'ingente aumento delle operazioni di dragaggio può essere spiegato con lo sviluppo della barra sabbiosa, che accrescendosi finì col determinare il frangimento del moto ondoso che ha di fatto consolidato la corrente che si forma durante queste condizioni e che tende ad oltrepassare l'imboccatura del porto, pertanto costituisce elemento condizionante in qualsiasi soluzione progettuale la necessità di partire da un dragaggio iniziale dei fondali, con cui rimuovere la barra sabbiosa ed assicurare adeguate condizioni dell'imboccatura del porto.

Per prevenire l'insabbiamento dell'imboccatura portuale è necessario bloccare le sabbie a sud del porto, impedendo che queste proseguono al Nord, determinando di conseguenza l'erosione del litorale di ponente che non sarebbe più alimentato dal flusso sedimentario; invece, per mantenere in equilibrio il litorale di ponente è necessario favorire il flusso delle sabbie da sud a nord del porto, determinando l'insabbiamento dell'imboccatura per effetto dei sedimenti che transitano davanti a essa.

L'unico modo per mantenere la convivenza porto-spiaggia è quella di intervenire artificialmente spostando meccanicamente le sabbie da sud a nord del porto, con i costi annui che questo determina, condizione inevitabile per il mantenimento del porto agibile e del litorale in equilibrio.

Pertanto, tutte le alternative progettuali prese in considerazione hanno in comune una fase di dragaggio iniziale, con cui abbassare i fondali antistanti all'imboccatura a profondità tale da assicurare l'ingresso o l'uscita delle imbarcazioni dal porto in condizioni di sicurezza e quindi si differenziano l'una dall'altra solo nella strategia individuata per mantenere nel tempo tali condizioni.

-la prima alternativa possibile consiste nel modificare le attuali opere di difesa del porto di Viareggio, spostando sensibilmente l'attuale imboccatura verso il largo fino ad intercettare la barra, ripercorrendo la strada già seguita in passato, in alternativa potrebbe essere realizzata lungo il molo sopraflutto una nuova opera ortogonale o parallela alla diga in grado di bloccare il flusso sedimentario.

Tali operazioni presentano il vantaggio di bloccare per un certo periodo lo sviluppo della barra sabbiosa, ma il costo è elevato e l'impatto determinerebbe come già successo in passato l'avanzamento della spiaggia di levante e l'arretramento di quella di ponente oltre al fatto che comunque l'intervento avrebbe durata temporale limitata.

-un'altra ipotesi è quella di utilizzare un sistema di dragaggio e trasferimento dei sedimenti da sud a nord dell'imboccatura. un sistema, dunque, di bypass delle sabbie, pensate in modo tale da prelevare i sedimenti in arrivo da sud, in modo da mantenere e fondali adeguati davanti all'imboccatura e spostarli direttamente sul litorale di ponente, al fine di garantire l'alimentazione delle spiagge sotto al porto.

I principali vantaggi di un'ipotesi progettuale di questo tipo sono rappresentati dai benefici che si avrebbero per le spiagge di ponente, a cui verrebbe di fatto garantito il trasferimento dell'intero flusso sedimentario in arrivo a sud del porto ed alla possibilità di mantenere nel tempo le condizioni ordinarie di sicurezza, mentre gli svantaggi sono rappresentati dalle difficoltà di impostazione del sistema la cui operatività risulta fortemente condizionata dalle dinamiche sedimentarie, dalle tecnologie e infrastrutture utilizzate e all'attività balneare presente sul litorale adiacente.

Premesso ciò, un sistema di bypass può essere schematizzato attraverso tre parti fondamentali:

1. l'opera di prelievo, che può essere concentrata in un punto pure redistribuita è di tipo fisso o mobile;
2. l'opera di trasferimento, che può essere realizzata attraverso un'infrastruttura di tipo fisso o mobile oppure tramite il ricorso a mezzi di carico marittimi e/o terrestri;
3. L'opera di restituzione, che analogamente può essere concentrata distribuita e fissa o mobile-.

Le uniche modalità di trasferimento dei sedimenti idonee al sito di Viareggio, si limitano all'utilizzo di mezzi Marittimi autocaricanti (per non intaccare la viabilità cittadina) o di un sabbia dotto fisso (il mobile comporterebbe solo il ripetersi dei costi di installazione e rimozione, non avrebbe nemmeno senso pensare a tubazioni galleggianti in quanto durante i lavori stazionerebbe davanti all'imboccatura.)

Risulta di fondamentale importanza studiare le caratteristiche dell'area di prelievo, valutando se per il funzionamento del bypass risulta sufficiente individuare un areale ove eseguire periodicamente le operazioni di scavo oppure se realizzare una trappola sedimentaria, ossia una zona dove favorire l'accumulo di sedimenti per concentrare le operazioni di dragaggio. Valutazioni di questo tipo sono fortemente influenzate dalle dinamiche sedimentarie e dalle tendenze evolutive dei fondali specifiche di ciascun sito di realizzazione.

Le ipotesi possibili da utilizzare per un punto di prelievo con un sabbiodotto fisso sono le seguenti:

---

- Utilizzare un sistema di aspirazione mobile, che può essere a corto o ad ampio raggio di azione
- utilizzare un sistema di aspirazione fisso, concentrato in uno o più punti disposti parallelamente o ortogonalmente a riva

I sistemi di aspirazione mobile a corto raggio d'azione sono soluzioni caratterizzate da una pompa aspirante attaccata all'estremità di un braccio meccanico, che a sua volta può essere montato su un escavatore o una gru a terra oppure su un pontile dotato di rotaie. Il principale limite di soluzioni di questo tipo è rappresentato dalla ridotta mobilità del sistema, che condiziona inevitabilmente l'efficienza e l'operatività del sistema di bypass delle sabbie.

Gli impianti di dragaggio ad ampio raggio d'azione si caratterizzano per una maggiore mobilità, ottenuta solitamente grazie ad un mezzo marittimo dragante che viene collegato direttamente al sabbiodotto fisso tramite una tubazione galleggiante, consentendo di coprire un'ampia area. Il principale limite è la tubazione galleggiante che per poter essere installata richiede tempo ma soprattutto può condizionare l'operatività del bypass, in quanto, in presenza di vento può spostare la draga per effetto della spinta sulla tubazione, (anche senza onde).

Dunque, per rendere economicamente vantaggiosa una soluzione di questo tipo è necessario porre una limitazione alle dimensioni dell'area di dragaggio, evitando di utilizzare tubazioni galleggianti troppo lunghe.

Per contenere le dimensioni dell'area di scavo è possibile allora realizzare una trappola sedimentaria, cioè un insieme di opere destinate a condizionare il trasporto litoraneo dei sedimenti, particolarmente utili perché gli impianti di dragaggio fissi a terra o semi fissi presentano un elevato rischio che il sistema si riveli inefficace in quanto in grado di intercettare solo una minima parte del flusso sedimentario.

Nello specifico, tale rischio, è aggravato dalle caratteristiche dei fondali di Viareggio, dove il flusso si concentra in corrispondenza della barra sabbiosa rendendo ancora più necessario modificare l'accumulo naturale dei sedimenti con trappole per sabbia.

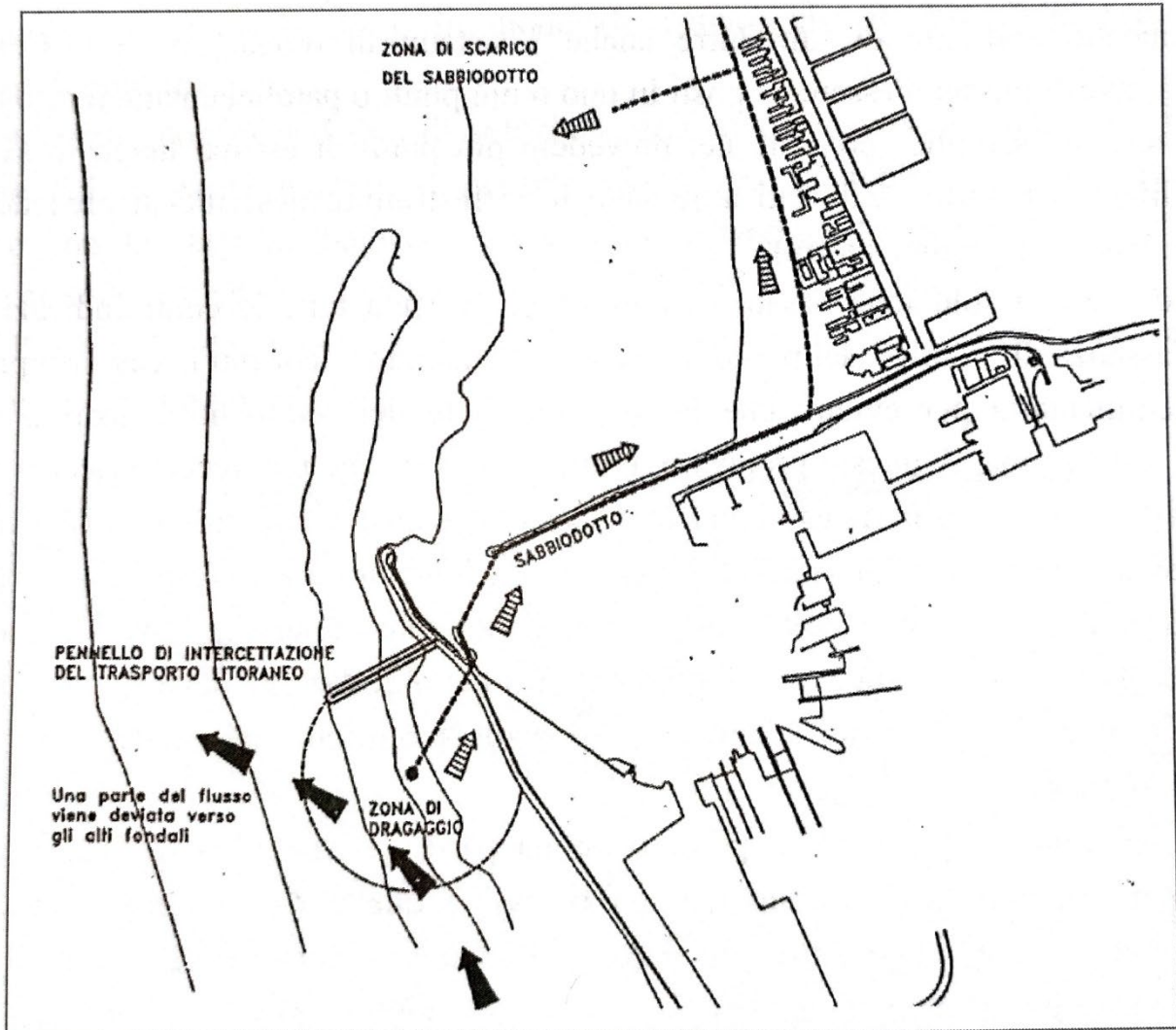


Fig. 23: Schema funzionale della proposta di Milano



Fig. 24: Ipotesi di barriera parallela di intercettazione del flusso litoraneo

Nel caso di impianti fissi la realizzazione di una trappola per sabbia può aumentare di gran lunga l'efficacia dell'impianto; la migliore soluzione per questi tipi di impianto è quella di disporre i punti di prelievo ortogonalmente alla riva, tagliando di fatto il flusso sedimentario. Per poter ottenere una configurazione di questo tipo solitamente sono usati i pontili su pali sui quali vengono disposte delle pompe aspiranti sommergibili, collegate ad una tubazione che, tramite una serie di stazioni di rilancio a terra, raggiunge i punti di restituzione dei sedimenti.

La Tipologia di opere di restituzione dipende essenzialmente dall'operatività del sistema di bypass scelto:

Ipotizzando un sistema funzionamento continuo è necessario ricorrere ad un'infrastruttura fissa aumentando inevitabilmente i costi complessivi e l'impatto dell'opera e causando interferenze le attività balneari.

Nel caso invece di un sistema funzionamento periodico durante l'anno è possibile pensare a soluzioni mobili da installare l'inizio delle operazioni e da rimuovere prima del fermo impianto, evitando di interferire con la stagione balneare.

In conclusione, le possibili soluzioni per il porto di Viareggio sono le seguenti:

- Dragaggio periodico con mezzi marittimi autocaricanti
- Sabbiodotto fisso con punti di dragaggio fissi lungo le opere portuali
- Sabbiodotto fisso con punti di dragaggio fissi lungo le opere portuali e trappola sedimentaria
- Sabbiodotto fisso con punti di dragaggio fissi su pontile trasversale
- Sabbiodotto fisso con sistema di dragaggio mobile
- Sabbiodotto fisso con un sistema di dragaggio mobile e trappola sedimentaria

**Il dragaggio periodico con mezzi marittimi autocaricanti** è il metodo adottato fino ad oggi con interventi di dragaggio limitati strettamente all'imboccatura del porto, senza la finalità di eliminare i bassifondi adiacenti. La soluzione, quindi, ha il vantaggio di non necessitare di opere e di infrastrutture, tuttavia, non permette di garantire il mantenimento permanente di un fondale adeguato davanti all'imboccatura.

**Il Sabbiodotto fisso con punti di dragaggio fissi lungo le opere portuali** sperimentato in diversi siti americani, presenta problemi di scarsa efficienza dovuto al vincolo dei punti di prelievo fissi in grado di intercettare solo una minima parte del trasporto litoraneo, la **variante con la trappola sedimentaria** permette di concentrare l'accumulo dei sedimenti nei pressi dei punti fissi di dragaggio, quindi oltre a dragare le sabbie che si muovono vicino alle pareti portuali e ridurre i problemi di insabbiamento, il sistema in questa variante è più efficiente e permette di fermare il bypass durante il periodo estivo per non interferire con le attività balneari. In entrambe le varianti però la soluzione non è in grado di controllare efficacemente il flusso di sabbia lungo la barra sabbiosa, non escludendo il ricorso a dragaggi periodici con mezzi marittimi.

**Un sabbiodotto fisso con punti di dragaggio fissi su pontile trasversale** è un sistema efficace qui a patto di poter funzionare tutto l'anno potrebbe consentire di trasferire il flusso sedimentario da sud a nord del porto, mantenendo sotto controllo i fondali antistanti all'imboccatura, però gli elevati costi di realizzazione e le interferenze con le attività balneari per la necessità di operare tutto l'anno non sono compatibili con il nostro caso.

**Un impianto fisso con un sistema di dragaggio mobile** potrebbe essere in grado di controllare l'evoluzione dei fondali nei pressi dell'imboccatura, a patto di poter funzionare il più possibile durante l'anno, trasferendo nei momenti di calma e si dimentica che si accumulano durante le mareggiate. Il contro di tale soluzione è che l'operatività è legata alle condizioni meteo marine Ehm e quindi per garantirne l'efficienza dovrà lavorare anche una parte della stagione estiva con conseguenti interferenze con le attività balneari al punto di restituzione.

Considerando però **un sabbiodotto fisso con sistema di dragaggio mobile e trappola sedimentaria**, si ottimizza la soluzione precedente, infatti l'impianto bypass, nel periodo che va da Ottobre ad Aprile, consentirebbe di trasferire, nei momenti di calma, i sedimenti accumulati durante le mareggiate, mentre nei periodi da Aprile a Ottobre l'impianto potrebbe rimanere fermo per non



interferire con le attività balneari, lasciando che l'accumulo avvenga in corrispondenza della trappola sedimentaria ed evitando di compromettere le attività portuali. Terminato il periodo di fermo, l'impianto verrebbe rimesso in funzione, trasferendo sin da subito i sedimenti che si sono disposti nei pressi della trappola durante il periodo estivo, evitando così di sottrarre sabbia alla spiaggia di ponente.

Gli svantaggi principali sono rappresentati dai costi di realizzazione e gestione dell'impianto e dall'impatto dovuto alle infrastrutture realizzate con particolare riferimento alla trappola sedimentaria per non interferire nella stagione estiva l'impianto deve avere un'alta efficienza.

L'analisi costi-benefici evidenzia che le migliori alternative per garantire un'alta efficienza contro Ehi l'insabbiamento dell'infrastruttura portuale e mantenere allo stesso tempo in equilibrio le spiagge sottoflutto sono gli impianti bypass con sabbiodotto fisso e punti di dragaggi fissi su pontile trasversale o con sabbiodotto fisso con sistema di dragaggio mobile e trappola sedimentaria. Tra le due soluzioni, la seconda presenta costi minori e consente di sospendere i lavori durante il periodo estivo, evitando interferenze con le attività balneari.

Lo studio di fattibilità ha definito tale soluzione articolandola in tre parti principali:

1. Dragaggio dei fondali antistanti l'imboccatura e le opere di difesa portuali
2. Realizzazione di una trappola sedimentaria a sud dell'imboccatura
3. Installazione del sabbiodotto di bypass attraverso cui si opererà periodicamente il dragaggio ed il trasferimento dei sedimenti

La soluzione progettuale è stata sviluppata individuando la migliore configurazione del dragaggio iniziale e della trappola sedimentaria al fine di ottimizzare il massimo rendimento del sabbiodotto fisso, Tale configurazione riguarda:

- Dragaggio di fondali antistanti la diga foranea e l'imboccatura portuale fino all'attestato del molo sottoflutto al fine di portare il fondale nell'area di escavo fino ad una profondità di 5,5 m al di sotto del livello medio Marino.
- Realizzazione di un pennello a sud dell'imboccatura, radicato lungo il molo di sopraflutto, composto da un tratto iniziale emerso lungo 50 m, da un successivo tratto sommerso lungo 110 m e da un ulteriore tratto emerso posto longitudinalmente al molo di sopraflutto.
- Realizzazione di un pennello a nord dell'imboccatura, radicato lungo il molo sottoflutto, interamente emerso e lungo 35 m
- Realizzazione di un nuovo sabbiodotto per il trasferimento delle sabbie, composto da un tratto subacqueo di attraversamento dell'avamposto (interrato sotto il fondale Marino), da un tratto in scatolare lungo il molo sottoflutto e da un tratto interrato lungo le spiagge di ponente fino a raggiungere la fine dell'area interessata dal rifacimento periodico.

Con la configurazione prevista sarà possibile spostare i sedimenti da Sud al Nord Dell'imboccatura del porto di Viareggio, evitando l'insabbiamento dell'avamposto e del canale di accesso ed assicurare al tempo stesso l'alimentazione delle spiagge di ponente.

La presenza del pennello di intercettazione consentirà di accumulare la maggior parte del flusso sedimentario durante il periodo estivo prima che le sabbie raggiungano l'imboccatura e quindi consentirà anche di sospendere i dragaggi periodici durante l'estate evitando interferenze con la stagione balneare.

La draga, operando nei pressi del pennello di intercettazione, rimuoverà periodicamente i sedimenti che si accumuleranno nei pressi dell'opera, convogliandoli nella condotta del sabbiodotto, fino a raggiungere l'area di scarico, ad una distanza compresa tra i 700 ed i 1300 m dal molo di sottoflutto.

Nell'area di scarico, i sedimenti dragati saranno versati direttamente sull'arenile per il ripascimento delle spiagge, collegando alla tubazione fissa un sistema di tubazioni mobili emerse che consentirà di effettuare lo scarico lungo la linea di riva.

L'importo totale del quadro economico di progetto è pari a 4.800.000 €



Fig.25: Impostazione della soluzione progettuale per la difesa dell'insabbiamento del porto di Viareggio

### 8.3 Il caso del porto turistico di Ancona

Si prende in esame il porto turistico di Ancona.

L'imboccatura del porto turistico di Ancona soffre di insabbiamento a causa della redistribuzione dei sedimenti nella zona dell'avamposto, si propone quindi un intervento per l'imitare l'insabbiamento davanti l'imboccatura e quindi diminuire la frequenza dei dragaggi per garantire, evitando interruzioni, la viabilità e funzionalità del porto.

Il gestore deve ora, infatti, provvedere annualmente al dragaggio di una canaletta per permettere l'accesso alle imbarcazioni con più pescaggio e per tenere sotto controllo il continuo deposito dei sedimenti.

Si propone un provvedimento a livello empirico schematizzando un avvallamento, ossia una trappola per sabbia (una sand pit), come indicato nel PIANC, che intercetti le sabbie prima che queste arrivino all'imboccatura. Si stima anche l'entità dello scavo per la realizzazione della trappola.

La situazione batimetrica di partenza è quella in figura:



Fig. 26: Situazione batimetrica del porto turistico di Ancona in data 8-11-2022

L'intervento proposto è riportato in Fig. 27.

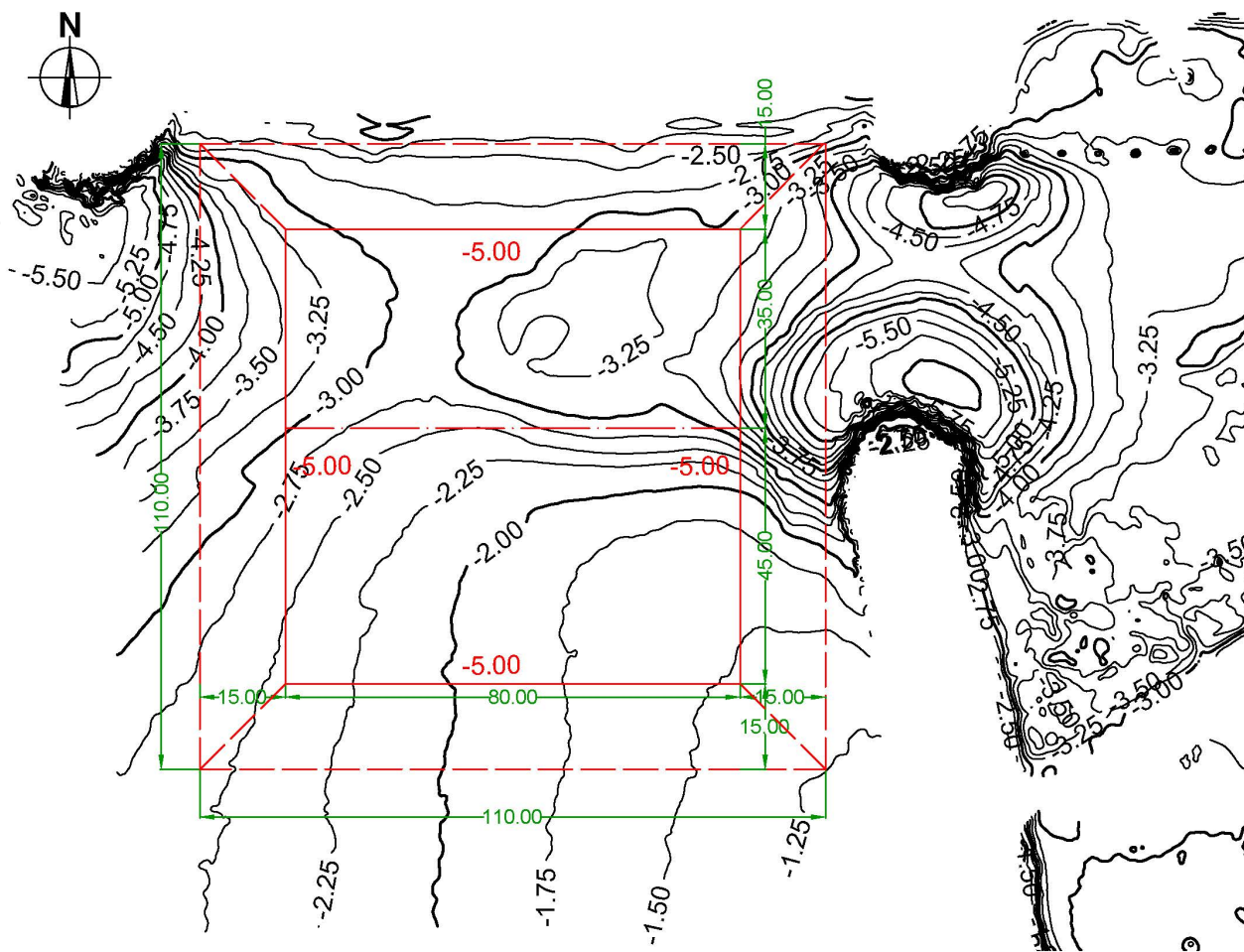


Fig.27: Schema di una possibile trappola per sabbia/avvallamento all'imboccatura del porto turistico di Ancona

La metà superiore della trappola lunga 35 m garantisce la profondità della canaletta di accesso al porto, mentre la metà inferiore, lunga 45 m, intercetta l'arrivo delle sabbie.

Così, potrebbe essere possibile mantenere la viabilità nella metà superiore, diminuendo la frequenza dei dragaggi e concentrandoli prevalentemente nella metà inferiore permettendo comunque l'accesso al porto, durante le operazioni di manutenzione della trappola.

La superficie piana della trappola si trova ad una profondità di 5 m.

L'entità dei sedimenti da dragare, per effettuare la trappola delle dimensioni riportate, è di circa 15 500 m<sup>3</sup> di sabbia.

La stima è stata fatta suddividendo la superficie utile della trappola in quattro settori, lunghi ciascuno 20 m, e calcolando la profondità media di ognuno, si è poi passato al calcolo del volume, conoscendo la profondità finale da ottenere (5 m).

La pendenza delle sponde dello scavo, che partono da una profondità di 2m, è di 1:5 e si stima che si debbano dragare circa 5 000 m<sup>3</sup> di sabbia, per un totale di 20 500 m<sup>3</sup> per la realizzazione dell'intera opera.

.

## Conclusioni

Si è trattato il problema dell'insabbiamento dei porti, con particolare riguardo ai bacini turistici, analizzando cause e varie possibili soluzioni.

Lo scopo di queste nuove tecniche è quello di mantenere la funzionalità del porto turistico il più a lungo possibile, senza dipendere da frequenti e massicci interventi di dragaggio che oltre ad essere costosi e dannosi per l'ambiente, interrompono anche la normale viabilità del porto.

Alcune di queste soluzioni come il sand by-passing cercano di ripristinare il naturale trasporto solido, che i sedimenti avrebbero in assenza dell'ostacolo artificiale, si cerca così mitigare gli effetti che l'opera sortisce sulla costa, senza che venga alterato in maniera irreparabile l'equilibrio naturale creatosi in migliaia di anni prima della sua costruzione.

Si è visto infatti come a Marina di Carrara questa soluzione abbia reso possibile la coesistenza del porto con l'ambiente costiero, devastato dalla costruzione del porto che senza questa nuova opera aveva completamente interrotto il trasporto.

Discorso simile è stato fatto per il porto di Viareggio, dove si sono confrontate diverse misure di anti-sedimentazione analizzandone pro e contro.

Altre soluzioni come le trappole per sabbia, costituite da avvallamenti artificiali, trattate grazie ai minuziosi rapporti del PIANC (associazione internazionale permanente dei congressi di navigazione), mirano a concentrare il deposito delle sabbie in una zona prestabilita e ristretta che permette di facilitare il dragaggio ed evitare che i sedimenti si depositano all'interno o nel canale di accesso del porto.

Una soluzione di questo tipo è stata proposta per il porto turistico di Ancona, anch'esso soggetto ai necessari e frequenti interventi di dragaggio che interrompono momentaneamente la navigabilità del canale di accesso al bacino.

## Bibliografia e sitografia

Associazione nazionale ingegneri e architetti italiani (1980). "Opere esterne di difesa dei porti", Esa editrice, Roma.

Autorità portuale del porto di Viareggio; (2015). "Progetto preliminare di realizzazione di un sistema continuo di dragaggio e trasferimento dei sedimenti".

Berriolo Giorgio e Siritto Giorgio (1979). "Spiagge e porti turistici", Hoepli., Milano.

Ioannone Antonio (2015). "Dragaggi portuali: origine trattamento dei sedimenti con applicazione al porto di San Benedetto del Tronto", Tesi di laurea magistrale in Ing. Civile, UNIVPM, Ancona.

Lorenzoni Carlo. "Appunti del Corso di ingegneria costiera 2022/2023", UNIVPM, Ancona.

Marconi Gianluca (2003). "Studio del trasporto solido costiero applicazione alla baia dei sassi neri di Sirolo", Tesi di laurea in Ing. Per l'ambiente e il Territorio, UNIVPM, Ancona.

Matteotti Giuseppe (2004). "Lineamenti di costruzioni marittime", SGEEditoriali, Padova.

<https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/atlante-delle-opere-di-sistemazione-costiera> "Atlante digitale delle opere di sistemazione costiera"

PIANC (2015). "Anti-sedimentation system for marinas and yacht harbours", report n. 130

Soulsby R.L. (1997). "Dynamics of marine sands". Thomas Telford Publications, Thomas Telford Services Ltd., 1 Heron Quay, London E14 4JD.

U.S Army Corps of Engineers (1984): "Shore protection manual" Vol. 1