

## 13. MORFOLOGIA COSTIERA

### 13.1 Generalità

### 13.2 Terminologia

### 13.3 Caratteristiche dei sedimenti costieri

#### *13.3.1 Composizione, forma e disposizione dei sedimenti*

#### *13.3.2 Scala di misura dei diametri*

#### *13.3.3 Velocità di sedimentazione*

### 13.4 Classificazione delle spiagge

#### *13.4.1. Classificazione in base alla granulometria dei sedimenti*

#### *13.4.2. Classificazione in base all'escursione di marea*

### 13.5 Possibili profili di spiaggia

#### *13.5.1 Profilo estivo e profilo invernale*

#### *13.5.2 Il profilo di equilibrio*

### 13.6 Possibili andamenti planimetrici di spiaggia

#### 13.1. Generalità

I problemi di ingegneria costiera possono essere semplicisticamente classificati in quattro categorie generali (vedere Figura 13.1). E precisamente: i) stabilizzazione della linea di spiaggia; ii) protezione della costa; iii) stabilizzazione dei canali, con particolare riguardo all'ingresso del canale stesso; iv) protezione dei porti. Ovviamente un problema specifico può rientrare in più di una categoria.

Le soluzioni ai problemi citati possono essere di tipo strutturale, oppure possono anche essere di altra natura, quali, ad esempio, quelle di tipo gestionale. In questa parte delle note verranno prese in considerazione solo le soluzioni di tipo strutturale, sebbene molte delle considerazioni di seguito presentate possono anche essere impiegate per altri tipi di soluzioni.

Prima di entrare nel dettaglio delle soluzioni strutturali, occorre approfondire la conoscenza della morfodinamica dei litorali sotto l'azione delle onde delle correnti e del vento, con particolare riguardo alla conoscenza dei processi costieri che interessano i litorali sabbiosi. Pertanto in quanto segue, dopo aver presentato la terminologia in uso per la descrizione della fascia costiera, verranno presentate le principali caratteristiche dei sedimenti; quindi si passerà ad una rassegna della morfologia tipica delle spiagge.

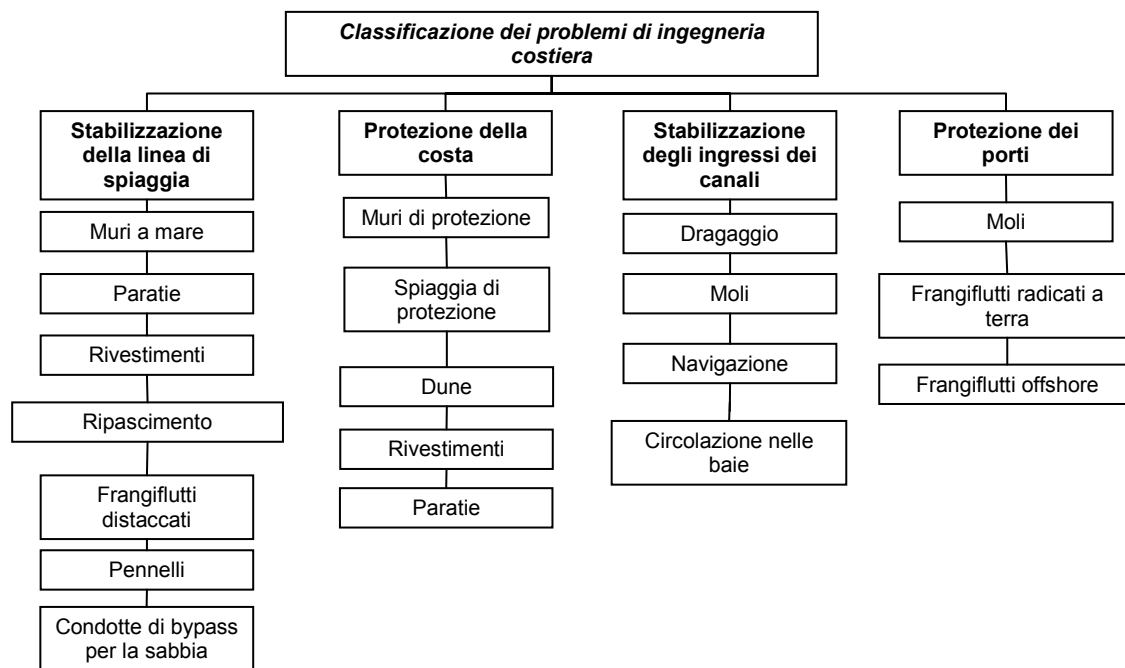


Figura 13.1. Classificazione generale dei problemi di ingegneria costiera.

### 13.2. Terminologia

La linea di spiaggia, punto di intersezione tra terra e mare, è il punto dove i fenomeni idrodinamici prevalentemente dovuti al moto ondoso “attaccano” le terre emerse. Le aree più soggette all’azione del mare sono le spiagge dal momento che risentono della energia totale trasferita dal moto ondoso (assenza di riflessione). Le spiagge saranno quindi le aree costiere cui principalmente si riferirà nel seguito.

A causa della complessità dei processi costieri e delle diverse nomenclature utilizzate è opportuno anzitutto introdurre una chiara definizione circa i termini che verranno adottati nel presente capitolo (per alcuni termini verrà mantenuta la nomenclatura anglosassone a causa dell’uso diffuso in letteratura) (vedere Figura 13.2 e 13.3).

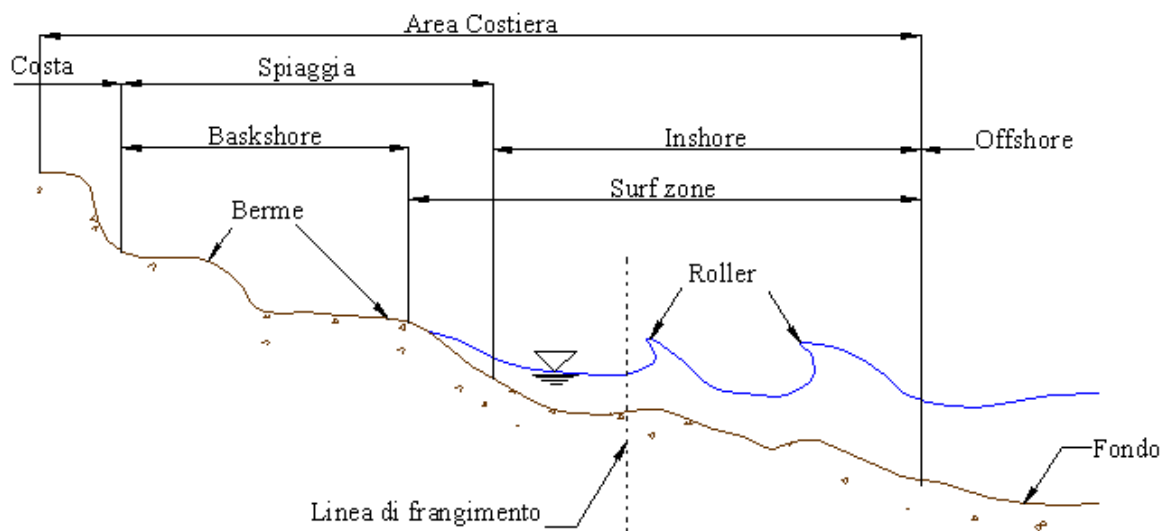


Figura 13.2. Schematizzazione 2D della fascia costiera e relativa nomenclatura.

Costa:	striscia di terra di larghezza indefinita che si estende dalla linea interna di spiaggia fino a quel punto in cui si verifica un cambiamento notevole delle caratteristiche del terreno;
Area costiera:	comprende sia la costa che un tratto di mare;
Spiaggia:	zona costituita da materiale sciolto che si estende dalla linea di bassa marea fino a dove si verifica un cambiamento di caratteristiche del terreno oppure a dove ha dimora una vegetazione permanente;
Backshore:	zona della spiaggia che viene interessata dal moto ondoso solo in occasione di eventi eccezionali;
Foreshore:	parte di spiaggia compresa tra la cresta della berma ed il livello minimo del mare;
Inshore:	zona che si estende dalla cresta della berma fino all'area interessata dal frangimento;
Offshore:	zona che si estende dall'inizio dell'area di frangimento fino alla scarpata continentale;
Surf-zone:	zona interessata dal frangimento;
Berma:	zona costituita da gradini modellati in parte per erosione ed in parte per accumulo verso terra rispetto alla battigia;
Roller:	risultato del fenomeno di frangimento;
Linea di frangimento:	luogo dei punti in cui avviene il frangimento.

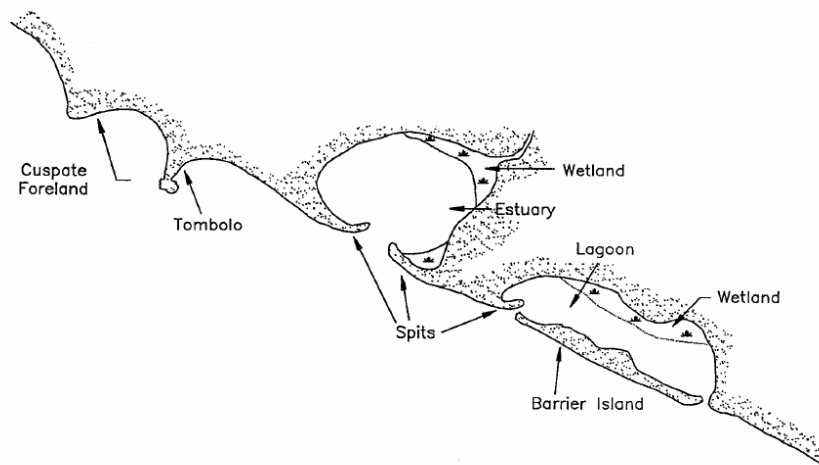


Figura 13.3. Schematizzazione di ambienti costieri deposizionali, usualmente caratterizzati da materiale non coesivo.

### 13.3. Caratteristiche dei sedimenti costieri

In quanto segue viene brevemente presentata una descrizione generale delle caratteristiche dei sedimenti non coesivi di cui sono costituiti i litorali.

Tale descrizione, certamente non esaustiva dal momento che questi argomenti sono ampiamente trattati in molti libri (vedere, per esempio, *Sleath*, 1976; *Dyer*, 1986; etc.), tenendo conto del fatto che autori differenti hanno dato nomi diversi a quelle che sono, sostanzialmente, le stesse cose, vuole perseguire l'obiettivo di presentare le classificazioni usualmente adottate per le proprietà dei sedimenti.

Il problema del trasporto solido, specie in ambito costiero, è stato affrontato in passato

considerando sedimenti dalla granulometria uniforme. Il problema dell'esistenza di sedimenti dalla granulometria assortita, sebbene non ignorato, è stato spesso considerato come una generalizzazione dei risultati ottenuti nel caso più semplice di materiale uniforme con qualche eccezione in ambito fluviale (Parker, 1991; Armanini & Di Silvio, 1988).

Per modificare questo tipo di approccio e tenere quindi conto del fatto che i sedimenti in aree costiere sono costituiti da una varietà di diametri, bisogna introdurre, unitamente alle proprietà fondamentali che caratterizzano i miscugli sabbiosi, sia alcuni concetti di tipo statistico, sia considerazioni fisiche circa le interazioni che intervengono tra granuli di diverse dimensioni.

Per ciò che concerne le proprietà fondamentali di cui sopra, riferendosi sempre a sedimenti non coesivi, esse sono costituite da grandezze come la composizione, il peso specifico, le dimensioni, la forma e dipendono dalle origini del materiale e dal processo della sua formazione. Infatti, i sedimenti che pervengono alle aree costiere vengono successivamente modificati dalla continua azione delle onde, delle correnti ed, in alcuni casi, anche del vento.

Un altro parametro utile per la caratterizzazione dei sedimenti è la velocità di sedimentazione. Quest'ultima grandezza, apparentemente non classificabile tra quelle per la definizione dei sedimenti, risulta tuttavia di fondamentale importanza quando si vuole caratterizzare il comportamento dei sedimenti sotto l'azione di un campo di moto fluido (ad esempio nella caratterizzazione di alcune portate solide).

### 13.3.1. Composizione, forma e disposizione dei sedimenti

Nel considerare i processi costieri, la composizione dei materiali non rappresenta una delle variabili principali, dal momento che la frazione predominante è in genere costituita da sabbia di quarzo chimicamente inerte e resistente alle azioni meccaniche. Tuttavia, è anche possibile trovare tra materiali costieri anche carbonati, provenienti dalla disgregazione di coralli e conchiglie, calcite, metalli pesanti, materie organiche, limo ed argilla. Ovviamente, a seconda della composizione, detti materiali sono caratterizzati da pesi specifici differenti, in Tabella 13.I si riportano quelli considerati più comuni (S.P.M., 1984).

Nei processi di trasporto solido tuttavia, anziché far riferimento alla densità  $\rho_s$  (o peso specifico) dei sedimenti ci si riferisce spesso alla cosiddetta densità relativa data dal rapporto  $s = \rho_s / \rho$  in cui  $\rho$  rappresenta la densità dell'acqua a 4°C. Per sedimenti naturali (quarzo) detta densità relativa è prossima a 2.65.

Tabella 13.I. Peso specifico di campioni di sabbie litoranee e di alcuni dei loro componenti principali (da S.P.M.; 1984).

<b>Peso specifico (km/m<sup>3</sup>)</b>		
Quarzo 2650		
Minerali pesanti >2870 (da 2870 a 3330)		
	Secca	Satura
<i>Sabbia uniforme</i>		
- sciolta	1442	1890
- densa	1746	2082
<i>Sabbia mista</i>		1986
- sciolta	1586	2163
- densa	1858	

<i>Argilla</i>		
- glaciale	-	2066
- organica	-	1426

Per quanto concerne la forma dei granuli, dal momento che la maggior parte di essi risulta assimilabile ad un ellissoide triassiale, indicando con  $d_a$ ,  $d_c$  e  $d_b$  rispettivamente il diametro maggiore, minore e medio, essa può essere espressa attraverso il fattore di forma di *Corey S*:

$$S = \frac{d_c}{\sqrt{d_a d_b}} \quad (13.1)$$

pari ad 1 nel caso di una sfera (tipicamente per sabbie naturali  $S=0.7$ ).

Nel suo insieme la forma del granulo può anche essere definita in termini di sfericità, uguale alla radice cubica del volume della particella, diviso il volume della più piccola sfera che contiene la particella stessa. Inoltre è possibile definire anche una spigolosità della particella, pari al raggio medio diviso il raggio della sfera che la contiene.

Un'altra grandezza significativa per le misture di sedimenti è la densità di “impaccamento dei granuli”. Essa rappresenta una misura di come i granuli si dispongono gli uni rispetto agli altri. Oltre che dal punto di vista geologico, in quanto significativa della maniera in cui i sedimenti si sono depositati nel tempo, tale grandezza risulta importante sia poiché essa influenza la stabilità dei sedimenti superficiali nei confronti del moto fluido, sia in quanto correlata alla porosità, cioè al rapporto tra il volume occupato dai sedimenti ed il volume totale.

Tabella 13.II. Valori tipici della porosità per sedimenti costieri.

<b>Dimensione</b>	<b>Porosità (%)</b>
Sabbia grossolana	39÷41
Sabbia media	41÷48
Sabbia fine	44÷49
Limo e argille	50÷54

Mentre per il caso di sfere uniformi i diversi modi di disposizione sistematica dei granuli sono stati studiati e classificati (tetragonale, cubica, romboedrica, ortorombica), nel caso di sedimenti dalla granulometria assortita si presentano diverse difficoltà di valutazione, per cui ci si riferisce come indice della densità di impaccamento alla misura della porosità. In Tabella 12.II si riportano alcuni valori di porosità per quei sedimenti naturali considerati più comuni.

### 13.3.2. Scala di misura dei diametri

Tra tutte le proprietà che caratterizzano le particelle di origine sedimentaria, la dimensione dei granuli risulta essere quella più importante. Se tutte le particelle fossero sferiche, per definire la dimensione basterebbe specificarne il diametro. Invece, le particelle che compongono un fondale sabbioso, variano da forme rotonde ad altre molto appiattite o addirittura appuntite e ciò ovviamente comporta notevoli difficoltà di classificazione. Ne segue che il diametro inteso come misura delle dimensioni di una particella perde il suo usuale significato per assumerne altri di tipo puramente convenzionale.

Un esempio è costituito dalla definizione di diametro di una particella come misura delle maglie del setaccio attraverso cui essa riesce appena a passare, che peraltro è quella cui si

farà riferimento nel seguito (altre definizioni di diametro, come quella di diametro nominale, diametro di sedimentazione, etc., non vengono qui prese in considerazione e si rimanda a *Garde & Ranga-Raju* (1977) il lettore interessato).

Per quanto concerne la scala di misura dei diametri, quella più comunemente usata è quella di *Udden-Wentworth* (1922), mostrata nella Tabella 13.III dalla quale si evince come la base usata sia il millimetro, e le classi seguenti si ottengano moltiplicando o dividendo per due.

Per evitare poi di utilizzare un numero elevato di cifre decimali in corrispondenza delle sabbie più piccole o del limo o delle argille, viene utilizzato il micron. Dal momento che nella suddetta scala di misura vengono utilizzate le potenze di due, *Krumbhein* (1934) propose una scala logaritmica, nota come scala sedimentologica o scala  $\phi$ , in cui:

$$\phi = -\log_2(d) \quad (13.2)$$

con  $d$  diametro, secondo la definizione prima data, in millimetri. Il segno negativo è stato introdotto allo scopo di avere per i granuli di dimensione inferiore al millimetro, che rappresentano la frazione più comune, un valore di  $\phi$  positivo.

Tabella 13.III. Scala di misura dei diametri di *Udden*(1898)-*Wentworth*(1922)

<b>WENTWORTH</b>		$\phi$ $\phi = -\log_2(d)$	<b>d</b> [mm]	<b>Micron</b> [μ]
<b>MASSI</b>		-8	256	
		-7	128	
<b>Ciottoli</b>		-6	64	
		-5	32	
		-4	16	
<b>Ghiaia ciottolosa</b>		-3	8	
		-2	4	
<b>Ghiaia</b>		-1	2	
<b>Sabbia</b>	Molto grossa	0	1	1000
	Grossolana	+1	1/2	500
	Media	+2	1/4	250
	Fine	+3	1/8	125
	Molto fine	+4	1/16	62.5
<b>Limo</b>	Grossolano	+5	1/32	31.3
	Medio	+6	1/64	15.6
	Fine	+7	1/128	7.8
	Molto fine	+8	1/256	3.9
	Grossolana	+9	1/512	1.95
	Media			

<b>Argilla</b>	Fine	+10	1/1024	0.98
		+11	1/2048	0.49
	Molto fine			
	Colloidale	+12	1/4096	0.24

Infine, prima di passare a definire i parametri statistici necessari a descrivere un miscuglio sabbioso, è bene sottolineare l'utilità della logaritmica (scala  $\phi$ ) per la misura dei diametri. Si consideri, infatti, il risultato di una prova di setacciamento nel caso di una sabbia. Riportando la percentuale del peso totale trattenuta da ogni setaccio in funzione delle dimensioni della particella si ottiene un istogramma che, generalmente, presenta un andamento asimmetrico. Ne segue che interpolando detto diagramma con una funzione di distribuzione di probabilità, quest'ultima risulterà anch'essa asimmetrica. Se invece si riporta lo stesso risultato in un diagramma semi-logaritmico, in funzione cioè del logaritmo dei diametri, è possibile osservare, nella maggior parte dei casi di interesse pratico, un istogramma che può essere interpolato da una distribuzione di probabilità di tipo “gaussiana”, con ovvia semplificazione delle elaborazioni statistiche. Risulta a questo punto chiaro l'uso della scala sedimentologica come scala di misura, dal momento che essa presenta i risultati direttamente in termini dei logaritmi dei diametri.

Ciò detto, considerando un campione di sedimenti di cui sia noto il volume, è possibile definire una funzione di distribuzione di probabilità rappresentativa dei diametri. Definendo inoltre una funzione densità di probabilità  $p(d)$  pari alla derivata prima della funzione di distribuzione e tale che il prodotto  $p(d) dd$  indichi la frazione di materiale la cui misura dei diametri sia contenuta nell'intervallo  $(d, d + dd)$ , si avrà, nella maggior parte dei casi, una funzione densità di probabilità del tipo:

$$p(d) = \frac{1}{\sigma_{\log(d)} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\log(d) - \overline{\log(d)})^2}{2\sigma_{\log(d)}^2} \right] \quad (13.3)$$

in cui,  $\sigma_{\log(d)}$  rappresenta la deviazione standard di  $\log(d)$ , mentre  $\log(d)$  indica la media di  $\log(d)$ .

Ricordando la definizione della grandezza scala  $\phi$  e quella di funzione di distribuzione di probabilità (definita, quest'ultima, come quella frazione del campione la cui misura risulta inferiore a  $\phi(d)$ ), si ottiene in termini della variabile  $\phi$  una funzione di densità di probabilità di tipo normale. In formule:

$$p(\phi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\phi - \bar{\phi})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (13.4)$$

dove  $\phi$  e  $\sigma$  rappresentano rispettivamente il valore medio e la deviazione standard.

A questo punto possiamo introdurre i parametri statistici preminenti che intervengono nella descrizione dei sedimenti dalla granulometria assortita. Essi sono: la media geometrica, per la quale sono state fornite diverse stime in termini di scala  $\phi$ , la più comune delle quali è la seguente (Folk, 1974):

$$M_\phi = \frac{(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})}{3} \quad (13.3)$$

la deviazione standard  $\sigma_\phi$ , la mediana  $d_{50}$  e quella dimensione della sabbia tale che il 90% della stessa risulti più piccola indicata come  $d_{90}$ . In termini della variabile  $\phi$  risultano definiti come segue:

$$\phi_m = \int_{-\infty}^{\infty} \phi p(\phi) d\phi \quad (13.5)$$

$$\sigma_\phi^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (\phi - \phi_m)^2 p(\phi) d\phi \quad (13.6)$$

Si ricorda inoltre che per definizione di funzione densità di probabilità si ha che:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(\phi) d\phi = 1 \quad (13.7)$$

La deviazione standard  $\sigma_\phi$  quando si riferisce, come nel caso in questione, a funzioni di distribuzione di probabilità dei diametri, viene anche detta “*sorting*” e consente una classificazione delle misture sabbiose (Folk & Ward, 1957); infatti una sabbia caratterizzata da un basso valore di  $\sigma_\phi$  avrà pochi granuli molto più grandi o più piccoli del valore medio e, di conseguenza, potrà essere considerata uniforme.

In termini di scala  $\phi$ , è possibile stimare la deviazione standard sulla base della seguente espressione:

$$\sigma_\phi = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6} \quad (13.4)$$

Nella Tabella 13.IV si riporta una scala descrittiva per le sabbie basata sull’assortimento granulometrico ovvero, sui valori della deviazione standard della variabile  $\phi$ .

Tabella 13.III Classificazione delle sabbie in funzione della deviazione standard della grandezza  $\phi$  (Folk & Ward, 1957).

Classificazione miscele sabbiose	$\sigma_\phi$
Uniforme	0.35
Ben selezionata	0.50
Moderatamente selezionata	1.00
Assortita	2.00
Molto assortita	4.00
Estremamente assortita	

### 13.3.3. Velocità di sedimentazione

La velocità, di sedimentazione è usualmente definita come la velocità finale raggiunta da un granulo che si deposita in un fluido in quiete sotto l’azione della gravità.



Detta velocità dipende da numerosi parametri, quali la dimensione del sedimento, la densità specifica, la forma del granulo e la viscosità del fluido. Nel caso semplice di sedimentazione di una particella specifica di diametro  $d$ , tale velocità può essere così determinata: l'azione combinata della gravità e della spinta di Archimede è pari a:

$$F_1 = (\gamma_s - \gamma) \frac{\pi d^3}{6} \quad (13.8)$$

in cui  $\gamma_s$  e  $\gamma$  indicano rispettivamente il peso specifico del granulo e dell'acqua. La forza idrodinamica (drag) esercitata su di un corpo immerso è pari a:

$$F_2 = \frac{1}{2} C_d \rho A |u_p| u_p \quad (13.9)$$

in cui  $\rho$  rappresenta la densità dell'acqua,  $A$  l'area della sezione maestra della particella,  $C_d$  è il coefficiente di resistenza e  $u_p$  la velocità della particella. In condizioni di equilibrio le due suddette azioni devono bilanciarsi per cui la velocità di sedimentazione risulta pari a:

$$w = \sqrt{\frac{4(s-1)gd}{3C_d}} \quad (13.10)$$

Il coefficiente di resistenza  $C_d$  non è costante ma varia in funzione del numero di *Reynolds* della particella definito come segue:

$$Re = \frac{wd}{\nu} \quad (13.11)$$

in cui  $w$  è la velocità di sedimentazione,  $d$  è il diametro e  $\nu$  la viscosità cinematica dell'acqua. Se ne evince quindi come una corretta valutazione del coefficiente di resistenza risulti complessa, per cui si rimanda il lettore interessato a *Dietrich* (1982) per una più approfondita descrizione, tuttavia si può qui dire brevemente che nel diagramma che esprime il coefficiente di resistenza (drag) in funzione del numero di *Reynolds* si possono distinguere tre intervalli; nel primo, caratterizzato da bassissimi valori del numero di *Reynolds*, esso è pari a:

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (13.12)$$

nel secondo, per valori di *Reynolds* ricadenti nell'intervallo  $10 \div 10^3$ , può essere espresso attraverso la formula (*Fredsoe & Deigaard*, 1992):

$$C_d = 1.4 + \frac{36}{Re} \quad (13.13)$$

(che consente quindi la valutazione in forma analitica della velocità di sedimentazione); nel terzo intervallo, per valori di *Reynolds* superiori a  $10^3$  il coefficiente può essere (ai fini pratici) assunto costante e pari a:

$$C_d = 0.4 \quad (13.14)$$

### 13.4. Classificazione delle spiagge

#### *13.4.1. Classificazione in base alla granulometria dei sedimenti*

Tale classificazione si basa sulle caratteristiche sedimentologiche del materiale che compone quella parte di spiaggia che si trova tra i livelli medi di bassa ed alta marea del periodo primaverile (detti livelli di seguito sono indicati come MLWS e MHWS rispettivamente).

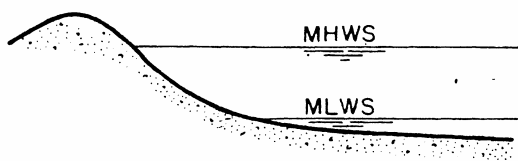
Usualmente le spiagge, in base alla granulometria che le compone, vengono classificate in quattro classi:

- spiagge di ciottoli;
- spiagge di ciottoli nella parte alta e sabbie nella parte bassa;
- spiagge miste di ciottoli e sabbie;
- spiagge di sabbie.

L'appartenenza ad uno dei quattro gruppi è stabilita sulla base della distribuzione granulometrica dei sedimenti. Tuttavia è da notare che, mentre per definire l'appartenenza alla prima o all'ultima classe non è importante la localizzazione del campione, per l'appartenenza alla seconda classe è invece importante prelevare diversi campioni lungo il profilo di spiaggia.

Per meglio chiarire gli effetti sulla morfologia della spiaggia, è opportuno fare riferimento alla Figura 13.4. di seguito riportata, che rappresenta per ogni gruppo succitato sia la schematizzazione del profilo sia l'andamento qualitativo della curva granulometrica.

### Shingle beach

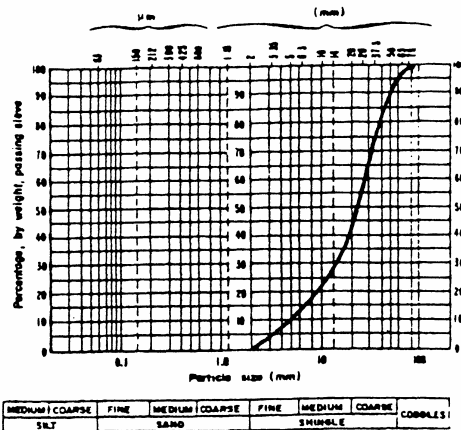


Typical Features:

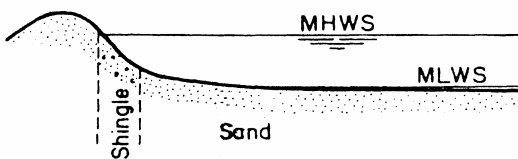
Slope 1:6 ~ 1:10

$D_{50}$  10 → 40 mm

$(D_{75}/D_{25})^{1/2}$  1.5 → 2.0



### Shingle upper/sand lower beach

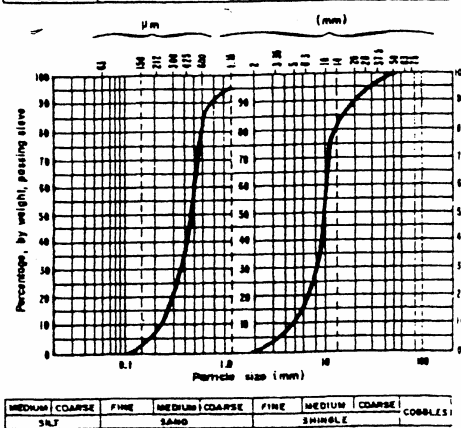


Typical Features:

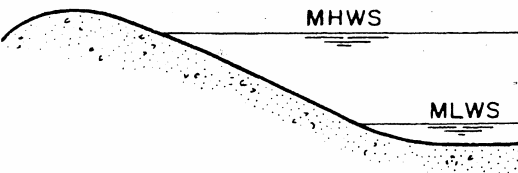
Slope Shingle 1:10 Sand 1:40

$D_{50}$  10 → 40 mm 0.3 mm

$(D_{75}/D_{25})^{1/2}$  1 → 2.4 1 → 2.3



### Shingle / sand mixed beach

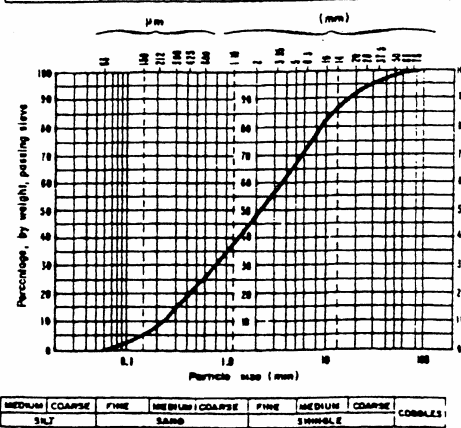


Typical Features:

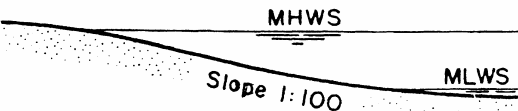
Slope: 1:30

$D_{50}$  2.0 mm

$(D_{75}/D_{25})^{1/2}$  4.7 → 5.6



### Sand beach



Typical Features:

Slope: 1:100 +

$D_{50}$  0.3 mm

$(D_{75}/D_{25})^{1/2}$  1 → 2.3

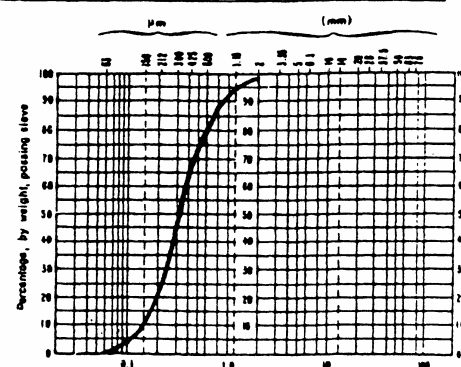


Figura 13.4. Classificazione dei profili di spiaggia in funzione della granulometria dei sedimenti. Per ogni tipologia è anche rappresentata una curva granulometrica tipica. Il rapporto  $(d_{75}/d_{25})^{1/2}$  è assunto come indice dell'assortimento granulometrico.

Gli indici ritenuti significativi per la classificazione sono il  $d_{50}$ ,  $d_{25}$  e  $d_{75}$ . La classificazione principale è effettuata sulla base del valore del  $d_{50}$ , mentre il grado di assortimento granulometrico è espresso tramite il coefficiente  $(d_{75}/d_{25})^{1/2}$ .

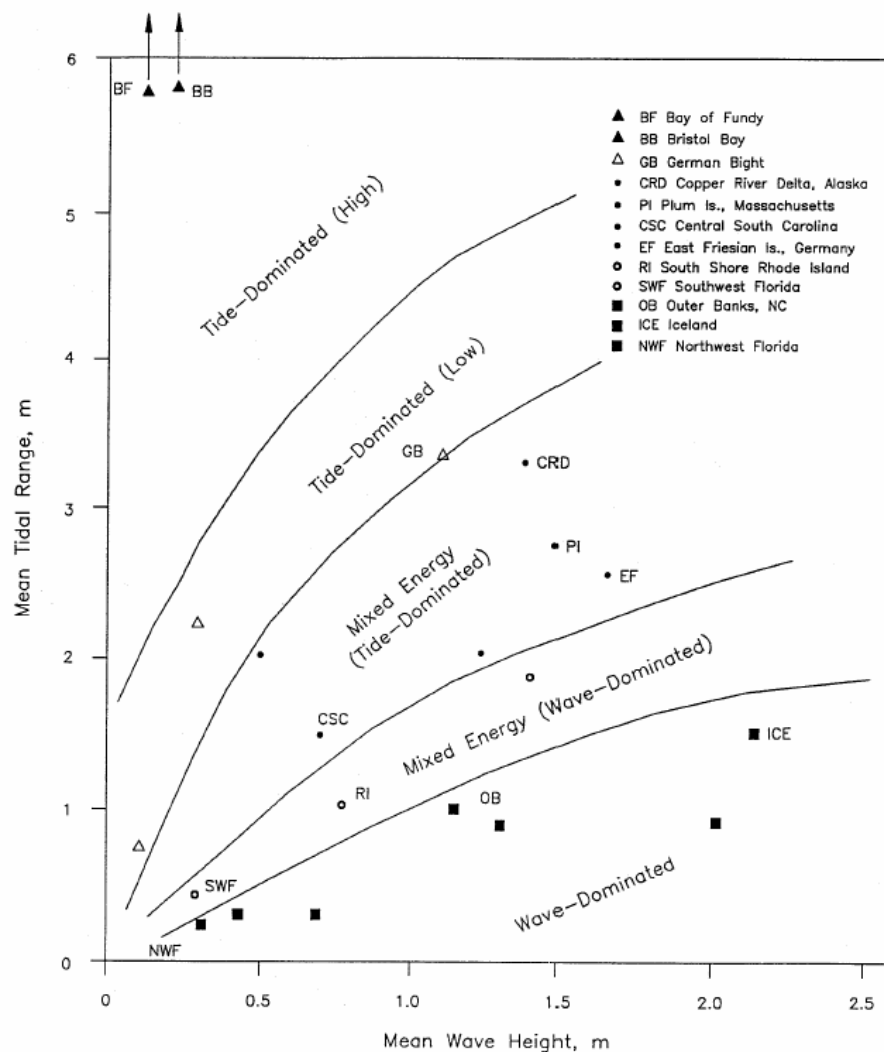
#### 13.4.2. *Classificazione in base all'escursione di marea*

Le spiagge possono essere classificate in base all'escursione di marea che le caratterizza (ovvero, in altri termini, all'energia). Vengono usualmente identificate cinque classi. E precisamente.

- microtidale (con escursione <1m);
- basso-mesotidale (con escursione nel range 1-2m);
- alto meso-tidale (con escursione nel range 2-3.5m);
- basso macrotidale (con escursione 3.5-5m);
- macrotidale (con escursione >5m).

Nel tentativo di classificare le spiagge in base all'escursione di marea, ma anche in base all'energia del moto ondoso, è stata introdotta la classificazione riportata nella Figura XXX che riportando l'escursione di marea in funzione dell'altezza media, individua 5 classi.

In effetti il tentativo di classificare le spiagge in maniera semplice viene oggi visto come un esercizio non sempre interessante, soprattutto per i molteplici fattori che intervengono ad influenzare la morfologia costiera (come, ad esempio, la presenza di corsi d'acqua, la disponibilità di sedimenti, ovvero la meteorologia).



### 13.5. Possibili profili di spiaggia

#### 13.5.1. Profilo estivo e profilo invernale

Il moto ondoso determina il movimento di sedimenti lungo il profilo di spiaggia, ossia in direzione perpendicolare alla costa.

Effetti tipici di tale trasporto solido sono i profili di spiaggia, cosiddetti, “invernale” ed “estivo” (vedi Figura 13.5). Infatti, durante l’inverno il moto ondoso medio è più intenso che in estate, per cui parte del materiale al fondo viene spostato verso il largo e la pendenza della spiaggia nella zona dei frangenti diventa più dolce. Come risultato di tale trasporto possono essere create una o più barre litoranee off-shore.

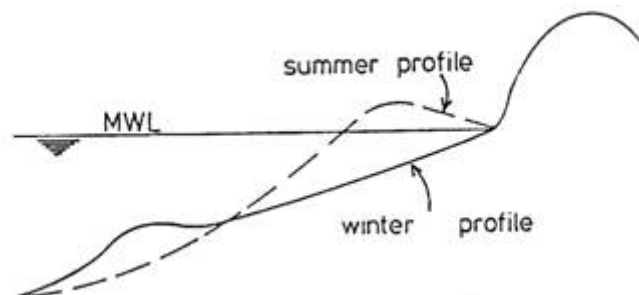


Figura 13.5. Esempio di profilo di spiaggia invernale (winter profile) e di profilo di spiaggia estivo (summer profile).

Un esempio di quanto appena detto è mostrato in Figura 13.6, che mostra l'evoluzione verso il largo di una barra litoranea, registrata durante i mesi invernali, in seguito a tre mareggiate.

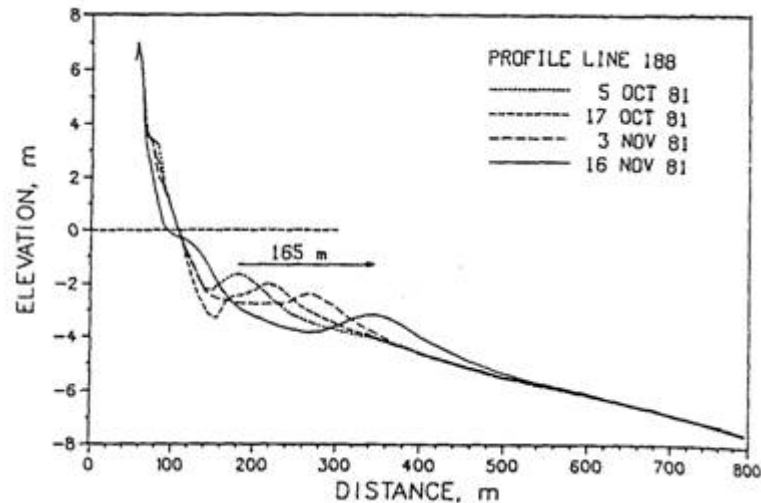


Figura 13.6. Misure di un profilo di spiaggia dopo tre mareggiate successive, con spostamento off-shore della barra litoranea (*Birkmeier*, 1984).

In estate, invece, l'altezza d'onda mediamente diminuisce, mentre il periodo in genere aumenta, per cui ha luogo una ricostruzione del profilo di spiaggia, il trasporto solido avviene dunque prevalentemente verso costa e grazie al fenomeno della risalita del moto ondoso (run-up) si ha la costruzione di una berma. Un esempio tipico di profilo di spiaggia nel periodo estivo è rappresentato in Figura 13.7.

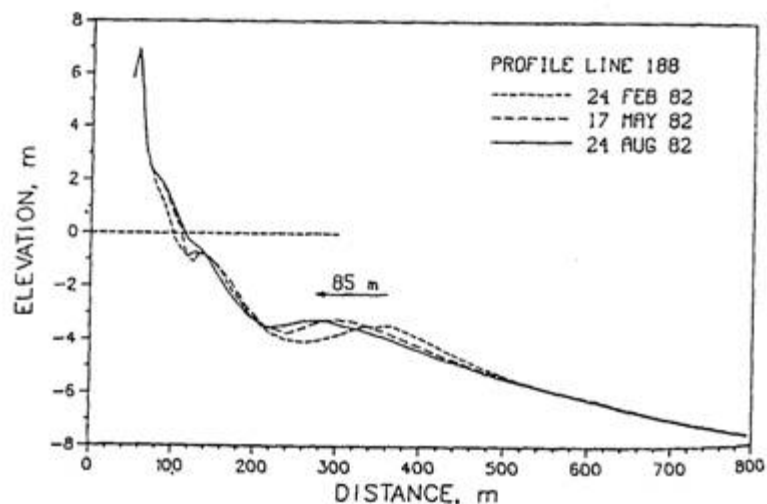


Figura 13.7. Ricostruzione del profilo di spiaggia durante i mesi estivi.

A determinare quale tipo di profilo di spiaggia si sviluppi sono soprattutto le caratteristiche del moto ondoso. *Jonhson* (1952) considera come parametro determinante la

pendenza dell'onda in acque profonde  $H_0/\lambda_0$  (rapporto tra altezza e lunghezza d'onda) e individua un valore critico di tale parametro come significativo della transizione dal profilo estivo a quello invernale

$$\frac{H_0}{\lambda_0} = 0.025 \div 0.03 \quad (13.15)$$

In effetti, nel tempo, sono stati realizzati numerosi studi sia di laboratorio sia di campo, volti ad individuare indicatori di erosione o di accrescimento della spiaggia sulla base delle caratteristiche meteomarine. Un altro indice, sulla base della velocità di sedimentazione dei sedimenti  $w$  di cui la spiaggia è composta, propone:

$$\frac{H_0}{wT} \begin{cases} \geq 3.2 & \text{erosione} \\ < 3.2 & \text{accrescimento} \end{cases} \quad (13.16)$$

### 13.5.2. Il profilo di equilibrio

Se si ipotizza, in via assolutamente astratta, che il moto ondoso si presenti con le stesse caratteristiche per un periodo abbastanza prolungato nel tempo, è lecito immaginare che si svilupperà un profilo di spiaggia cosiddetto di "equilibrio" (vedere Figura 13.7).

Un'espressione frequentemente usata per la descrizione del profilo di equilibrio è quella di *Bruun (1954)*:

$$h = Ay^{\frac{2}{3}} \quad (13.16)$$

in cui  $h$  è la profondità;  $y$  è la distanza dalla linea di spiaggia;  $A$  è un fattore dimensionale [ $m^{1/3}$ ] che risulta dipendere soprattutto dalla granulometria dei sedimenti (vedere al riguardo la Figura 13.8).

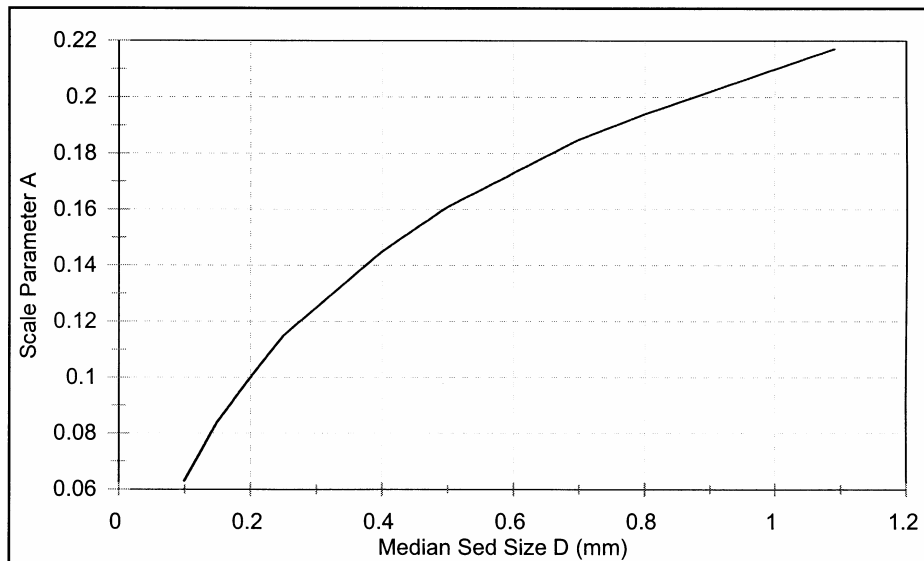


Figura 13.8. Andamento del parametro A del profilo di equilibrio in funzione della granulometria ( $d_{50}$ ).

Il profilo rappresentato attraverso la (13.16) è mostrato in Figura 13.9. Come si osserva chiaramente dalla figura, la suddetta equazione non considera la presenza di barre e cavi, ma essa deve essere considerata come la migliore approssimazione di un profilo passante attraverso tali caratteristiche morfologiche del fondo.

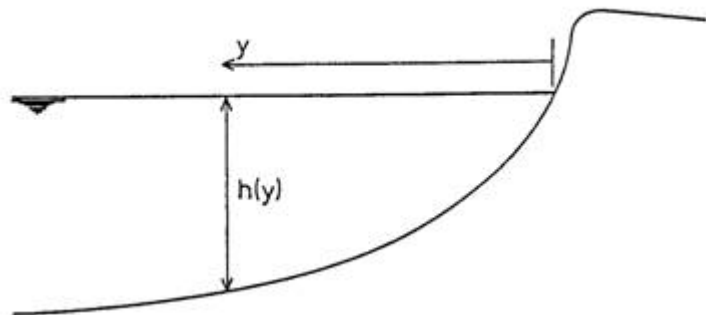


Figura 13.9. Profilo di equilibrio (*Bruun*, 1954).

In natura, le condizioni del campo di moto sono in realtà in continua evoluzione, di conseguenza anche il profilo di spiaggia cambia continuamente, tendendo a raggiungere il profilo di equilibrio corrispondente. E' evidente come il profilo di equilibrio non possa essere mai raggiunto e che il concetto di profilo di equilibrio è una condizione ideale, mentre sarebbe più corretto parlare di una sorta di equilibrio dinamico, in cui mediando su una scala temporale abbastanza estesa il profilo di spiaggia è più o meno sempre lo stesso.

In effetti, il profilo definito dalla legge di *Brunn* (1954) fornisce profondità crescenti indefinitamente con  $y$ . Ovviamente tale risultato è irrealistico; infatti, un profilo di spiaggia possiede una precisa profondità oltre la quale le condizioni del moto ondoso non producono effetti sul fondo. In altre parole, i sedimenti possono muoversi avanti e indietro ma la profondità non varia più in maniera significativa. Hallermeier (1981) introdusse a tal proposito il concetto di profondità di chiusura, appositamente indicato come:

$$h_c = 2.28H_{s,12} - 68.5 \left( \frac{H_{s,12}^2}{gT_{s,12}^2} \right) \quad (13.17)$$

in cui  $H_{s,12}$  è l'altezza significativa che mediamente è uguagliata o superata solo 12 ore in un anno e  $T_{s,12}$  il periodo corrispondente. L'altezza significativa che entra nella relazione (13.17) può essere calcolata tramite l'altezza significativa media e la deviazione standard delle altezze significative tramite la relazione:

$$H_{s,12} = \bar{H} + 5.6\sigma_H \quad (13.18)$$

Sulla base di questa ultima relazione, *Birkemeier* (1985) notò che la semplice legge di proporzionalità diretta di seguito riportata fornisce comunque predizioni sufficientemente accurate per le pratiche applicazioni:

$$h_c = 1.57H_{s,12} \quad (13.19)$$

Il concetto di profilo di equilibrio torna particolarmente utile nei progetti di ripascimento. Infatti, come si evince dalla Figura 13.10 (da notare che con il pedice "N" si indicano le caratteristiche



della sabbia pre-esistente o “native sediments”, mentre con il pedice “ $F$ ” si indicano quelle della sabbia utilizzata per il ripascimento “fill sediments”), a seconda che la granulometria della sabbia utilizzata per il ripascimento sia più grossolana ovvero più fine di quella preesistente, possono realizzarsi tre diverse tipologie di profili. Detti profili, per mutazione dalla corrispondente terminologia anglosassone, sono chiamati “intersecanti”, “non intersecanti” e “sommersi”.

Prima di andare oltre è tuttavia opportuno introdurre i seguenti parametri adimensionali:  $A' = \frac{A_F}{A_N}$  ;

$\Delta y' = \frac{\Delta y}{W^*}$  ;  $B' = \frac{B}{h^*}$  ;  $V' = \frac{V}{(BW^*)}$  ; in cui  $V$  indica il volume di sabbia apportato per unità di

larghezza della spiaggia;  $B$  è l'altezza della berma ed  $h^*$  è la profondità in cui il nuovo profilo si troverà in condizioni di equilibrio. Tale profondità, in generale, viene assunta pari alla profondità di chiusura. E' importante infine notare che la distanza  $W^*$  si basa sul fattore  $A_N$  , ossia quello relativo alla sabbia esistente in loco prima del ripascimento; infatti si ricava come:

$$W^* = \left( \frac{h^*}{A_N} \right)^{3/2} \quad (13.20)$$

L'importanza della granulometria si evince anche dalla Figura 13.11 in cui sono rappresentati quattro diversi profili, ciascuno caratterizzato da un medesimo valore di volume aggiunto per unità di larghezza, ma da  $A_F$  decrescenti (dall'alto verso il basso).

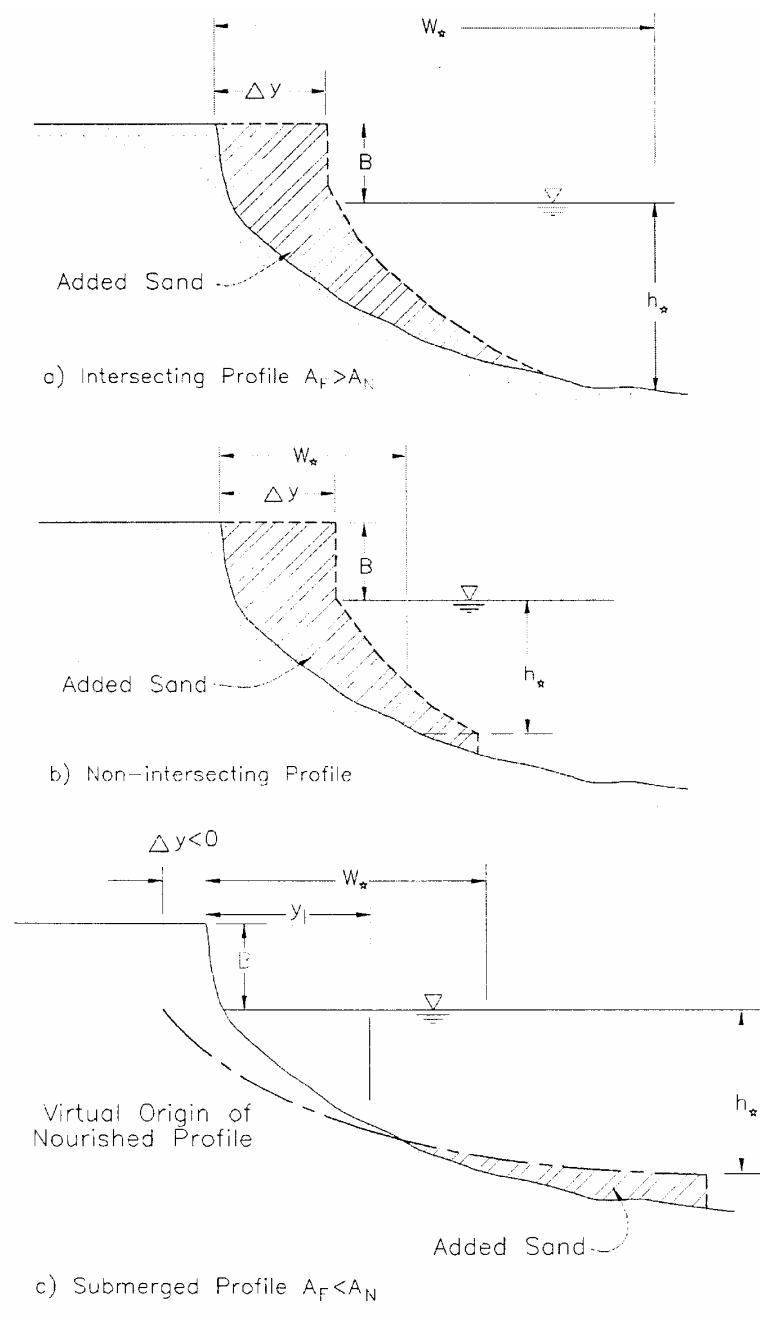


Figura 13.10. Tipologie di profili di spiagge soggette a ripascimento (dall'alto vero il basso): (a) profilo intersecante; (b) profilo non intersecante; (c) profilo sommerso.

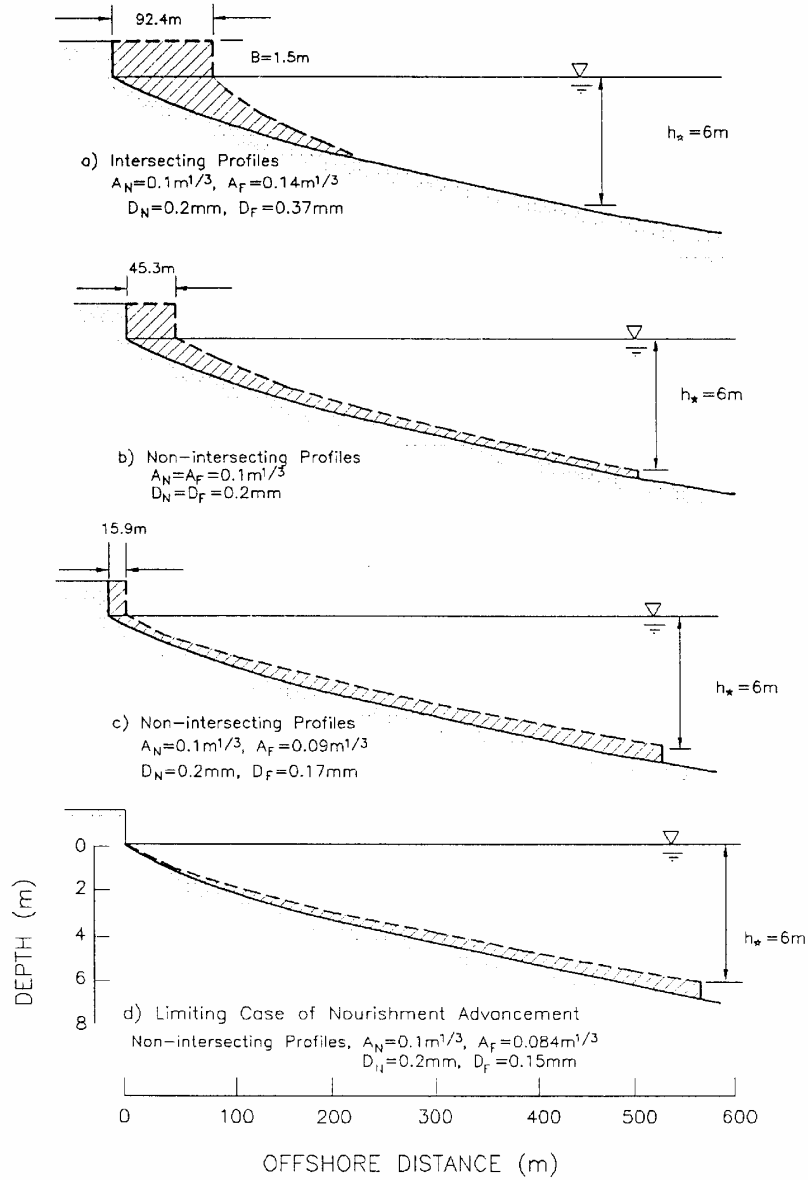


Figura 13.11. Effetto del fattore  $A_F$  sulla larghezza del ripascimento (Dean, 1991).

E' possibile dimostrare che la larghezza del spiaggia emersa a seguito di ripascimento  $\Delta y'$  può essere espressa in termini di tre grandezze dimensionali. E precisamente:

$$\Delta y' = f(B', V', A) \quad (13.21)$$

Se si assume che il materiale utilizzato per il ripascimento è composto da una granulometria più grossa (o al più uguale) a quella della sabbia del posto, le relazioni che esprimono la condizione di intersezione o di non intersezione dei profili possono essere formulate come segue:

$$\hat{f} = \Delta y' + \left( \frac{1}{A'} \right)^{3/2} - 1 \begin{cases} < 0, \\ > 0, \end{cases} \quad (13.22)$$

se  $\hat{f} < 0$ , si hanno profili intersecanti, se  $\hat{f} > 0$  si ottengono invece profili non intersecanti. Una volta che si è discriminato il caso di profili intersecanti o non intersecanti, è possibile determinare il volume adimensionalizzato corrispondente ad un avanzamento della spiaggia emersa pari a  $\Delta y'$ . Più precisamente, dando per scontato il fatto che la sabbia del ripascimento non è più piccola di quella del posto, nel caso di profili intersecanti si ha:

$$V_1' = \Delta y' + \frac{3}{5B'} (\Delta y')^{5/3} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{1}{A'}\right)^{3/2}\right]^{2/3}} \quad (13.23)$$

mentre per profili non intersecanti si ha:

$$V_2' = \Delta y' + \frac{3}{5B'} \left\{ \left[ \Delta y' + \left(\frac{1}{A'}\right)^{3/2} \right]^{5/3} - \left(\frac{1}{A'}\right)^{3/2} \right\} \quad (13.24)$$

Il caso di profilo sommerso non viene qui preso in considerazione poiché di scarso interesse applicativo.

Ovviamente le considerazioni relative ai ripascimenti non possono esaurirsi nei semplici calcoli sopra esposti. Infatti, come si vedrà più avanti, la scelta del ripascimento deve essere innanzitutto motivata da considerazioni socio-economiche e inoltre bisogna porre attenzione non solo ai volumi di sabbia che bisogna apportare ma anche alla compatibilità dei sedimenti. Compatibilità che deve essere accertata non solo da punto di vista geologico ma anche, specialmente per spiagge di interesse turistico, dal punto di vista cromatico

Esempio: Si supponga di voler determinare il volume necessario di sabbia per ampliare una spiaggia di 50 m. Si supponga inoltre che:  $B = 2$  m,  $D_N = D_F = 0.25$  mm,  $\Delta y = 50$  m,  $\bar{H} = 1.5$  m,  $\sigma_H = 0.4$  m

Per i valori assegnati della granulometria si ottiene:

$$- A_F = A_N = 0.115 m^{1/3};$$

Quindi si calcola il valore della profondità di chiusura tramite la seguente espressione:

$$- h^* = 1.57(\bar{H} + 5.6\sigma_H) \cong 5.9;$$

L'ampiezza del tratto di profilo soggetto alla mobilità, ossia soggetto al trasporto, è dato da:

$$- W^* = \left( \frac{h^*}{A_N} \right)^{3/2} = 367 m$$

Da tutto quanto sopra si ricavano le seguenti grandezze adimensionali:

$$\Delta y' = \frac{\Delta y}{W^*} = 0.136; \quad B' = \frac{B}{h^*} = 0.34; \quad A' = \frac{A_F}{A_N} = 1.$$

Dal momento che le due sabbie (quella del ripascimento e quella del posto) presentano le stesse granulometrie, appare chiaro che i profili saranno non intersecanti tra loro. Pertanto il volume necessario può essere calcolato tramite la formale:

$$V_2' = \Delta y' + \frac{3}{5B'} \left\{ \left[ \Delta y' + \left(\frac{1}{A'}\right)^{3/2} \right]^{5/3} - \left(\frac{1}{A'}\right)^{3/2} \right\} = 0.554;$$

che conduce ad un volume di sabbia per unità di larghezza della spiaggia pari a  $407\text{m}^3/\text{m}$ . Il risultato ottenuto è riportato nella Figura 13.12 di seguito riportata.

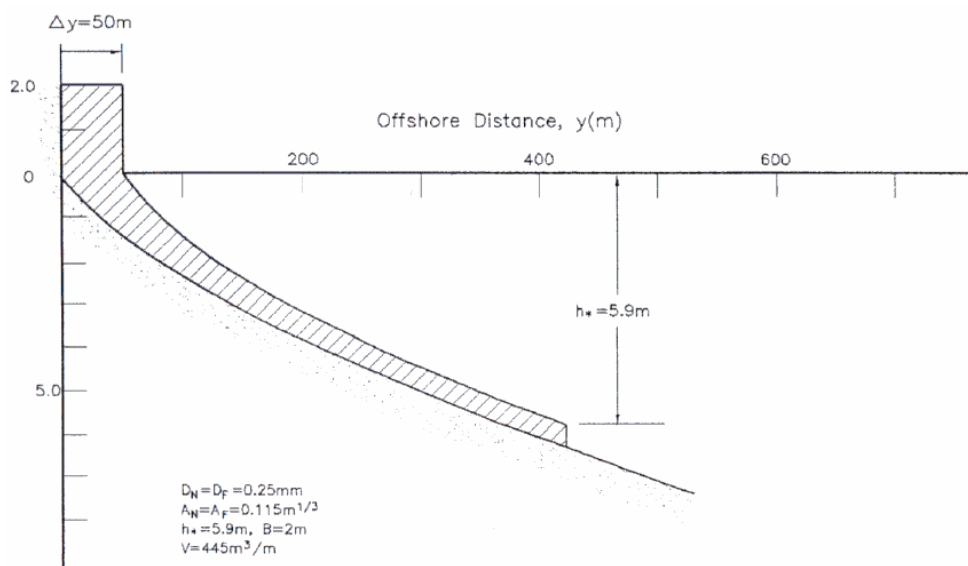


Figura 13.12. Schema di profilo di un ripascimento effettuato con sabbie aventi granulometria identica a quella del posto.

### 13.6. Possibili andamenti planimetrici di spiaggia

Sulla base di un'analogia con l'analisi dei profili di spiaggia, è possibile introdurre il concetto di spiaggia d'equilibrio come significativo di un andamento planimetrico tale per cui l'energia trasferita dal moto ondoso è esattamente pari a quella per trasportare i sedimenti che pervengono alla spiaggia. Ovviamente tale equilibrio è estremamente difficile da raggiungere. Tuttavia vi sono dei casi pratici in cui tale schematizzazione si avvicina moltissimo alla situazione reale.

L'esempio più elementare che si possa fare è quello di una spiaggia prima di trasporto netto litoraneo. Questa situazione è spesso raggiunta dalle spiagge a tasca (o pocket beach nella letteratura anglosassone) caratterizzate, come si evince dalla Figura 13.13, dall'essere racchiuse da due promontori. Esse pertanto non risultano alimentate da sedimenti e peraltro, proprio per la presenza dei promontori, presentano una perdita di sedimenti pressoché nulla.

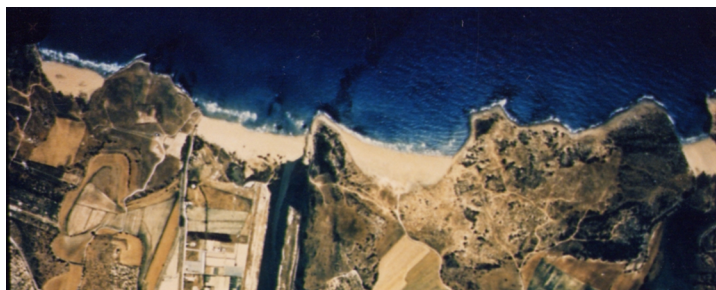


Figura 13.13. Esempio di spiaggia alveolare (*pocket beach*) lungo un tratto di litorale siracusano (località: Eloro).

In una siffatta situazione, la morfologia planimetrica della spiaggia dipende solamente dalle condizioni meteomarine e, più precisamente, dai fenomeni di rifrazione e di diffrazione.

Si consideri infatti un mare morto che si propaga con un angolo d'attacco non nullo verso la spiaggia. Assumiamo inoltre che tale condizione sia quella prevalente per il paraggio in esame. Laddove l'onda frange in prossimità della riva si produrrà un trasporto litoraneo, perlomeno fino a dove l'onda continua a frangere con un angolo d'attacco non nullo. In tali condizioni appare evidente che la condizione di equilibrio della pocket beach sarà raggiunta nel momento in cui lungo la spiaggia si creerà, a seguito delle modificazioni morfologiche, un angolo d'attacco nullo e, di conseguenza, un trasporto nullo. Infatti, poiché non è pensabile incidere sull'energia del moto ondoso, la configurazione di equilibrio si può realizzare solo attraverso una modificazione morfologica che porti ad un trasporto nullo, peraltro ottenibile solo con una disposizione della spiaggia in ogni punto ortogonale al moto ondoso. Ricordando che le onde che si avvicinano alla riva subiscono i fenomeni di rifrazione e di diffrazione, si evince come la configurazione della spiaggia dipende dalla topografia dei fondali che, per l'appunto, controlla i citati fenomeni. Ovviamente bisogna sottolineare che, sebbene la configurazione di lungo periodo è quella che prevede un flusso netto longitudinale di sedimenti nullo, i singoli treni d'onda possono generare angoli d'attacco non nulli e, conseguentemente, un trasporto long-shore non nullo.

Se la pocket beach è alimentata da una sorgente di sedimenti, allora la configurazione di equilibrio deve essere tale da produrre un angolo d'attacco che produca una corrente long-shore in grado di ridistribuire sulla spiaggia i sedimenti in arrivo sull'intera spiaggia. L'esempio più tipico di una situazione di questa tipo si ha quando la spiaggia è interessata da un corso d'acqua il quale tende a formare un foce a delta.

In letteratura sono state proposte diverse configurazioni geometriche per descrivere le spiagge in condizioni di equilibrio. *Yasso* (1965), ad esempio, ha proposto la spirale logaritmica per descrivere le spiagge che si formano sottoflutto a un ostacolo che interrompa il trasporto long-shore. In effetti tale configurazione si realizza di frequente, come si vede dalla Figura 13.14 che riporta un tratto di litorale siracusano in cui risulta evidente a valle di un promontorio l'andamento a spirale. La legge usualmente adottata per descrivere tali spiagge è data dalla seguente espressione (rappresentata in Figura 13.15):

$$r = r_o e^{(\cot \alpha)\theta} \quad (13.25)$$

in cui  $r$  è il raggio di curvatura dal centro della spirale alla curva;  $r_o$  è il raggio di curvatura dal centro della spirale all'inizio della curva;  $\theta$  è l'angolo tra il generico raggio  $r$  e  $r_o$ ;  $\alpha$  è l'angolo (costante) tra la tangente alla curva in ogni suo punto e il raggio  $r$  nel punto.



Figura 13.13. Esempio di spiaggia a spirale causata dalla presenza di un ostacolo (un promontorio nella fattispecie) che blocca il trasporto di sedimenti (litorale siracusano: oasi di Vendicari).

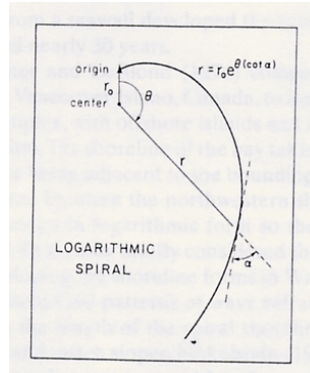


Figura 13.14. Esempio di spirale logaritmica in coordinate polari (vedere equazione 13.25).

Il buon adattamento tra la spirale teorica e l'andamento planimetrico di una spiaggia naturale è evidenziato dalla Figura 13.15 in cui è riportata la sovrapposizione tra la spiaggia naturale di Halfmoon Bay in California e l'andamento della curva teorica sopra richiamata.

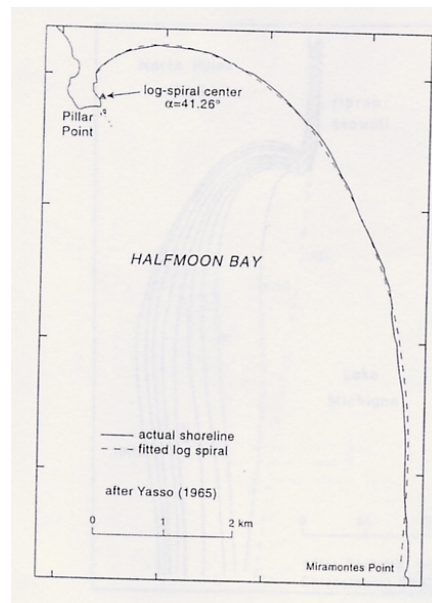


Figura 13.15. Sovrapposizione della spiaggia descritta dalla (13.25) e della spiaggia di Halfmoon Bay (California).

In una serie di articoli Sylvester ha analizzato le cosiddette “crenulate-shaped bays”, presentando esempio sia di spiagge naturali sia di spiagge comprese tra pennelli o frangiflutti realizzati per stabilizzare la spiaggia. Come anche illustrato nella Figura 13.16, una siffatta spiaggia si realizza, ad esempio, tra due frangiflutti. Essa inoltre risulta costituita da due componenti: i) la spiaggia protetta dalla struttura, che presenta uno spiccato andamento a spirale; ii) un tratto pressoché rettilineo, che si realizza in prossimità della seconda struttura sottoflutto. Ancora una volta la conformazione è dovuta ai fenomeni di rifrazione e di diffrazione che si realizzano a seguito di un attacco obliquo del moto ondoso in prossimità delle strutture.

Da notare che il tratto pressoché rettilineo, modificando in maniera poco significativa la direzione di propagazione del moto ondoso, risulta orientato nella stessa direzione delle creste al largo. Pertanto è possibile nelle spiagge naturali determinare la direzione di provenienza delle onde dominanti proprio dall'analisi di tali tratti di spiaggia.

Per quanto concerne invece il tratto a spirale logaritmica, esso risulta principalmente dovuto al fenomeno di rifrazione e, in qualche misura, anche dalla diffrazione attorno alla testata della struttura.

Da tutto quanto sopra brevemente sposto si evince che la spiaggia risulterà in equilibrio quando la linea di frangimento e la linea di spiaggia saranno tra loro parallele.

In Figura 13.17 è riportato l'andamento dell'angolo d'attacco al largo (corrispondente all'angolo formato dalla zona rettilinea della spiaggia) in funzione delle caratteristiche geometriche del varco.

E' opportuno precisare che la morfologia della linea di costa di spiagge che non hanno raggiunto l'equilibrio non può essere studiata attraverso una semplice correlazione con le caratteristiche del moto ondoso incidente a causa delle incertezze sulla dinamica del trasporto solido.

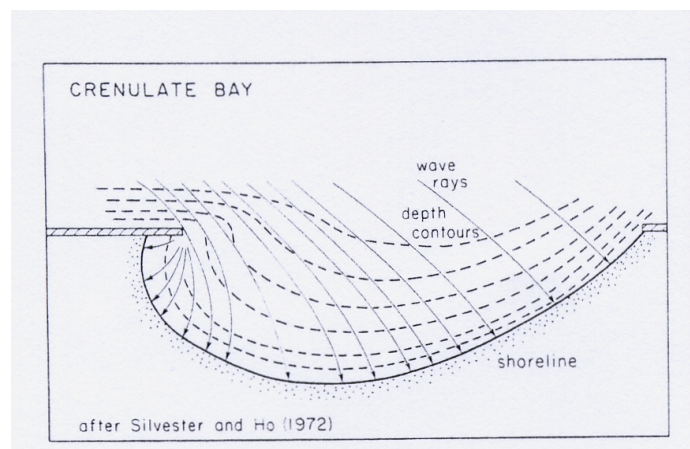


Figura 13.16. Esempio di formazione di una “crenulate-bay” forzata da un attacco obliquo del moto ondoso in corrispondenza della apertura tra due strutture di protezione della spiaggia.

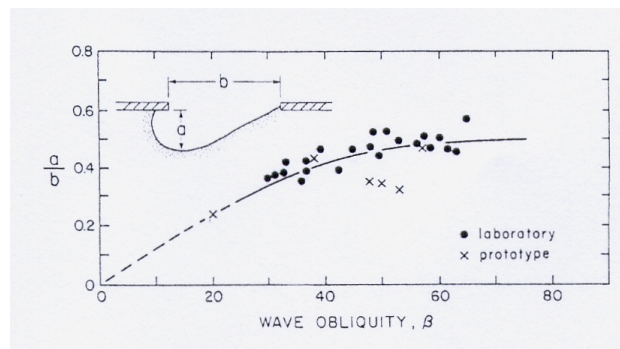


Figura 13.16. Geometria di una crenulate-bay (definita dal rapporto  $a/b$ ) in funzione dell'angolo d'attacco al largo del moto ondoso incidente.