



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di IDRAULICA MARITTIMA

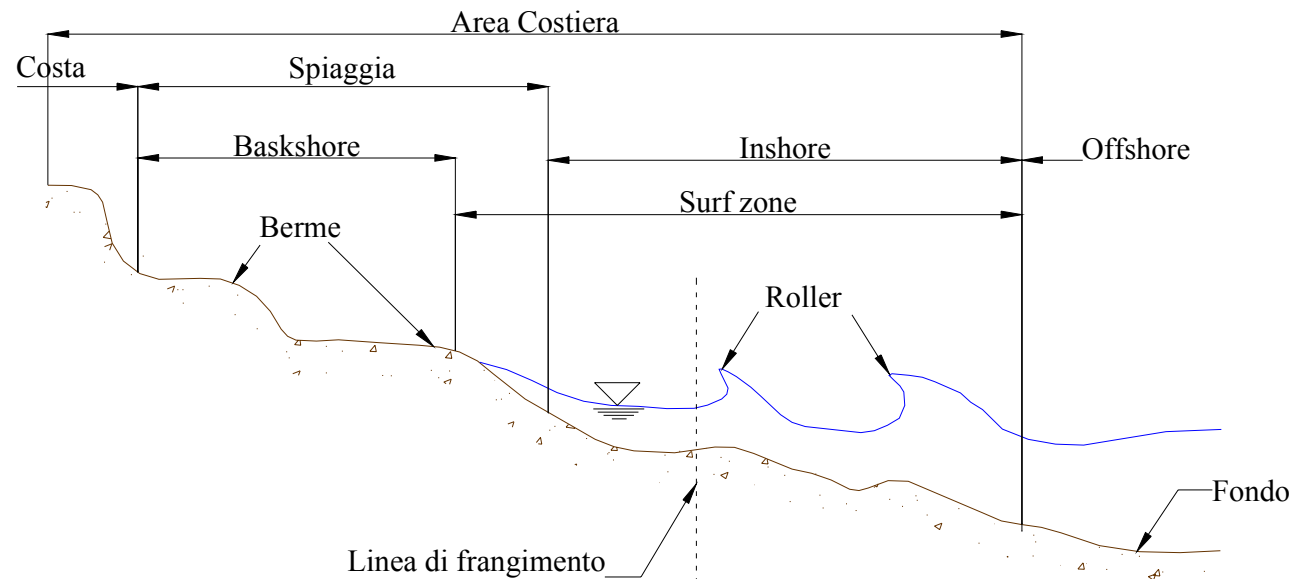
EVOLUZIONE DELLA LINEA DI COSTA

Prof. Ing. Enrico FOTI

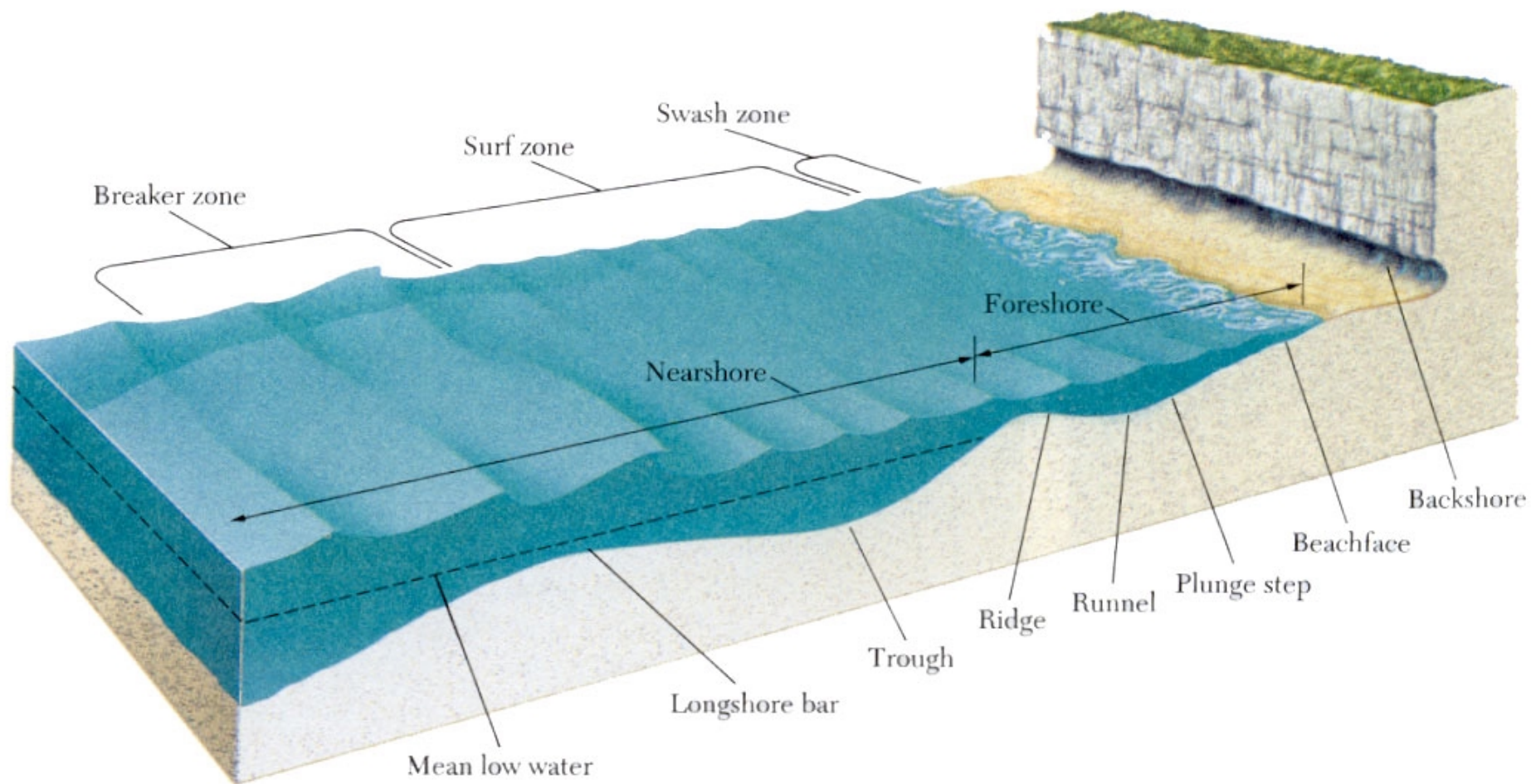
LA SPIAGGIA (1/2)

La linea di spiaggia, punto di intersezione tra terra e mare, è il punto dove i fenomeni anzi detti “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 ci si riferirà nel seguito.

A causa della complessità dei processi costieri e delle diverse nomenclature utilizzate è opportuno introdurre una chiara definizione circa i termini che verranno adottati nel presente ambito (per alcuni termini verrà mantenuta la nomenclatura anglosassone a causa dell'uso diffuso in letteratura) (SPM; 1984).



LA SPIAGGIA (2/3)



LA SPIAGGIA (3/3)

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;
SURFZONE	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 <i>frangimento</i> ;
LINEA DI FRANGIMENTO	luogo dei punti in cui avviene il frangimento

CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI (1/4)

I sedimenti variano in modo notevole sia per quanto riguarda le dimensioni che per quanto attiene alla forma e alla composizione. Quest'ultima, in realtà, non sempre gioca un ruolo determinante dal momento che la frazione predominante di sedimenti è costituita da sabbia di quarzo chimicamente inerte e resistente alle azioni meccaniche. Tuttavia è possibile trovare carbonati, provenienti dalla disgregazione di coralli e conchiglie, calcite, metalli pesanti, materie organiche, limo e argilla. Ovviamente a seconda della composizione questi materiali sono caratterizzati da pesi specifici diversi.

Peso specifico (kg/m ³)		
Quarzo 2.650		
Minerali pesanti >2.870 (2.870 a 3.330)		
	Secca	Satura
Sabbia uniforme		
-Sciolta	1442	1890
-Densa	1746	2082
Sabbia mista		
-Sciolta	1586	1986
-Densa	1858	2163
Argilla		
-glaciale	-	2066
-organica	-	1426

CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI (2/4)

Altra grandezza significativa per la caratterizzazione dei sedimenti è la densità di impaccamento dei granuli. Essa infatti, oltre ad essere rilevante sotto il profilo geologico, in quanto significativa di come i granuli si sono depositati, è importante ai fini della mobilità dei sedimenti. Essa solitamente viene misurata indirettamente attraverso la misura della porosità.

Dimensione	Satura
Sabbia grossolana	39-41
Sabbia media	41-48
Sabbia fine	44-49
Limo e argille	50-54

Ovviamente la proprietà fondamentale per la caratterizzazione dei sedimenti è la dimensione che viene specificata attraverso il diametro. Quest'ultimo non ha il significato noto dalla geometria ma ne assume un altro puramente convenzionale. Esso infatti rappresenta la misura delle maglie di una rete che riesce a far appena passare il sedimento considerato. La scala di misura dei diametri usualmente adottata è quella di Udden-Wentworth (1922), detta anche scala ϕ , di seguito riportata, che si basa sulla relazione $d = 2^{-\phi}$.

CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI (3/4)

Wentworth Udden (1922)		Phi $\varphi = -\log_2 (d)$	d (mm)	Microns (μm)
Massi		-8	256	
		-7	128	
Ciottoli		-6	64	
		-5	32	
Ghiaia ciottol.		-4	16	
		-3	8	
Ghiaia		-2	4	
		-1	2	
	Molto grossa	0	1	1000
	Grossolana			
		+1	$\frac{1}{2}$	500
Sabbia	Media			
		+2	$\frac{1}{4}$	250
	Fine			
		+3	$\frac{1}{8}$	125.0
	Molto fine			
		+4	$\frac{1}{16}$	62.5
	Grossolano			
		+5	$\frac{1}{32}$	31.3
	Medio			
		+6	$\frac{1}{64}$	15.6
Limo	Fine			
		+7	$\frac{1}{128}$	7.8
	Molto fine			
		+8	$\frac{1}{256}$	3.9
	Grossolana			
		+9	$\frac{1}{512}$	1.95
	Media			
		+10	$\frac{1}{1024}$	0.98
	Fine			
		+11	$\frac{1}{2048}$	0.49
Argilla	Molto fine			
		+12	$\frac{1}{4096}$	0.24
	Colloidale			

CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI (4/4)

Dal momento che i sedimenti costieri non sono costituiti da un'unica dimensione, essi vengono classificati come misture attraverso la deviazione standard della variabile ϕ .

Classificazione delle miscele sabbiose	
Uniforme	0.35
Ben selezionata	0.50
Moderatamente selezionata	1.00
Assortita	2.00
Molto assortita	4.00
Estremamente assortita	

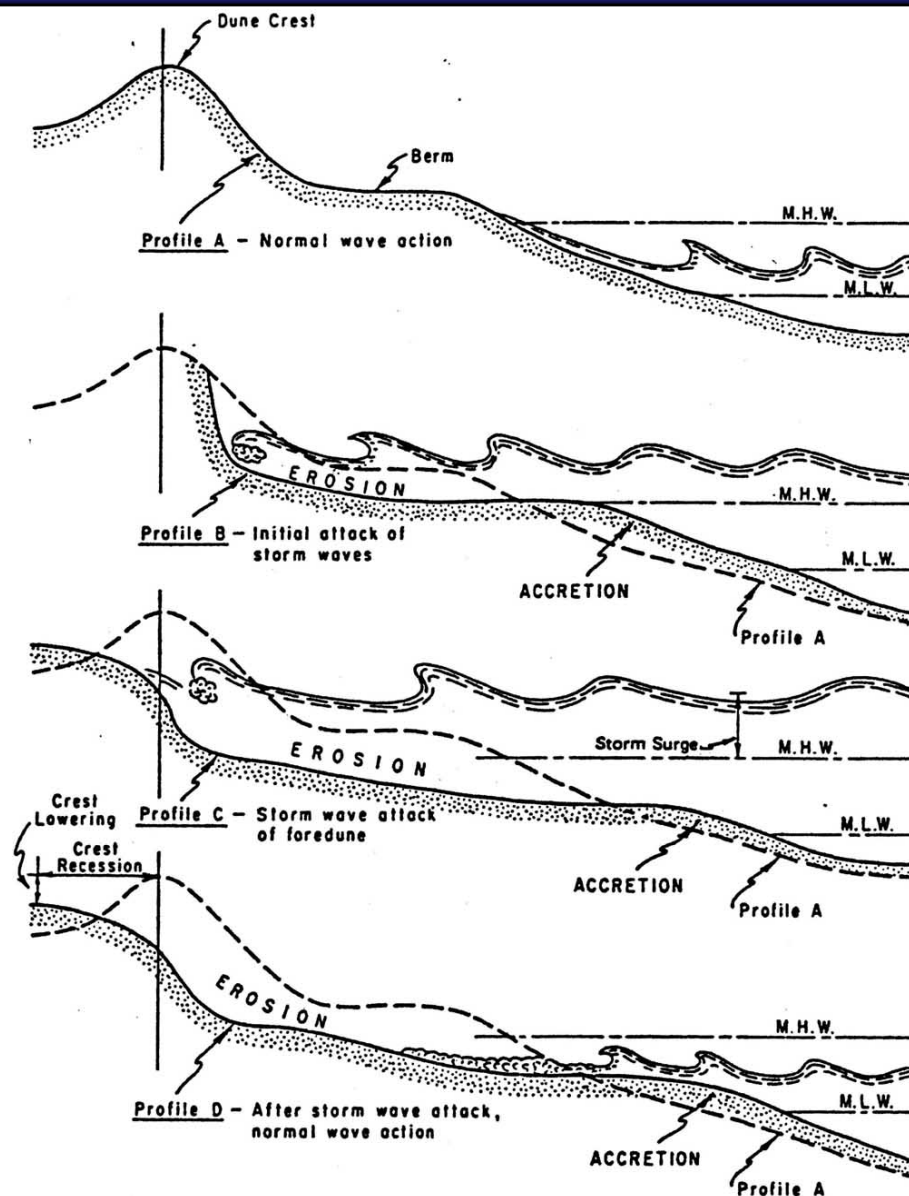
RISPOSTA DELLA SPIAGGIA (1/2)

La spiaggia sostanzialmente modifica il suo profilo in maniera tale da far dissipare tutta l'energia residua dal frangimento. Ciò viene fatto attraverso il trasporto di sedimenti verso il largo fino ad una distanza in cui le velocità sono talmente basse da consentire il deposito o, eventualmente, una *barra*. Durante una mareggiata questi effetti sono notevolmente esaltati.

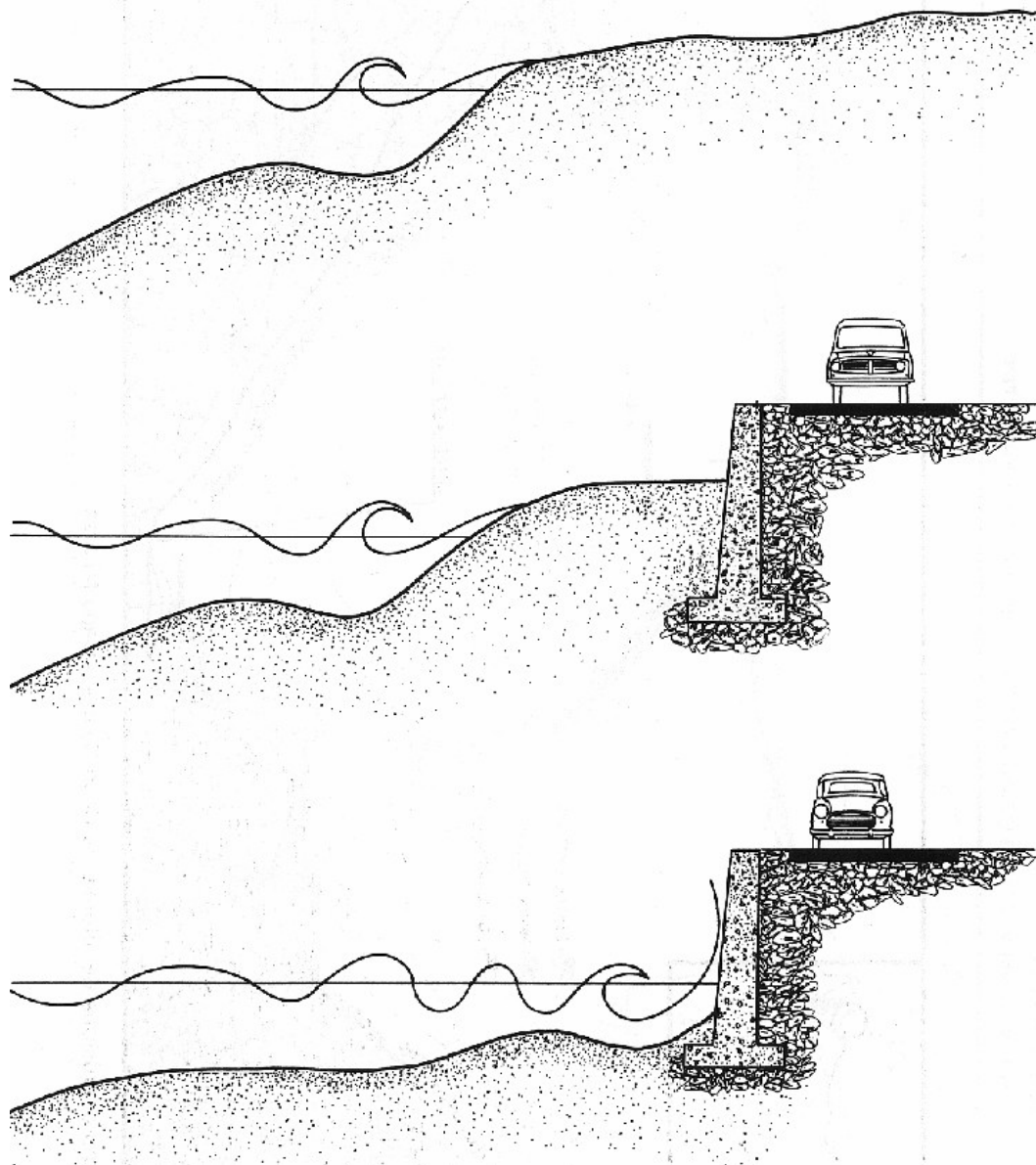
Il processo di erosione che avviene può essere schematizzato come segue:

1. I forti venti generano onde molto ripide e possono provocare un innalzamento del livello del mare;
2. l'innalzamento del mare consente il passaggio delle onde sopra la barra foranea senza frangere;
3. l'onda frange laddove però la profondità non è tale da dissipare l'energia ancora presente;
4. l'energia residua viene spesa per erodere la spiaggia, la berma, e, talvolta, anche la duna;
5. il materiale eroso viene trasportato al largo dove forma una barra foranea;
6. questa nuova barra cresce fino a far frangere le onde.

RISPOSTA DELLA SPIAGGIA (2/2)



COSTRUZIONE DI UN MURO IN PROSSIMITÀ DELLA SPIAGGIA



BUDGET DEI SEDIMENTI (1/2)

L'applicazione del budget dei sedimenti risulta di fondamentale importanza perché, attraverso la valutazione delle *sorgenti* e dei *pozzi* di materiale che intervengono nel sistema spiaggia, si possono stimare eventuali processi di deposito o di erosione.

Il budget dei sedimenti è in pratica l'applicazione del *principio di continuità* o di conservazione della massa ai sedimenti litoranei. Infatti la variazione della presenza di sabbia in un sistema è funzione della quantità di sabbia apportata nei confronti di quella perduta. La difficoltà nell'effettuare tale bilancio risiede nella comprensione degli elementi che influenzano il sistema stesso ovvero nella stima dei contributi e delle perdite.

Le più tipiche applicazioni del budget di sedimenti sono quelle che cercano di stimare gli effetti che può causare l'alterazione di un sistema come ad esempio la realizzazione di una diga lungo il corso di un fiume o di una costruzione marittima come un frangiflutti.

BUDGET DEI SEDIMENTI (2/2)

Le cause che possono rilevarsi ai fini della generazione di apporti o perdite di materiale lungo un tratto di costa delimitato da elementi considerati stabili sono numerose, alcune di esse vengono evidenziate nella seguente tabella:

APPORTI	PERDITE
Trasporto litoraneo (entro l'area di interesse)	Trasporto litoraneo (fuori dall'area di interesse)
Apporti fluviali	Presenza di canyon sottomarini (trasporto off-shore)
Ripascimento artificiale	Prelievo artificiale di materiale
Trasporto verso la costa dovuto al vento	Trasporto verso il mare dovuto al vento
Erosione di scogliere	Abrasione e soluzione

TRASPORTO LITORANEO

Il trasporto di sedimenti litoraneo è usualmente suddiviso in due classi:

TRASPORTO ONSHORE/OFFSHORE

perpendicolare alla spiaggia, è determinato, innanzitutto, dalla ripidità dell'onda, dalla dimensione dei sedimenti e dalla pendenza del profilo di spiaggia. In generale, onde molto ripide tendono a trasportare i sedimenti verso il largo, mentre onde piccole di lungo periodo tendono a trasportare i sedimenti verso la riva.

TRASPORTO LONGSHORE

parallelo alla linea di costa, è dovuto alla concomitanza di due fenomeni, il frangimento, che porta in sospensione i sedimenti, ed il trasporto vero e proprio dovuto alle correnti litoranee.

TRASPORTO ONSHORE-OFFSHORE

Le variazioni nella configurazione del profilo di una spiaggia sono solitamente dovute al trasporto di sedimenti in direzione normale alla costa (trasporto onshore - offshore). Se ad esempio si provasse ad effettuare successive misurazioni di un profilo di spiaggia si potrebbero facilmente riscontrare delle variazioni annuali sistematiche generalmente correlate alla stagione estiva e a quella invernale.

Complessivamente però il volume di materiale interessato dagli spostamenti è lo stesso per cui i cambiamenti non sono quantitativi ma riguardano unicamente la forma del profilo di spiaggia.

Tale spostamento di materiale onshore - offshore viene generalmente correlato alla pendenza dell'onda ma risulta difficilmente quantificabile per cui nel bilancio totale dei sedimenti resta incognito o viene addirittura trascurato visto che la componente di trasporto solido longshore è notevolmente più elevata.

TRASPORTO LONGSHORE (1/5)

Al principio secolo scorso si riteneva che il trasporto litoraneo fosse principalmente dovuto alle maree ed alle correnti oceaniche che interessano la costa. Studi effettuati in seguito hanno però mostrato come in effetti tale trasporto sia dovuto, a meno di casi eccezionali, a correnti parallele alla costa generate dal moto ondoso.

Fin dal 1967 sono state sviluppate numerose teorie per lo studio della generazione delle correnti litoranee da parte di onde con angolo di attacco non ortogonale alla costa.

BOWEN (1969) suggerì che la componente litoranea dovuta ad un attacco obliquo fosse generata dalla componente litoranea della spinta totale:

Le sue teorie furono poi sviluppate negli anni successivi giungendo a varie formulazioni dei profili di velocità della corrente all'interno della zona di frangimento.

TRASPORTO LONGSHORE (2/5)

A partire da queste esperienze, KOMAR (1976), dedusse per primo che il flusso di energia litoranea potesse dipendere dalla portata solida in direzione long-shore:

$$P_l = (EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b$$

in cui:

$(EC_g)_b$,

è il flusso di energia per unità di larghezza ortogonale al raggio d'onda;

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8}$$

è l'energia dell'onda valutata al frangimento;

H_b

è l'altezza d'onda al frangimento;

$$C_{gb} = \sqrt{gh_b}$$

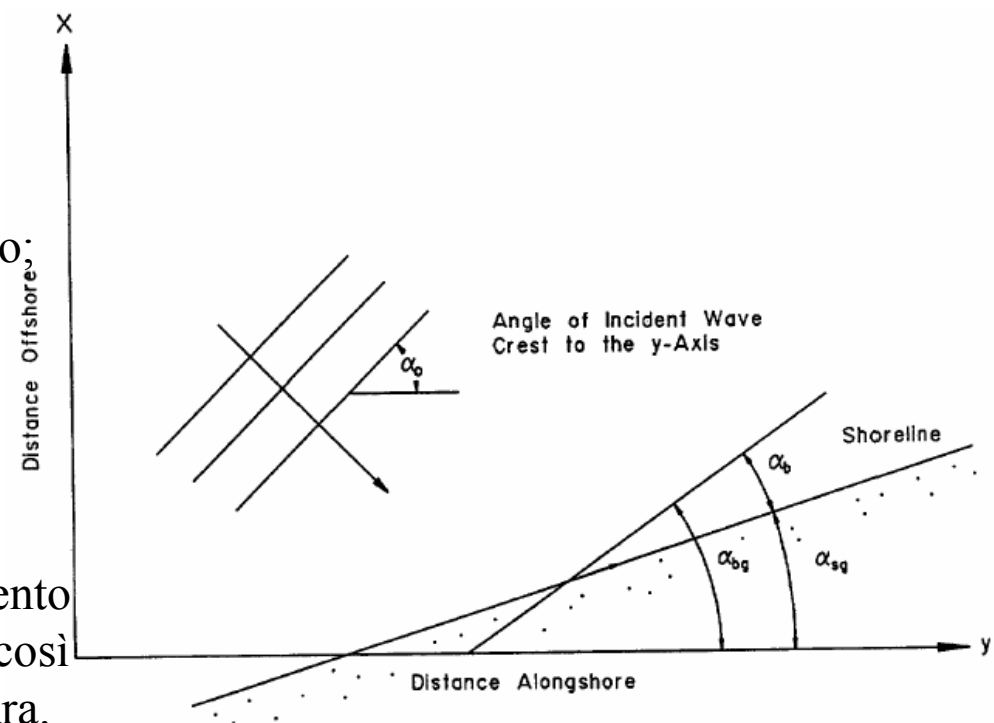
è la celerità di gruppo valutata al frangimento;

h_b

è la profondità al frangimento;

α_b

è l'angolo formato dalla linea di frangimento e dalla linea di costa, così come illustrato in figura.



TRASPORTO LONGSHORE (3/5)

Nel 1963 INMAN e BAGNOLD correlarono la variabile P_1 al flusso di materiale solido longitudinale espresso in peso immerso:

$$I_1 = (\rho_s - \rho)g(1 - n)Q_1$$

in cui:

ρ_s è la densità dei grani che costituiscono il sedimento;

ρ è la densità dell'acqua;

g è l'accelerazione di gravità;

n è la porosità;

Q_1 è la portata in sabbia trasportata long-shore;

La correlazione di cui sopra è sintetizzabile nella formula:

$$I_1 = KP_1$$

in cui, essendo il flusso di materiale solido longitudinale espresso in peso immerso dimensionalmente uguale alla portata solida in direzione long-shore, il coefficiente K è adimensionale.

Il suddetto coefficiente è stato valutato, sulla base di esperimenti e di misure di campo, da KOMAR ed INMAN (1970) i quali, mediante un'analisi 'best fit', giunsero alla determinazione del valore:

$$K = 0.70$$

TRASPORTO LONGSHORE (4/5)

L'equazione $I_1 = KP_1$ diventa quindi:

$$I_1 = 0.70(EC_g)_b \sin\alpha_b \cos\alpha_b$$

Introducendo nella precedente le espressioni dell'energia dell'onda valutata al frangimento e della celerità di gruppo valutata al frangimento, si ottiene:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.70 \frac{\rho g H_b^2}{8} \sqrt{gd_b} \sin\alpha_b \cos\alpha_b \Rightarrow I_1 = 0.096 \rho g H_b^2 \sqrt{gd_b} \sin\alpha_b \cos\alpha_b \Rightarrow \\ &\Rightarrow I_1 = 0.048 \rho g H_b^2 \sqrt{gd_b} \sin(2\alpha_b) \end{aligned}$$

A questo punto occorre fare delle considerazioni sulla celerità di gruppo $C_{gb} = \sqrt{gd_b}$.

Esprimendo il rapporto tra l'altezza d'onda e il profondità al frangimento in funzione dell'indice di frangimento $\kappa = \frac{H_b}{d_b}$ si ottiene $C_{gb} = \sqrt{g \frac{H_b}{\kappa}}$.

In quanto segue si supporrà che l'indice di frangimento abbia valore unitario perché i valori sul trasporto dei sedimenti sono troppo sparsi per potere ammettere possibili variazioni di κ

TRASPORTO LONGSHORE (5/5)

Usando l'equazione $I_1 = (\rho_s - \rho)g(1-n)Q_1$ tutte le relazioni che riguardano il flusso di materiale solido longitudinale espresso in peso immerso possono essere convertite in relazioni in funzione della portata in sabbia trasportata long-shore:

$$Q_1 = \frac{0.70}{(\rho_s - \rho)g(1-n)} P_1$$

Considerando $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ per sabbia di quarzo, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ per l'acqua di mare, $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$, $n = 0.4$ e, utilizzando il fattore di conversione da secondi a giorni, la relazione scritta in precedenza diventa:

$$Q_1 = 2.6 P_1$$

In cui P_1 è espresso in watt/m o, in maniera equivalente, in N/s e Q_1 , a seguito della conversione in giorni, è espresso in m^3/giorno .

Dalla precedente si ottiene, sostituendo una delle precedenti espressioni di P_1 :

$$Q_1 = 2.6 \left(\frac{\rho g H_{bs}^2}{8} \right) \left[(g H_{bs})^{\frac{1}{2}} \right] \sin \alpha_b \cos \alpha_b$$

e quindi la *C.E.R.C. Formula*:

$$Q_1 = (5.1 \times 10^3) H_{bs}^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b)$$

TRASPORTO FLUVIALE

Il principale apporto di sedimenti su una spiaggia è solitamente quello dovuto al trasporto solido fluviale che viene generalmente diviso in due contributi:

- trasporto in sospensione;
- trasporto al fondo.

Il trasporto solido fluviale può essere stimato utilizzando le numerose relazioni disponibili in letteratura. Queste relazioni giungano alla quantificazione del materiale trasportato dal corso d'acqua sulla base di misure relative alla corrente, alla dimensione dei sedimenti presenti ed alle caratteristiche della sezione che costituisce l'alveo.

La stima della portata solida può essere effettuata anche sulla base di correlazioni tra le precipitazioni nel bacino del fiume in esame e la portata solida. Tale approccio solitamente di minore precisione possiede comunque il vantaggio di risultare applicabile anche nei casi in cui non siano disponibili misure della portata liquida del corso d'acqua.

Particolare attenzione deve infine prestarsi allo studio degli eventuali *estuari* che in taluni casi possono finire con l'intrappolare il fiume e quindi il materiale trasportato che non riesce così a giungere in mare. Addirittura, in presenza di maree, la corrente può persino finire con il trasportare materiale all'interno dell'estuario che diviene così, nell'ambito di un bilancio complessivo, una fonte di perdita per il sistema.

EROSIONE DI SCOGLIERA

L'erosione di una scogliera può diventare un contributo estremamente importante per un sistema, anche se generalmente il suo apporto non supera il 5-10 % del materiale presente su una spiaggia. In casi particolari può però diventare un fenomeno di notevole importanza visto che, in mancanza di protezioni adeguate, la scogliera può arretrare anche di tratti superiori al metro per anno.

Il materiale eroso entra quindi a far parte del sistema e la sua stima può essere effettuata misurando attraverso rilievi topografici l'arretramento della scogliera e moltiplicando poi tale misura per l'altezza e la lunghezza del tratto interessato dal fenomeno.

Il volume eroso ottenuto deve essere corretto prima di essere inserito nel budget di sedimenti per tener conto della percentuale di materiale che rimane effettivamente sulla spiaggia.

TRASPORTO DOVUTO AL VENTO

Il vento può essere una sorgente di materiale per la spiaggia ma nella maggior parte dei casi, dal momento che il vento soffia verso la costa, finisce con il rimuovere la sabbia trasportandola verso zone più interne.

Tipico risultato di tale processo è la generazione di dune la cui dimensione può risultare utile per stimare l'entità di materiale eventualmente perduto dalla spiaggia in un certo periodo.

CANYON SOTTOMARINI

I canyon sottomarini possono risultare di rilevante importanza nell'ambito del budget di sedimenti visto che bloccano il trasporto di sedimenti indirizzandolo verso acque ad elevata profondità. Situazioni di questo genere sono comunque molto rare e più spesso l'ingresso dei canyon avviene in acque molto profonde in prossimità della scarpata continentale così che i canyon non intervengono nel budget di sedimenti.

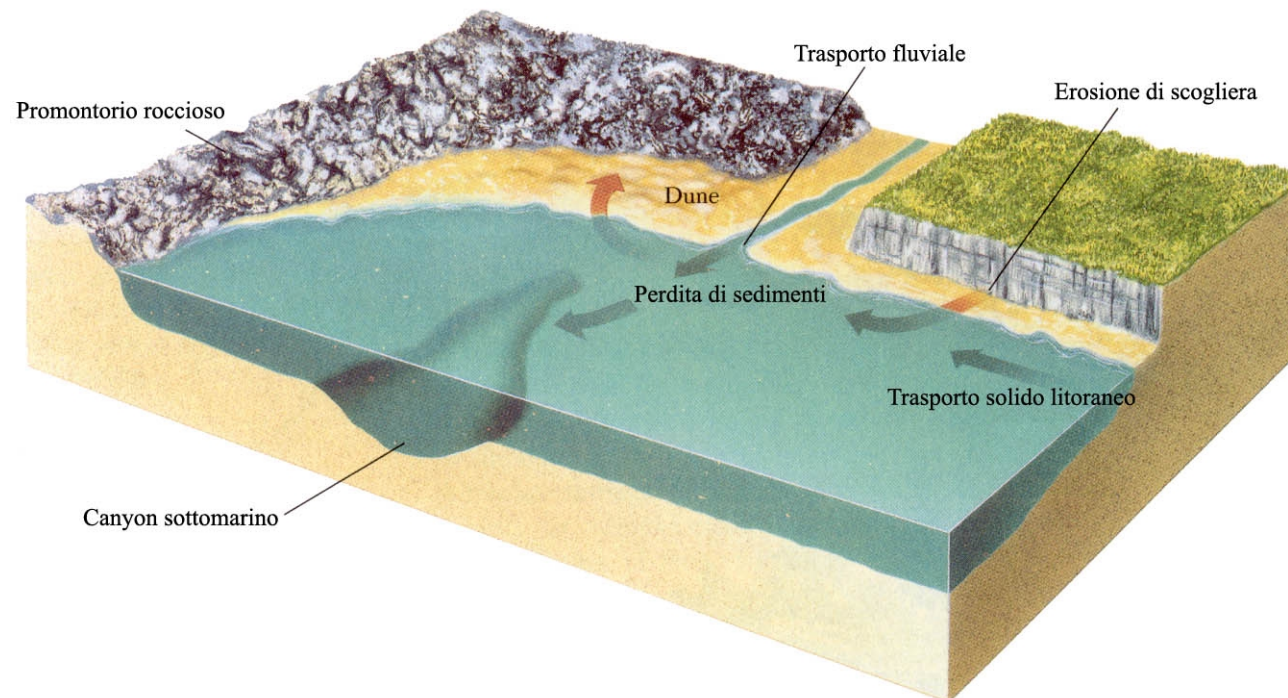
RIPASCIMENTO E PRELIEVO ARTIFICIALE

Un metodo per stabilizzare e proteggere lunghi tratti della costa è quello di porre sabbia sulla spiaggia. Il materiale viene solitamente prelevato da zone adiacenti e particolare attenzione deve prestarsi nei confronti della granulometria del materiale riportato visto che, se troppo fine, sarebbe rapidamente perduto.

Il prelievo di materiale ha effetto opposto a quello appena descritto visto che finisce con il facilitare l'erosione costiera. Per tale motivo il prelievo di sabbia dalla spiaggia è generalmente proibito.

ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL BUDGET DEI SEDIMENTI (1/4)

Si consideri un tratto di spiaggia delimitato a sud da un promontorio roccioso mentre da nord arriva, a causa della direzione prevalente delle onde, un contributo di sedimenti S_l . In aggiunta a tale quantità risulta poi necessario considerare l'apporto di materiale dovuto all'erosione della scogliera S_{cf} e la sabbia trasportata da un fiume S_r . Le principali perdite di sabbia sembrano invece imputabili alle dune formate dal vento e alla presenza di un canyon sottomarino. L'erosione cui è stata soggetta la spiaggia in esame lascia intuire che negli ultimi cinque anni ci sia stato un deficit negativo nel bilancio tra apporti e perdite.



ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL BUDGET DEI SEDIMENTI (2/4)

Trasporto longshore

Attraverso una studio statistica delle onde al largo ed utilizzando la formula CERC si perviene al seguente risultato:

$$\begin{aligned} S_{l\text{ sud}} &= 105.000 \text{ m}^3/\text{anno}; \\ S_{l\text{ nord}} &= 35.000 \text{ m}^3/\text{anno}; \end{aligned}$$

per cui il trasporto netto verso sud risulta dell'ordine di 70.000 m³/anno.

Tale valore risulta molto elevato se confrontato con quello relativo alle incertezze presenti nel calcolo di SI per cui può essere considerato attendibile.

Erosione della scogliera

Attraverso misure topografiche in campo risulta possibile stimare che la scogliera arretra di circa 0,8 m³/anno. La scogliera risulta inoltre avere un'altezza media pari a 6 metri ed essere esposta all'erosione per una lunghezza totale di 1.270 m. La scogliera è costituita da sabbia e argilla compattate mentre attraverso campionamenti è stato possibile riscontrare che circa il 40% del materiale eroso resta sulla spiaggia.

La stima dell'apporto di materiale dovuto alla scogliera risulta quindi:

$$S_{cf} = 0,8 \text{ m}^3/\text{anno} \times 6 \text{ m} \times 1.270 \text{ m} \times 0,40 = 3.050 \text{ m}^3/\text{anno}.$$

ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL BUDGET DEI SEDIMENTI (3/4)

Apporti fluviali

La realizzazione di una diga sul fiume quindici anni addietro ha causato la diminuzione del bacino effettivamente drenante riducendolo da 1.400 km² a soli 600 km².

L'influenza di tale costruzione si è evidentemente riflessa sul trasporto solido fluviale riducendolo nella seguente misura:

$$\begin{aligned} S_{r \text{ senza diga}} &= 43.690 \text{ m}^3/\text{anno}; \\ S_{r \text{ con diga}} &= 21.300 \text{ m}^3/\text{anno}. \end{aligned}$$

Perdite dovute al vento

Sulla spiaggia risultano presenti una serie di piccole dune. Misurazioni effettuate per cinque anni hanno evidenziato un loro avanzamento verso l'interno della spiaggia quantificabile in circa 0,365 m/anno. Poiché le dune hanno un'altezza di circa 5 m e si estendono per un tratto di costa lungo 1.100 m, il volume di materiale perduto può essere approssimativamente quantificato in:

$$S_d = 0,365 \text{ m/anno} \times 5 \text{ m} \times 1.100 \text{ m} = 2.000 \text{ m}^3/\text{anno}.$$

ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL BUDGET DEI SEDIMENTI (4/4)

Perdite dovute al canyon sottomarino

Non è disponibile alcuna misura precisa della sabbia perduta all'interno del canyon. Effettuando misurazioni su due soli anni è stato possibile stimare una perdita di sabbia pari a circa 200.000 m³, per cui:

$$S_{cy} = 100.000 \text{ m}^3/\text{anno}.$$

Altri apporti o perdite

Non è stato possibile determinare i movimenti di sabbia onshore -offshore ma si suppone che le quantità interessate siano comunque minime e quindi trascurabili. Sulla spiaggia infine non è avvenuto alcun prelievo o apporto artificiale di materiale.