

Università degli Studi di Padova



Dipartimento Ingegneria Civile Edile ed Ambientale

ICEA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea

**SVILUPPO DI UN MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO
PARALLELO E ORTOGONALE A RIVA
PER UN LITORALE SABBIOSO**

*Development of long – shore and cross – shore sediment transport model
for a sandy coastline*

Laureanda: Chiara Favaretto 1020020

Relatore: Ch.mo Prof. Ing. PIERO RUOL

Correlatore: Prof. Ing. LUCA MARTINELLI

A.A. 2012 / 2013

INDICE

1. MOTIVAZIONI E OBIETTIVI.....	7
1.1. Introduzione	8
1.2. Obiettivi	11
1.3. Struttura della tesi.....	12
2. INTRODUZIONE ALLA MORFOLOGIA COSTIERA	13
2.1. Introduzione	14
2.2. Morfologia costiera	16
2.2.1. Caratteristiche fisiche dei sedimenti di spiaggia	21
2.3. I fenomeni di erosione costiera	22
2.4. Classificazione delle opere di difesa	23
2.4.1. I ripascimenti	24
3. MODELLO DI EVOLUZIONE DELL'ONDA.....	27
3.1. Introduzione	28
3.2. Idrodinamica costiera	28
3.3. Rappresentazione dello stato di mare.....	32
3.4. Trasformazioni dell'onda dal largo a riva	36
3.4.1. Rifrazione e Shoaling	37
3.4.2. Frangimento.....	39
3.4.3. Run up.....	42
3.5. Modello di decadimento dell'onda frangente.....	42
3.6. Applicazione del modello di evoluzione dell'onda	45

4. LA CIRCOLAZIONE LITORANEA	49
4.1. Introduzione	50
4.2. La circolazione litoranea.....	51
4.3. Bilancio di massa	52
4.4. Bilancio di quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa.....	53
4.4.1. Set up e Set down	53
4.5. Bilancio di quantità di moto in direzione parallela alla costa	55
4.5.1. Determinazione delle correnti lungo costa con il F.E.M.....	57
4.6. Suddivisione del trasporto solido costiero	69
5. IL TRASPORTO SOLIDO LUNGO COSTA.....	71
5.1. Introduzione	72
5.2. Sollecitazione al fondo dovuta alle correnti.....	74
5.3. Sollecitazione al fondo dovuta al moto ondoso.....	76
5.4. Interazione onde e correnti	77
5.5. Portata solida long - shore con la formula di Bijker	78
5.5.1. Trasporto al fondo	78
5.5.2. Trasporto in sospensione	79
5.6. Portata long - shore con la formula del C.E.R.C.....	82
5.7. Struttura del modello implementato	83
5.8. Conclusioni	85
6. IL TRASPORTO SOLIDO ORTOGONALE A RIVA	87
6.1. Introduzione	88
6.2. Direzione del trasporto cross-shore	88
6.3. Il modello di trasporto di Larson e Kraus	92
6.4. Suddivisione del profilo e formule di trasporto solido	95
6.4.1. Portata solida nella zona I.....	98
6.4.2. Portata solida nella Zona II.....	100
6.4.3. Portata solida nella Zona III	100

6.4.4.	Portata solida nella zona IV	102
6.4.5.	Portata solida nella zona V	103
6.5.	Calcolo numerico della variazione del profilo	104
6.6.	Struttura del modello implementato	110
6.7.	Conclusioni.....	111
7.	VALIDAZIONE DEI MODELLI DI TRASPORTO	113
7.1.	Introduzione	114
7.2.	Validazione del modello per il calcolo della velocità long – shore.....	114
7.3.	Validazione del modello di trasporto lungo riva	116
7.4.	Validazione del modello di trasporto perpendicolare a riva.....	118
7.4.1.	Mareggiata su profilo reale	118
7.4.2.	Profilo invernale	128
7.4.3.	Profilo estivo.....	130
8.	APPLICAZIONE DEI MODELLI DI TRASPORTO	133
8.1.	Introduzione	134
8.2.	Inquadramento geografico	134
8.3.	Clima ondoso	135
8.4.	Trasporto solido costiero stagionale	142
8.4.1.	Andamento del trasporto solido in Autunno	144
8.4.2.	Andamento del trasporto solido in Inverno	147
8.4.3.	Andamento del trasporto solido in Primavera	149
8.4.4.	Andamento del trasporto solido in Estate.....	152
8.5.	Trasporto solido annuale.....	154
	CONCLUSIONI	161
	INDICE DELLE FIGURE.....	163
	BIBLIOGRAFIA	167

1. MOTIVAZIONI E OBIETTIVI

Per mitigare le intense erosioni che si manifestano su diverse spiagge della Regione Veneto, si eseguono sistematici ripascimenti con sabbia sottomarina o di cava; i ripascimenti hanno tuttavia una durata limitata, è dunque importante sapere dove viene trasportata la sabbia, se si disperde al largo oppure se si sposta nei litorali adiacenti. Inoltre, come conseguenza di intense mareggiate invernali, la linea di riva retrocede significativamente; la domanda che ci si pone è se esiste la possibilità di osservare un avanzamento in estate. La gestione della risorsa sabbiosa necessita quindi di strumenti in grado di fornire una risposta a questi quesiti di tipo quantitativo e a grande scala.

Gli obiettivi di questo elaborato sono dunque analizzare i processi fisici legati al fenomeno del trasporto solido che si realizzano lungo il litorale sabbioso della Regione Veneto e mettere a punto degli strumenti in grado di fornire il trasporto parallelo e perpendicolare a riva medio annuo. Si è deciso pertanto di sviluppare dei modelli matematici fisicamente basati in grado di rappresentare i fenomeni della propagazione dell'onda dal largo a riva, del trasporto ortogonale a riva e del trasporto long - shore.

1.1. Introduzione

L'evoluzione del profilo costiero è causata da fenomeni di erosione e di deposito, legati all'effetto del trasporto solido, alla realizzazione di opere di difesa e ad altre attività che interagiscono con l'idrodinamica costiera (apporto fluviale, subsidenza). Le spiagge, dunque, rappresentano un elemento estremamente dinamico della superficie terrestre, costituendo il più efficace tra i metodi di difesa costiera oltre a fornire la possibilità di sviluppo di attività turistiche e ricreative; la loro stabilizzazione e protezione dalle mareggiate rappresentano quindi degli ambiti di grande interesse nell'ingegneria marittima.

L'azione di una mareggiata, anche considerando un intervallo di poche ore, può produrre un'accentuata erosione con la conseguente perdita di un patrimonio ambientale ed economico di notevole pregio. A seguito di intense erosioni su diverse spiagge della Regione Veneto sono stati eseguiti sistematici ripascimenti con sabbia sottomarina o di cava, la cui durata spesso risulta limitata. Lo scorso 16 maggio 2013 si è verificata una mareggiata di grossa entità nel litorale del Comune di Jesolo (Ve), causata da forti venti di Scirocco; tale mareggiata ha provocato ingenti danni economici alle strutture di balneazione presenti sulla costa e ha vanificato le azioni del ripascimento dei mesi precedenti. Comprendere le cause principali di tali fenomeni e prevederne una stima qualitativa e quantitativa risulta opportuno per poter gestire in maniera adeguata la risorsa sabbiosa nella Regione Veneto e allo scopo di valutare gli interventi di protezione dei litorali da effettuare.



Figura 1.1 Danni provocati dalla mareggiata del 16/05/2013 nel litorale di Jesolo (Ve)

Il fenomeno dell'erosione delle coste a lungo termine, ovvero maggiore di 25 m negli ultimi 50 anni, interessa circa il 24 % dei litorali italiani (1200 km su 4800 km totali); è dunque importante effettuare una corretta progettazione degli interventi di difesa delle coste e valutare gli effetti di quelli esistenti.

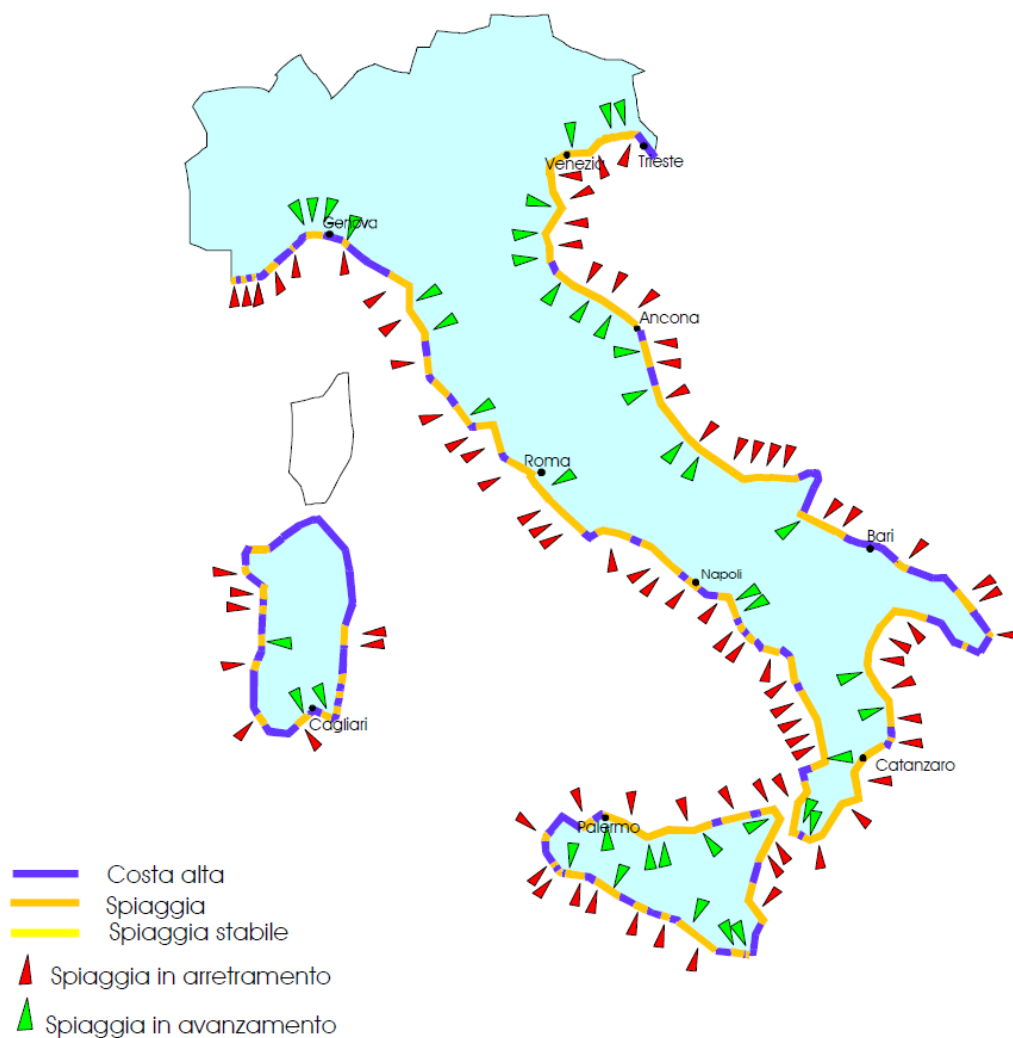


Figura 1.2 Tendenza evolutiva dei litorali italiani (Atlante delle spiagge italiane)

Un nuovo approccio, per affrontare i problemi relativi alla progettazione di un intervento di ingegneria marittima, è quello di utilizzare modelli sia di tipo fisico che di carattere matematico. La possibilità di usufruire di un modello numerico in grado di prevedere il quantitativo di materiale eroso e l'evoluzione della spiaggia costituisce una base importante nello sviluppo delle ipotesi di intervento, nella raccolta dei dati necessari, nel confronto tra diverse opzioni ed infine nell'ottimizzazione della scelta progettuale adottata.

Lo studio del trasporto solido costiero risulta particolarmente complesso poiché è articolata l'idrodinamica dei fenomeni che lo governano. Allo scopo di valutare l'evoluzione dell'ambiente costiero si è soliti suddividere il trasporto nelle due componenti del moto: il trasporto solido trasversale alla linea di riva e il trasporto solido longitudinale alla linea di riva. Il primo è la principale causa dell'evoluzione a breve termine che produce fondamentalmente variazioni locali del profilo, il secondo invece influenza l'evoluzione a lungo termine della morfologia di un litorale.

1.2. Obiettivi

Gli obiettivi principali di questo elaborato sono quelli di analizzare i processi fisici legati al fenomeno del trasporto solido che si realizzano lungo un litorale sabbioso e mettere a punto degli strumenti in grado di fornire il trasporto parallelo e perpendicolare a riva medio annuo.

Si è dunque deciso di sviluppare due modelli in linguaggio Matlab in grado di fornire, attraverso simulazioni numeriche, dati relativi al trasporto solido longitudinale e trasversale e previsioni riguardo la modellazione del fondale. La realizzazione di questi modelli, a differenza dell'utilizzo di modelli commerciali, permette di conoscerne le peculiarità e i limiti consentendo una valutazione critica dei risultati.

Il modello numerico per il calcolo del trasporto solido long – shore si basa sulla formula proposta da Eco W. Bijker che suddivide la portata longitudinale in portata in sospensione e portata al fondo. Il modello implementato per il trasporto cross – shore si basa su quello sviluppato da Magnus Larson e Nicholas C. Kraus per conto dell' "US Army Engineer Waterways Experiment Station" in grado di valutare le conseguenze dell'azione ondosa trasversale sul litorale.

Tuttavia, per eseguire questi modelli, sono stati implementati altri due modelli numerici per la valutazione della trasformazione da largo a riva dell'onda e per la stima, attraverso il metodo degli elementi finiti, della velocità della corrente longitudinale.

1.3. Struttura della tesi

Nella prima parte della presente tesi verranno esposte le opportune premesse teoriche riguardanti la morfologia costiera e i fenomeni dell'idrodinamica costiera. Nel quarto capitolo si esporranno le equazioni alla base della circolazione litoranea e verrà esposto il procedimento numerico per la valutazione della velocità della corrente longitudinale con il metodo degli elementi finiti. Il quinto e il sesto capitolo riporteranno le trattazioni teoriche e le spiegazioni dei modelli implementati per il calcolo del trasporto solido longitudinale e del trasporto solido trasversale. Nel settimo capitolo si effettuerà la validazione dei diversi modelli implementati attraverso confronti con dati sperimentali e con valutazioni in base alle premesse teoriche. Infine nell'ottavo capitolo, assegnato un clima ondoso ricavato da dati Medatlas, si applicheranno i modelli ad un profilo trasversale del litorale di Cortellazzo (Ve).

2. INTRODUZIONE ALLA MORFOLOGIA COSTIERA

Le coste rappresentano un elemento estremamente dinamico e la loro evoluzione è causata da fenomeni di erosione e di deposito. Il loro equilibrio viene influenzato da processi naturali e antropici; è importante conoscere dunque le principali caratteristiche dell'ambiente costiero, le problematiche relative all'erosione e gli interventi di protezione dei litorali maggiormente utilizzati.

2.1. Introduzione

Le coste rappresentano uno degli ambienti naturali più delicati sui quali si concentra un elevato numero di fattori che ne condizionano l'evoluzione. Il loro naturale equilibrio è fortemente influenzato dai processi naturali, i cui trend evolutivi hanno scale temporali di lungo o medio periodo, e quelli antropici, la cui evoluzione nel tempo può anche essere monitorata su base annuale. Il problema che oggi assume maggiore rilevanza è senz'altro l'erosione delle spiagge, sia come trend naturale, riconosciuto ormai su scala globale, sia come fenomeno indotto dalla pressione d'uso della fascia costiera. In Italia il 60% della popolazione vive sulla fascia costiera e le grandi città costiere rappresentano a loro volta circa il 24% della popolazione.

E' soprattutto negli ultimi cento anni che la progressiva urbanizzazione della fascia costiera ha prodotto le maggiori modificazioni degli equilibri. La realizzazione delle vie di comunicazione costiere, la crescente necessità di inerti da costruzione spesso ricavati tramite la coltivazione di cave negli alvei fluviali, la sistemazione dei versanti, la creazione di invasi per uso potabile, irriguo o per la produzione di energia elettrica, l'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acqua/gas) e la costruzione di opere marittime portuali o per la difesa degli abitati hanno prodotto un notevole deficit sedimentario che, sommato alle cause naturali climatiche di variazione del livello del mare o della subsidenza, hanno progressivamente aggravato il fenomeno dell'erosione dei litorali.

All'erosione crescente delle spiagge si cercò anche in passato di porre rimedio attraverso diverse strategie e tipi di intervento; la legge sulla difesa degli abitati emanata nel 1907 fu una prima risposta organica all'erosione dei litorali, ma si rivelò insufficiente in quanto presentava alcune lacune. La legge infatti rendeva disponibili risorse pubbliche per difendere gli insediamenti, tuttavia non prevedeva la ricostruzione delle spiagge o la salvaguardia delle aree sensibili e di rilevante pregio naturalistico. Fu così necessario porre in opera una serie di tipologie di manufatti con lo scopo di proteggere gli insediamenti o

frenare l'erosione. Solo negli ultimi decenni si è teso alla difesa dei litorali attraverso interventi di ripascimento o, dove necessario, di ricostruzione della spiaggia per mezzo di versamenti di materiali idonei con caratteristiche sedimentologiche equilibrate alle mutate condizioni morfodinamiche del litorale.

La rilevanza della produzione scientifica e l'elevato grado di conoscenze raggiunto dalle ricerche nel settore furono lo stimolo per la stesura, nel 1985, di una prima edizione dell'"Atlante delle Spiagge Italiane" (CNR) nella quale furono sintetizzate le ricerche coordinate fino a quel momento prodotte, che rappresentavano circa il 40% del territorio costiero italiano. L'Atlante, costituito da 108 fogli a scala 1:100.000, fu il primo esempio del genere nel panorama mediterraneo, volto principalmente ai fruitori del territorio costiero e ai Pianificatori territoriali, soprattutto delle Pubbliche Amministrazioni. Dall'analisi dei dati dell'Atlante (1999), risulta che il 27% delle spiagge italiane è soggetto ad erosione, mentre solo il 3% è costituito da spiagge in avanzamento. L'alto valore relativo alla stabilità delle spiagge (70%), al momento della redazione dei fogli dell'Atlante, risente significativamente delle opere di difesa o dei ripascimenti posti in opera per contrastare l'erosione. Se da un lato la tendenza evolutiva indicata dall'Atlante presentava un alto valore di spiagge stabili o stabilizzate da opere di difesa, dall'altro, l'esaurirsi dell'effetto degli interventi effettuati nel tempo ha determinato, in alcuni casi, la ripresa dei fenomeni erosivi.

In questo capitolo verranno inizialmente illustrate le caratteristiche dell'ambiente costiero e le problematiche relative all'erosione delle spiagge; in seguito si presenterà una breve rassegna degli interventi di protezione dei litorali con particolare attenzione alla realizzazione dei ripascimenti.

2.2. Morfologia costiera

La zona costiera è definita convenzionalmente come la fascia di transizione in cui la terra ferma incontra il mare e dove le caratteristiche ambientali sono strettamente influenzate dai processi di idrodinamica marina. Tale zona si estende verso mare fino al limite della piattaforma continentale e verso terra fino alla massima quota raggiunta dalle onde. La zona costiera può essere suddivisa, da terra verso mare, in tre aree:

- La costa: fascia di larghezza indefinita che si può estendere verso l'entroterra anche per alcuni chilometri dalla riva fino alle zone ove sono più evidenti le differenze della morfologia dei terreni.
- La spiaggia (emersa e sommersa): deposito costiero litoraneo costituito da sedimenti marini incoerenti (sabbie oppure ghiaie) esteso verso terra fino al limite raggiunto dalle onde.
- La piattaforma continentale: parte sommersa che normalmente costituisce i bordi di tutti i continenti, la sua estensione va dal limite esterno della spiaggia sommersa fino al ciglio della scarpata continentale.

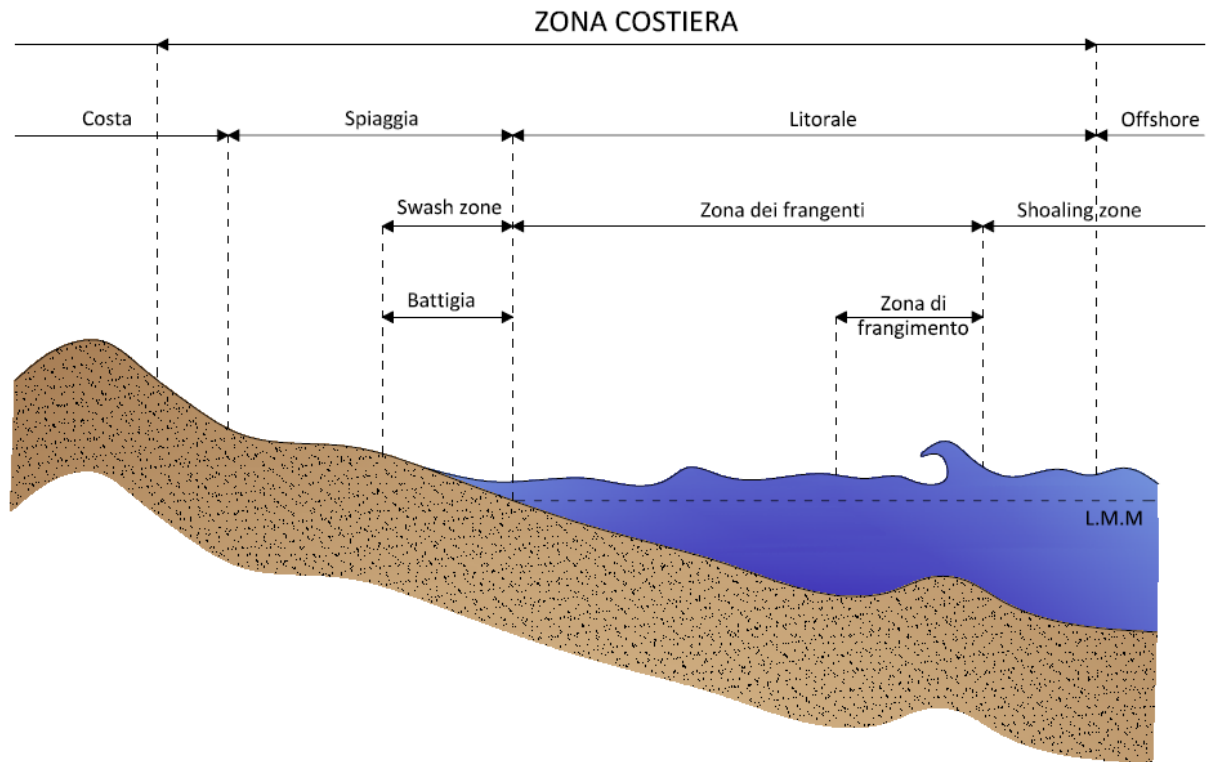


Figura 2.1 Suddivisione della zona costiera

Convenzionalmente il limite tra terra ferma e mare è indicato dalla linea di riva, intesa come regione di separazione tra area emersa e area sommersa la cui posizione muta a causa dell'azione del moto ondoso e delle maree.

La spiaggia si suddivide in una zona più arretrata (rettoriva), esposta all'azione del mare solo durante le mareggiate o quando la marea è insolitamente elevata, ed una zona più avanzata (battigia), esposta alla continua oscillazione della superficie libera dell'acqua. La rettoriva è definita anche come spiaggia emersa, la battigia come spiaggia intertidale essendo compresa tra il livello medio delle alte e delle basse maree.

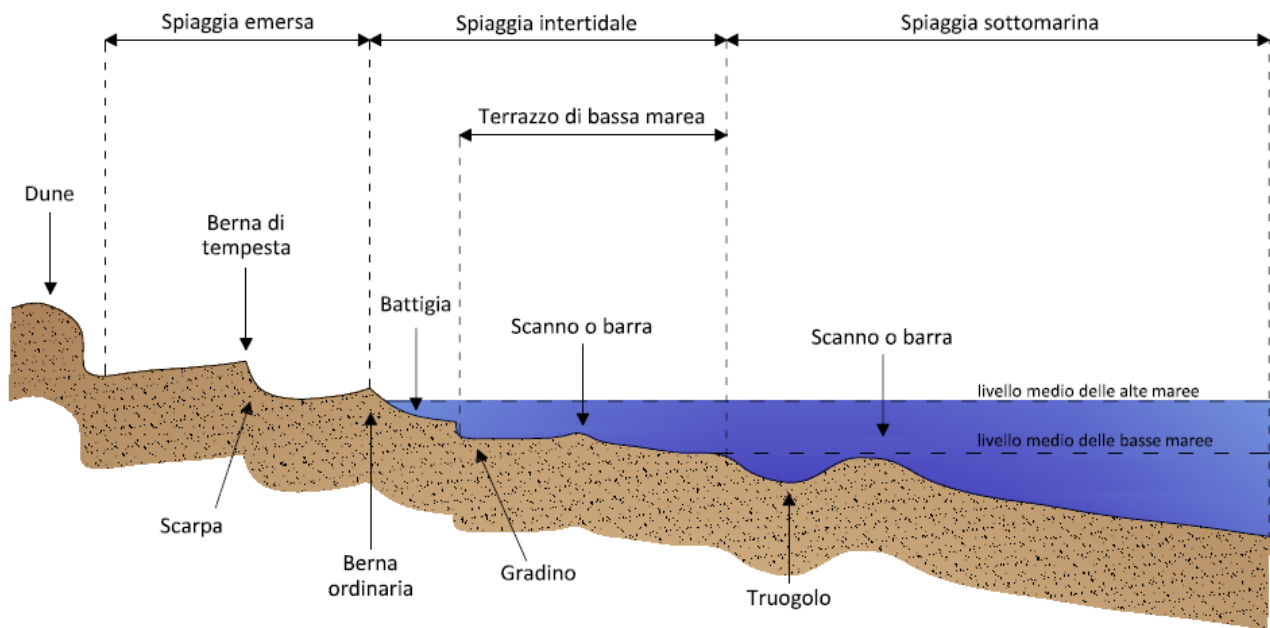


Figura 2.2 Suddivisione di una spiaggia

Le onde che avanzano verso la riva aumentano d'altezza interagendo col fondo al diminuire della sua profondità fino ad un punto in cui giungono a frangimento a causa della loro eccessiva ripidità; le zone in cui le onde frangono sono definite come zone dei frangenti (breaker zone). La fascia di terra e di mare che si estende dal limite entroterra della costa fino al limite più esterno dei frangenti prende il nome di fascia costiera (coastal area).

In generale il profilo è regolare o ondulato da una o più barre o scanni, separati da solchi o truogoli allungati paralleli alla linea di riva, che si formano a causa delle correnti locali cross - shore e long - shore. Le barre lungo un profilo sono strutture molto dinamiche che reagiscono al clima meteo-marino cambiando forma e spostandosi in direzione trasversale a riva; esse a loro volta influenzano la propagazione delle onde cambiando le profondità locali e quindi le posizioni dei frangenti.

Sovente sono presenti delle colmate di sabbia che formano il cosiddetto campo di dune, esse costituiscono un serbatoio di sabbia in grado di rifornire le spiagge nelle fasi di

massima azione del moto ondoso; se esistono costituiscono il limite superiore della spiaggia emersa e sono il risultato di lenti processi di accumulo ad opera del vento. La formazione delle dune infatti è subordinata alla disponibilità di sabbie e alla presenza di barriere naturali o artificiali che consentano l'intercettazione dei sedimenti posti in sospensione. Nei nostri litorali spesso sono state rimosse al fine di realizzare aree turistico - ricreative più ampie, facendo così mancare un naturale apporto di sedimenti al litorale e una difesa per le opere antropiche dell'entroterra. In epoca recente, per una gestione integrata delle coste e con l'obiettivo di una rinaturalizzazione delle zone litoranee, l'ingegneria naturalistica propone tecniche che mirano alla riformazione di tali strutture.



Figura 2.3 Esempio di dune litoranee

Fino ad ora la descrizione del litorale è stata correlata essenzialmente alle sue caratteristiche. Al fine di una corretta comprensione delle strutture dei modelli appare opportuno definire le zone in funzione del comportamento delle onde incidenti sulla costa. La regione compresa tra il punto di primo frangimento e il limite della corrente di ritorno (backrush), ove esistono per lo più onde frante, è definita come surf zone. Per swash zone si intende la zona che si estende approssimativamente tra il limite del backrush e il massimo punto di risalita dell'onda, coincidente di fatto con la battigia.

Dal momento in cui le onde frangono e si propagano verso riva, in presenza di particolari conformazioni del profilo, può accadere che avvenga una riformazione dell'onda ovvero che essa da traslatoria riacquisti un andamento oscillatorio. L'onda riformata si propagherà verso riva e, non appena raggiungerà acque sufficientemente basse, frangerà nuovamente con una considerevole dissipazione di energia. La zona in cui ciò accade è definita zona di riformazione e il punto in cui si innesta il fenomeno punto di riformazione. A seconda della regolarità delle onde incidenti e della forma del profilo della spiaggia, il fenomeno del frangimento e quello della riformazione dell'onda possono accadere più volte; risulta dunque opportuno che il modello possa riprodurre correttamente tale comportamento.

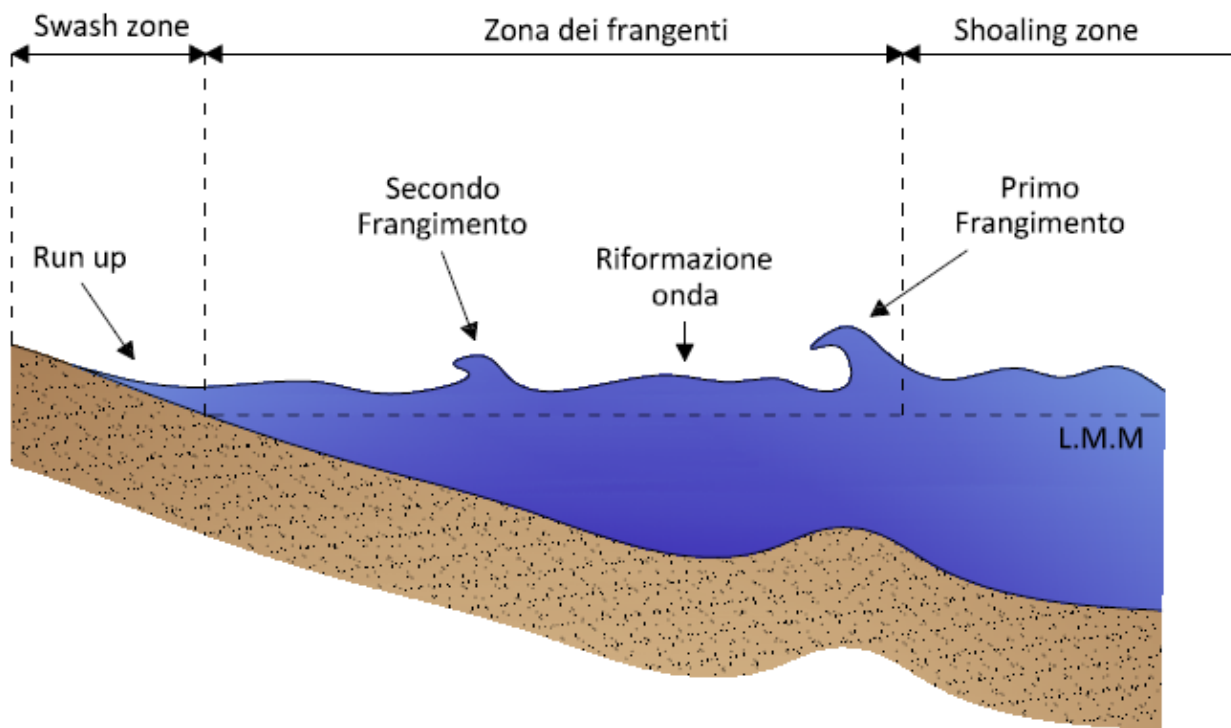


Figura 2.4 Evoluzione onda zona costiera

2.2.1. Caratteristiche fisiche dei sedimenti di spiaggia

La maggior parte delle spiagge e degli arenili sono costituiti da sedimenti non coesivi le cui proprietà fondamentali dipendono sia dalle origini del materiale che li compone che dal processo di trasporto e deposizione. I sedimenti che pervengono nelle aree costiere vengono successivamente modificati dalla continua azione di onde, correnti e vento. Tra le proprietà fondamentali vi sono la forma, la composizione, il peso specifico e la velocità di sedimentazione, la quale rappresenta un parametro fondamentale per la caratterizzazione del comportamento del sedimento sotto l'azione del campo di moto di un fluido.

I materiali coerenti ed incoerenti sono classificati in base alla dimensione dei loro granuli, generalmente chiamata diametro. Per conoscere le dimensioni lineari che caratterizzano un campione di sedimenti si ricorre all'analisi granulometrica, ossia un metodo che permette di associare la quota parte di campione in peso con il diametro minimo del setaccio attraverso cui i granuli riescono a passare.

Un dato caratteristico del campione è il diametro mediano D_{50} , rappresentante il diametro del setaccio attraverso il quale passa il 50% in peso del campione. Il diametro mediano dei sedimenti D_{50} sarà un parametro chiave sia per il calcolo del trasporto solido cross - shore e conseguentemente per la variazione del profilo, sia per la valutazione del trasporto solido long - shore.

Come già anticipato precedentemente, un parametro caratteristico dei sedimenti è la velocità con cui essi si depositano ovvero sedimentano; tale velocità di caduta dipende da numerosi fattori quali la dimensione, la densità relativa, la forma e la viscosità del fluido. La velocità di sedimentazione è pertanto definita come la velocità finale raggiunta da una particella o granulo che si deposita in un fluido in quiete sotto l'azione della forza di gravità. In generale si può scrivere:

$$w_f = \left(\frac{4}{3} \frac{gD}{C_D} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.1)$$

Dove w_f è la velocità di caduta, g è l'accelerazione di gravità, D è il diametro del sedimento, C_D è il coefficiente di Drag, ρ_s è la densità del sedimento e ρ è la densità del fluido. Il C_D varia con il numero di Reynolds del fluido e conseguentemente anche con la temperatura, influenzando quest'ultima densità e viscosità.

2.3. I fenomeni di erosione costiera

In base a quanto detto fino ad ora è evidente che la costa è un elemento naturale caratterizzato da una elevata dinamicità; la sua forma, la sua composizione mineralogica e la sua evoluzione sono il risultato della continua interazione con diversi fattori ovvero:

- Correnti litoranee.
- Esposizione al moto ondoso.
- Apporto solido dei fiumi presenti nel bacino.
- Dimensioni e caratteristiche petrografiche dei sedimenti.
- Attività antropiche.
- Eventi eccezionali.

In funzione di questi parametri si potrà avere un maggiore o minore modellamento non solo della parte emersa ma anche del fondale, soprattutto a causa dei fenomeni di trasporto solido di fondo o in sospensione, che a loro volta sono funzione principalmente dell'altezza d'onda al frangimento e della granulometria del sedimento. Il modellamento di

un litorale può essere generato dalle correnti di tipo cross - shore (modellamento trasversale) oppure da quelle di tipo long - shore (modellamento longitudinale).

Una volta individuati i fattori dominanti nei processi di movimentazione dei sedimenti è necessario andare a stimare il budget di sedimenti lungo il litorale per poter quantificare gli eventuali fenomeni erosivi e quindi poter valutare i più appropriati interventi di difesa da effettuare.

2.4. Classificazione delle opere di difesa

Tra gli interventi di difesa del litorale è possibile effettuare una prima suddivisione tra interventi diretti (rigidi e morbidi) e indiretti. Si distinguono inoltre interventi di tipo attivo e interventi di tipo passivo: i primi intervengono direttamente nella dinamica dei processi litoranei mentre i secondi subiscono passivamente l'azione ondosa.

Per interventi di tipo indiretto si intende l'insieme di disposizioni normative e legislative atte a regolare l'utilizzo e la gestione del litorale: norme per l'estrazione degli inerti dai fiumi, norme per la movimentazione degli inerti nella zona costiera, piani regolatori che definiscono gli abitati costieri e concessioni demaniali. Con lo scopo di ottenere una gestione ottimale e sostenibile delle risorse litoranee, l'Unione Europea promuove e sollecita già dal 2002 lo sviluppo di una visione integrata delle normative e degli interventi nella zona costiera ("Integrated Coastal Zone Management").

Negli interventi di tipo rigido la difesa della costa è affidata alla costruzione di opere la cui forma non viene modificata dall'azione energetica del moto ondoso e delle correnti; in questa categoria vengono classificate le strutture di difesa parallele alla costa in aderenza (diaframmi, muri di sponda e scogliere), le strutture parallele a costa staccate dalla linea di riva (barriere frangiflutti) e i pennelli.

Gli interventi di tipo morbido, al contrario dei precedenti, esplicano l'azione difensiva della costa tramite la propria capacità di adattamento all'azione energetica del moto ondoso e delle correnti; con interventi di tipo morbido in genere si fa riferimento ai ripascimenti e alle dune litoranee. Quest'ultime costituiscono un serbatoio di sabbia per il litorale e al tempo stesso difendono l'entroterra dalle mareggiate più estreme.

2.4.1. I ripascimenti

Tra gli interventi possibili per la protezione dell'entroterra si può ricorrere a un apporto artificiale di sedimenti. Questa operazione, appartenente alla categoria di interventi di tipo morbido, prende il nome di ripascimento artificiale, ovvero un "Intervento che prevede un apporto artificiale di idoneo materiale (per granulometria, mineralogia, composizione chimico-biologica) in una zona costiera che presenti un deficit di sedimenti con lo scopo di ricostruire e mantenere la spiaggia, garantendo alla stessa larghezza ed altezza tali da costituire una efficace protezione contro le mareggiate e/o realizzare una zona ricreativo-turistica". (CBNP, 1995 – Committee on Beach Nourishment and Protection)

In base alle caratteristiche del sedimento utilizzato si possono distinguere due tipologie di intervento:

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

Il tipo di ripascimento ed il suo costo variano in funzione della granulometria e della provenienza degli inerti adottati; nel caso di materiale con una granulometria superiore ai 2 mm si parla di stabilizzazione con ghiaia, nel caso invece di materiale al di sotto di tale soglia si parla di ripascimento con sabbia. La realizzazione di questo tipo di intervento prevede tre fasi:

- Fase preliminare che consiste nello studio del sito in termini di condizioni meteorologiche, trasporto solido ed evoluzione morfodinamica;
- Individuazione e caratterizzazione di una cava adatta alla ricostruzione della spiaggia;
- Realizzazione dell'intervento.

L'ubicazione ed il volume di sedimento da movimentare devono essere valutati in dettaglio poiché incidono in modo significativo nei costi e nei tempi di realizzazione dell'intervento.

Nel corso degli ultimi 20 anni, intensi fenomeni erosivi hanno interessato gli arenili situati lungo l'arco costiero nord adriatico e tra le soluzioni impiegate per contrastare tali fenomeni la pratica del ripascimento è stata largamente utilizzata, in quanto permette di riportare le spiagge ad un nuovo equilibrio evitando di provocare impatti significativi sul sistema litoraneo. La problematica maggiore connessa a questo tipo di interventi è legata alla necessità di ingenti quantitativi di sabbia dalle caratteristiche granulometriche compatibili con quelle delle spiagge in erosione, con il duplice scopo di ridurre gli impatti negativi sul sistema spiaggia e di minimizzare i costi legati alle operazioni di estrazione e sversamento.

3. MODELLO DI EVOLUZIONE DELL'ONDA

Lo studio delle onde e della loro propagazione in uno specchio d'acqua è di notevole importanza per comprendere i fenomeni legati al trasporto solido costiero. Risulta dunque necessario introdurre alcune premesse teoriche riguardanti l'idrodinamica costiera ed esporre le modalità con le quali è stato sviluppato il modello di propagazione dell'onda.

3.1. Introduzione

Le onde interessano comunemente tutti gli specchi d'acqua presenti in natura e sono la manifestazione di forze che, agendo sull'acqua, tendono a deformarne la superficie contro l'azione della gravità e della tensione superficiale le quali invece, essendo forze stabilizzanti, tendono a ricostituire la condizione di equilibrio preesistente. Una volta che le onde vengono generate, le forze di gravità e la tensione superficiale intervengono in maniera tale da farle propagare. Lo studio e la comprensione delle onde e dei fenomeni ad esse associati è di notevole importanza per le molteplici ricadute applicative in vari settori dell'ingegneria e in modo particolare in quella costiera. Ad esempio il moto ondoso, oltre ad esercitare un'azione diretta sui manufatti costieri (moli, frangiflutti, ecc.), provoca effetti estremamente vistosi lungo i litorali sabbiosi attraverso la mobilitazione dei sedimenti. Da ciò deriva un'evoluzione della linea di costa che talvolta può comportare modificazioni tali da compromettere infrastrutture (porti, strade, ferrovie) spesso ubicate in prossimità dei litorali.

In questo capitolo si espongono le necessarie premesse teoriche riguardanti i fenomeni che interessano l'idrodinamica costiera; in seguito si espone il modello implementato per la valutazione della propagazione dell'onda da largo a riva.

3.2. Idrodinamica costiera

Lo studio delle onde regolari progressive e bidimensionali si basa su alcune ipotesi fondamentali:

- Fluido ideale e incompressibile
- Fondo rigido, piano e impermeabile

- Moto irrotazionale, ovvero esisterà una funzione potenziale correlata alle componenti della velocità in direzione x e y:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.2.1)$$

Le equazioni da considerare sono l'equazione di continuità e l'equazione del moto di Bernoulli:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.2.2)$$

$$gy + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3.2.3)$$

Per risolvere il sistema sopra riportato, è necessario imporre alcune condizioni al contorno:

- Condizione al contorno cinematica sul fondo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (3.2.4)$$

- Condizione al contorno cinematica sulla superficie:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.2.5)$$

- Condizione al contorno dinamica sulla superficie:

$$g\eta + \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (3.2.6)$$

Con le ipotesi iniziali e le condizioni al contorno è possibile dedurre le espressioni del potenziale e dell'andamento della superficie libera:

$$\phi = -\frac{H L \cosh k(y+h)}{2 T \sinh(kh)} \sin(\omega t - kx) \quad (3.2.7)$$

$$\eta = a \cos(\omega t - kx) = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx) \quad (3.2.8)$$

A questo punto è possibile introdurre la relazione di dispersione che consente di descrivere come in un campo di onde progressive le diverse frequenze vengono disperse in funzione della celerità delle singole componenti:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.2.9)$$

Essendo $\omega = 2\pi/T$, $k = 2\pi/L$ e $c = L/T$ si ottiene la seguente espressione della celerità:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad (3.2.10)$$

In regioni di acque profonde, ovvero dove $h \rightarrow \infty$ e quindi $\tanh(kh) = 1$, la celerità sarà espressa dalla formula:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (3.2.11)$$

Quindi la celerità sarà funzione della sola lunghezza d'onda. Al contrario in regioni di acque basse ($h \rightarrow 0$ ovvero $\tanh(kh) = kh$) la variabile che influenzerà la celerità d'onda sarà la profondità h e quindi c sarà espressa da:

$$c = \sqrt{gh} \quad (3.2.12)$$

In base alla teoria delle onde di piccola ampiezza le componenti della velocità orbitale saranno dunque:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\pi H \cosh k(h+y)}{T \sinh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad (3.2.13)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\pi H \sinh k(h+y)}{T \sinh(kh)} \sin(\omega t - kx) \quad (3.2.14)$$

La forma delle orbite seguite dalle particelle è fortemente influenzata dal tirante idrico locale e dalla lunghezza d'onda. In acque basse, dove la profondità è minore della lunghezza d'onda, le orbite seguite dalle particelle si appiattiscono progressivamente avvicinandosi al fondale. In acque profonde invece, il diametro orbitale della traiettoria in superficie corrisponderà proprio all'altezza d'onda e scendendo fino ad una profondità pari a metà altezza d'onda tale diametro diminuirà esponenzialmente fino a diventare trascurabile determinando uno spostamento delle particelle pressoché nullo.

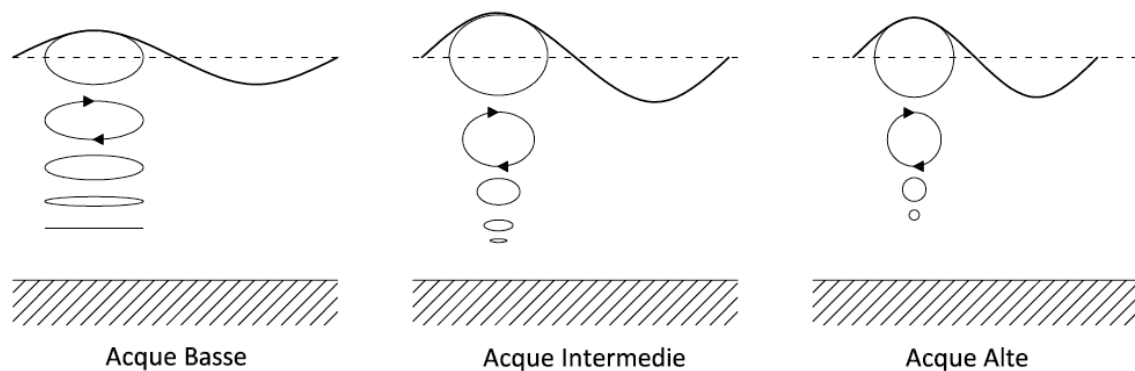


Figura 3.1 Orbite particelle

3.3. Rappresentazione dello stato di mare

Le onde marine, indicate frequentemente con la notazione di onde random, sono onde di gravità generate dal vento in conseguenza del trasferimento di energia operato da questo verso il mare. Sono costituite da onde irregolari in quanto esibiscono un profilo che non si ripete identico ad ogni periodo d'onda. La singola onda può essere identificata utilizzando il metodo dello zero – upcrossing, mediante il quale l'altezza d'onda è definita da due passaggi consecutivi verso l'alto attraverso lo zero relativo al livello medio mare. Nella seguente figura vengono indicate l'altezza dell'onda H , la sua elevazione η e il suo periodo T .

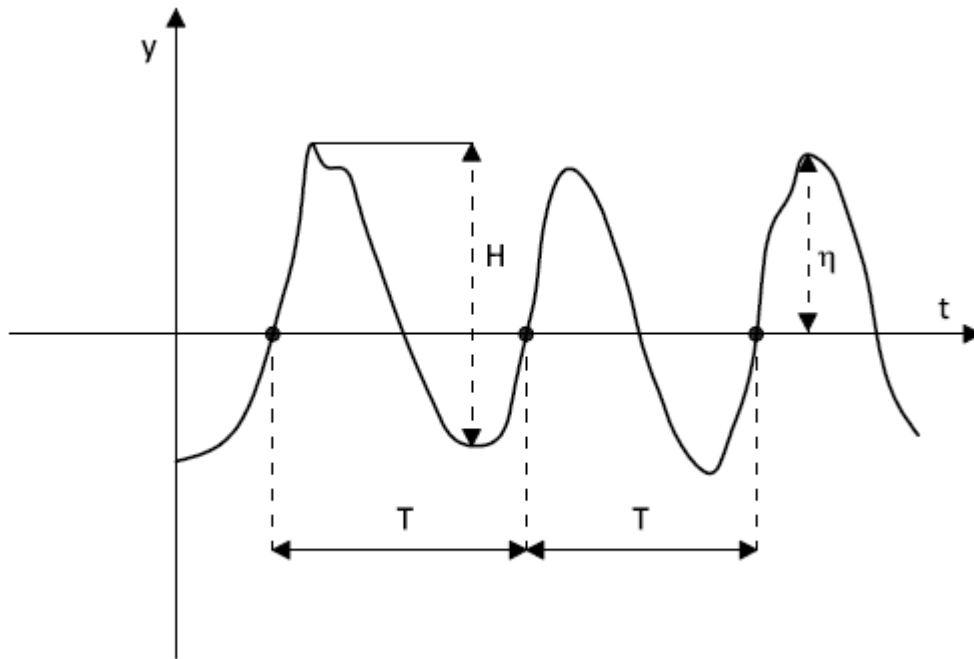


Figura 3.2 Andamento onda irregolare

La teoria delle onde di mare può essere sviluppata sfruttando il principio della sovrapposizione degli effetti per cui onde non regolari sono approssimabili sommando una serie di onde regolari elementari rappresentate da funzioni sinusoidali.

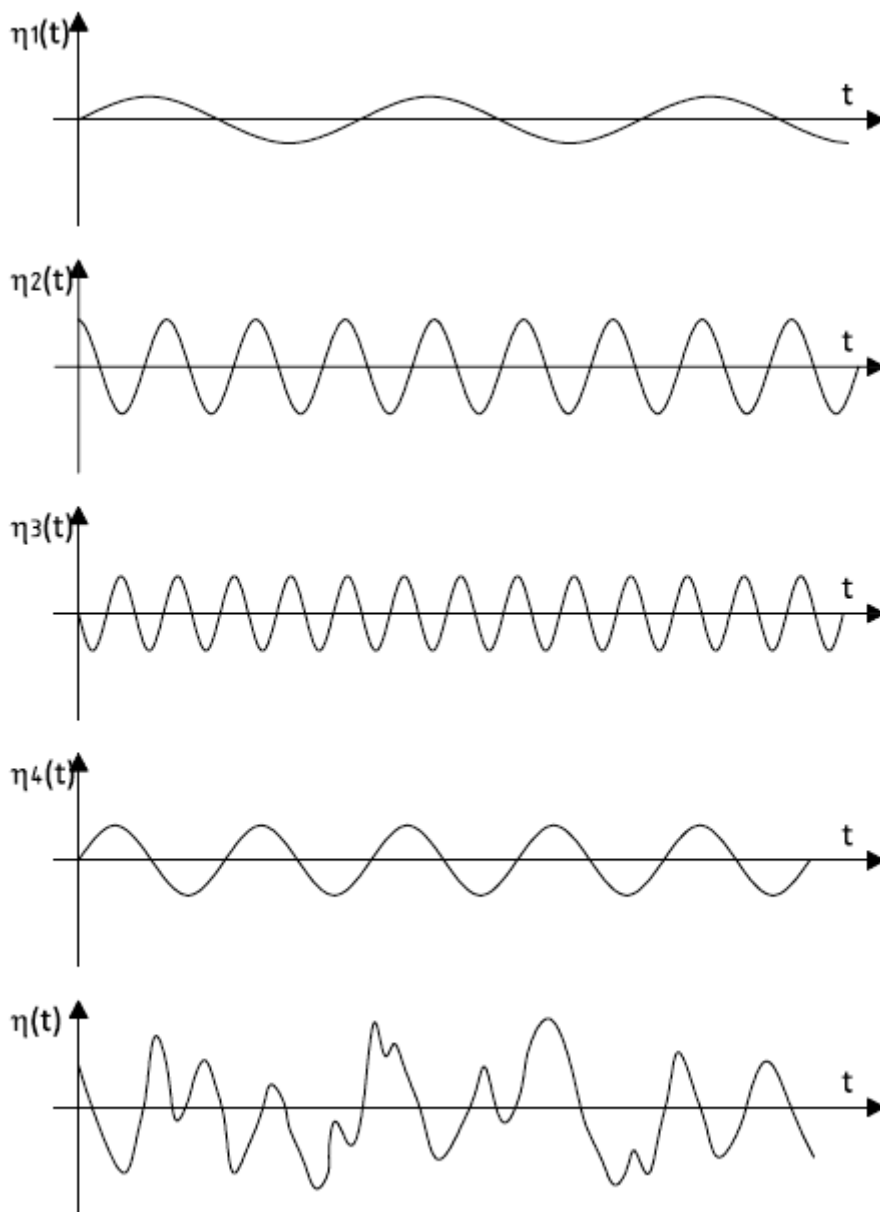


Figura 3.3 Sovrapposizione effetti

L'elevazione della superficie libera istantanea $\eta(t)$ potrà quindi essere valutata come la sommatoria di N sinusoidi di varie frequenze:

$$\eta = \sum_j a_j \cos(w_j t - k_j x) \quad (3.3.1)$$

Nella quale a_j è l'ampiezza, w_j la frequenza e $k_j x$ la fase.

Indipendentemente dalle condizioni di profondità, gli stati di mare possono essere rappresentati attraverso degli spettri in frequenza $S(f)$ che indicano il contenuto energetico del mare; uno spettro in frequenza citato spesso è lo spettro Jonswap medio dato dalla:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \gamma^r \quad (3.3.2)$$

dove α , γ e ω sono, rispettivamente, il parametro di equilibrio, il parametro di amplificazione e il parametro di forma dello spettro. Poiché l'energia media di un treno d'onde random è uguale al quadrato di σ , ovvero la deviazione standard del rilievo del moto ondoso, è possibile ricavare l'elevazione della superficie libera e quindi l'altezza d'onda.

$$E = \int S(f) df = \frac{1}{2} \sum_j a_j^2 = \sigma^2(\eta) \quad (3.3.3)$$

Lo stato di mare può essere valutato anche attraverso la definizione di onde caratteristiche; le onde marine infatti godono di alcune proprietà statistiche che riguardano la distribuzione delle loro altezze. In base alla distribuzione di Rayleigh si possono definire l'altezza d'onda media H_m , lo scarto quadratico medio H_{rms} e l'altezza d'onda significativa H_s , ovvero la media del terzo delle onde più alte.

$$H_m = \frac{1}{N} \sum_1^N H_i \quad (3.3.4)$$

$$H_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_1^N H_j^2} \quad (3.3.5)$$

$$H_s = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_1^{N/3} H_j \quad (3.3.6)$$

3.4. Trasformazioni dell'onda dal largo a riva

Un treno di onde regolari che si propaga da largo verso costa subisce una serie di trasformazioni deducibili dalla variazione dei parametri fondamentali, dovute sia alla variazione di pendenza del fondale sia all'incontro di eventuali ostacoli. Questi fenomeni sono la rifrazione, lo shoaling, la riflessione e la diffrazione. La conoscenza dell'evoluzione dell'onda, a partire dalla sua altezza, dal suo periodo e dall'angolo di incidenza valutati in acque profonde, è di fondamentale importanza per determinare le grandezze necessarie nel calcolo delle portate solide.

Il fondale, da largo a riva, riduce progressivamente la sua profondità, inducendo l'onda a diminuire la sua lunghezza e ad aumentare la sua altezza fino a raggiungere un valore limite instabile per la ripidità. Superato tale limite l'onda frange, ovvero rompe la sua forma, poiché la velocità delle particelle supera la celerità dell'onda; l'onda non è più descrivibile tramite una funzione sinusoidale ed è necessario applicare un modello di decadimento dell'onda.

Il modello di evoluzione elaborato in questa tesi terrà conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling e adotterà il modello di decadimento dell'onda elaborato da Dally, Dean e Dalrymple che tiene conto della dissipazione di energia causata dal frangimento.

3.4.1. Rifrazione e Shoaling

La rifrazione è il fenomeno per il quale i fronti d'onda, che nella propagazione da largo a riva spesso non si presentano paralleli alle batimetriche ma formano con esse angoli diversi da 0° , tendono a disporre le creste parallele alla linea di riva. Tale fenomeno può essere descritto utilizzando un'analogia con la legge di Snell per la rifrazione di un fascio luminoso quando questo attraversa un'interfaccia tra due mezzi con diversi indici di rifrazione:

$$\frac{c}{\sin \alpha} = \text{cost} \quad (3.4.1)$$

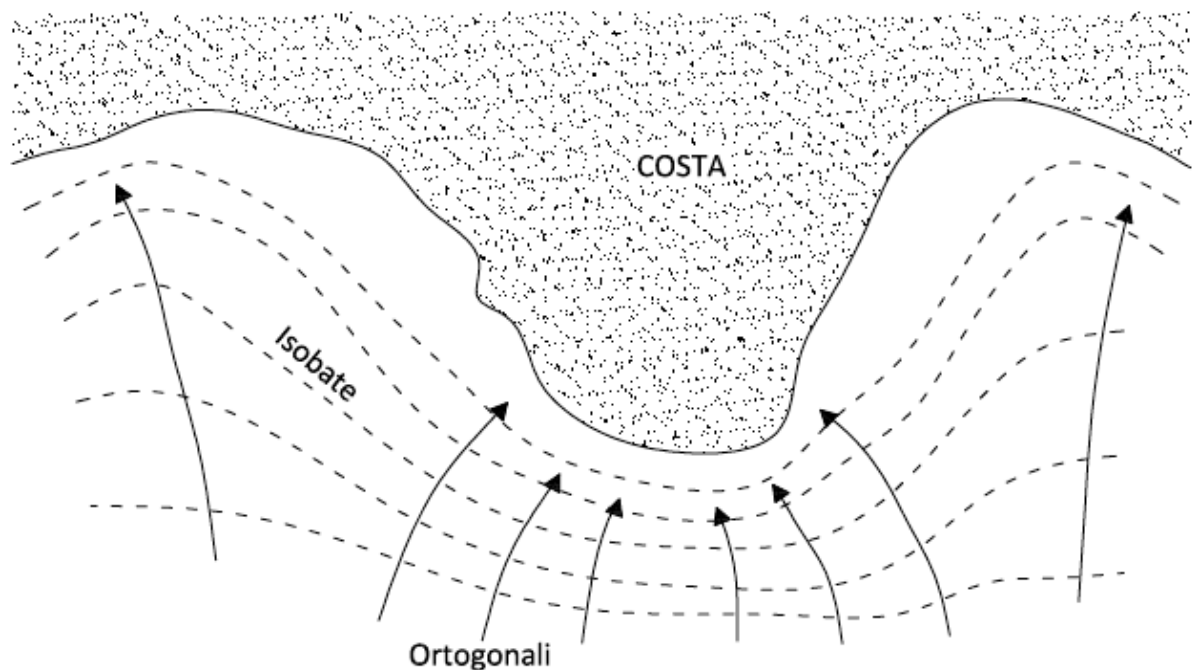


Figura 3.4 Fenomeno della rifrazione

Indicando con c_1 , α_1 , b_1 rispettivamente la celerità, l'angolo di incidenza e la larghezza del primo mezzo e con c_2 , α_2 , b_2 le grandezze relative al secondo mezzo, è possibile determinare il coefficiente di rifrazione con la seguente relazione:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}} \quad (3.4.2)$$

Alla rifrazione si accompagna frequentemente il fenomeno dello shoaling che si manifesta su fondi a debole pendenza quando un treno di onde regolari si propaga ortogonalmente alle batimetriche. Assumendo che l'energia sia costante, ovvero che non vi siano dissipazioni, si può assumere costante il flusso d'energia ed è dunque possibile eguagliare la sua espressione su profondità infinita (h_0) con quella su profondità intermedia (h):

$$E_0 C_{g0} = \frac{\rho g H_0^2}{8} C_{g0} = E C_g = \frac{\rho g H^2}{8} C_g \quad (3.4.3)$$

Dove con C_g si è indicata la celerità del gruppo d'onda, ovvero la celerità con cui si propaga l'energia, la cui espressione è possibile ricavarla dalla relazione di dispersione. Con C_{g0} invece si è indicata la celerità del gruppo d'onda in acque profonde:

$$C_g = \frac{dw}{dk} = \frac{c}{2} [1 + G] = \frac{gT}{4\pi} \tanh(kh) [1 + G] \quad (3.4.4)$$

$$C_{g0} = \frac{c_0}{2} = \frac{gT}{4\pi} \quad (3.4.5)$$

Ottenendo quindi:

$$H = H_0[(1 + G) \tanh(kh)]^{-1/2} = K_s H_0 \quad (3.4.6)$$

Dove con K_s si è indicato il coefficiente di shoaling. Considerando i due fenomeni insieme si può scrivere la relazione che lega l'altezza d'onda al largo con l'altezza d'onda intermedia:

$$H = K_r K_s H_0 = H_0 \left[\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} (1 + G) \tanh(kh) \right]^{-1/2} \quad (3.4.7)$$

3.4.2. Frangimento

Il frangimento è un fenomeno molto complesso che si verifica quando l'onda, raggiungendo la costa, modifica la sua altezza e la sua lunghezza fino a raggiungere un valore limite instabile per la ripidità. Il valore limite della ripidità viene raggiunto quando la velocità orizzontale della particella in cresta eguaglia la celerità dell'onda stessa, facendo in modo che la cresta sottenda un angolo di 120° . Esistono vari criteri per la determinazione della ripidità limite:

- Criterio di Mitchell, massima ripidità dell'onda in acque profonde:

$$\left(\frac{H}{L} \right)_{max} = 0,142 \quad (3.4.8)$$

- Criterio di Miche, massima ripidità dell'onda in acque intermedie:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{max} = 0,142 \tanh(kh) \quad (3.4.9)$$

- Criterio di McCowan che definisce l'indice di frangimento γ_b in acque basse:

$$\frac{H_b}{h_b} = \gamma_b = 0,78 \quad (3.4.10)$$

- Criterio di Larson e Kraus:

$$\frac{H_b}{h_b} = \gamma_b = 1,14 \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \right)^{0,21} \quad (3.4.11)$$

Le onde frangenti possono essere classificate in quattro tipologie principali: Spilling, Plunging, Surging e Collapsing. Il tipo di frangimento è definito in funzione del numero di Irribarren:

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (3.4.12)$$

I frangenti Surging sono caratterizzati da $\xi_b > 5$; essi si manifestano su spiagge molto scoscese ed essendo associati ad onde con ripidità bassa (altezza moderata e lunghezza elevata) frangono solo quando arrivano sulla riva. I frangenti di tipo Collapsing, caratterizzati da $3,3 < \xi_b < 5$, avvengono su spiagge di media pendenza e presentano un frangimento poco evidente. I frangenti Plunging ($0,5 < \xi_b < 3,3$) sono i più vistosi poichè dissipano l'energia molto velocemente e su una breve distanza. Infine i frangenti di tipo Spilling ($\xi_b < 0,5$) sono caratterizzati da una cresta schiumosa e molto turbolenta e si generano su spiagge a bassa pendenza.

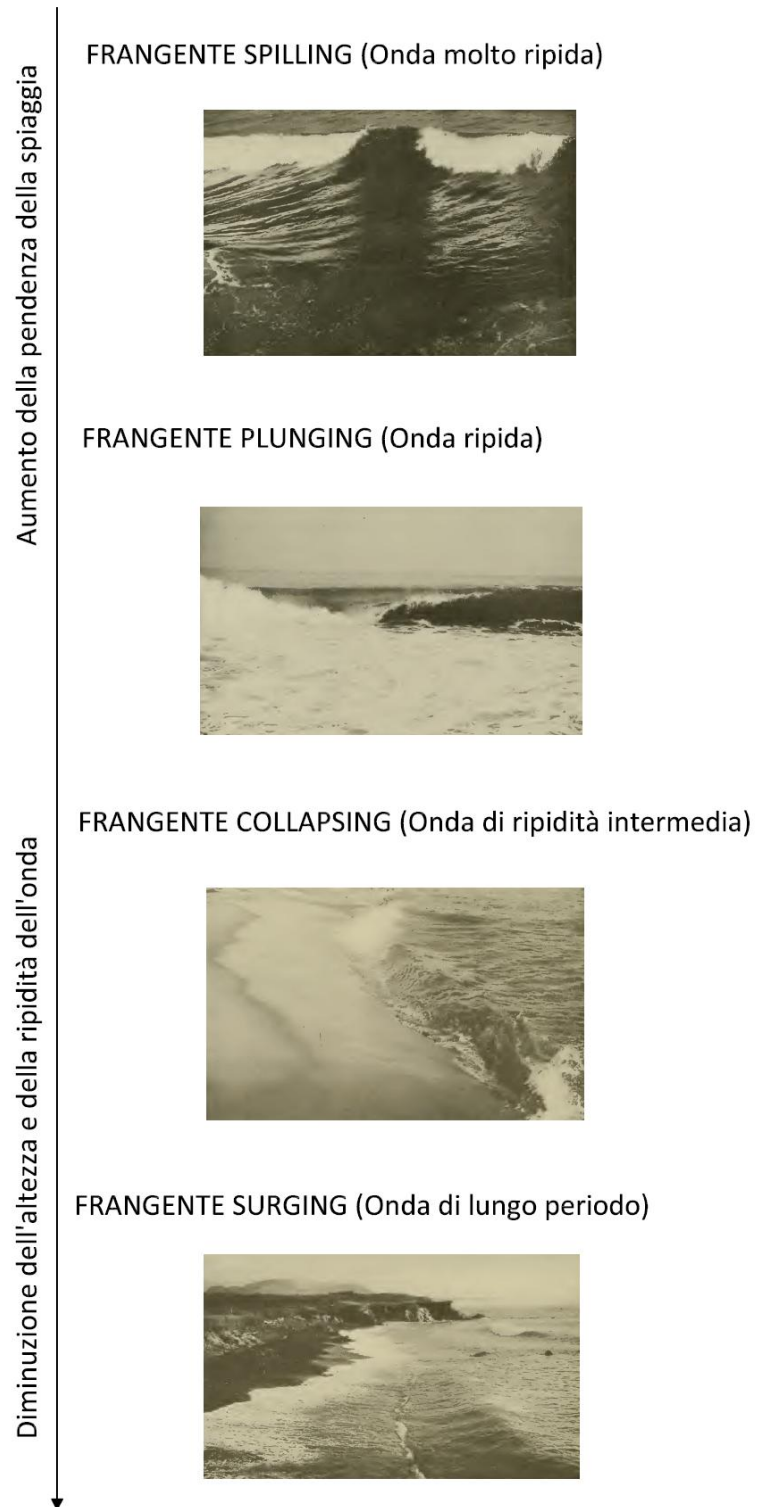


Figura 3.5 Tipi di frangimento

3.4.3. Run up

L'onda dopo il frangimento risale sulla spiaggia fino ad un'altezza z_R chiamata risalita dell'onda. Essa è formata da due componenti: la sopraelevazione rispetto al livello medio dell'acqua a causa dell'azione ondosa (set up) e la fluttuazione rispetto a tale valore medio (swash). Per il calcolo di tale risalita esistono in letteratura numerose formule di origine empirica espresse in funzione del numero di Irribarren. La seguente relazione, ricavata da Larson e Kraus, è funzione delle caratteristiche dell'onda al largo:

$$\frac{z_R}{H_0} = 1,47\xi^{0,79} \quad (3.4.13)$$

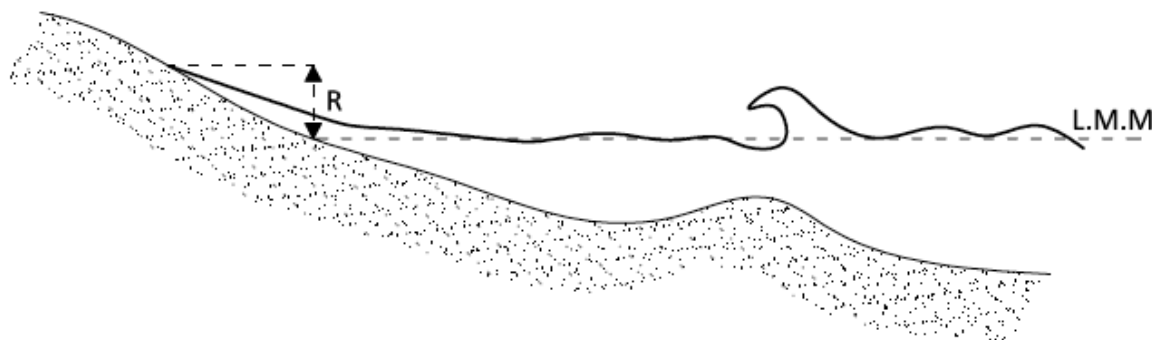


Figura 3.6 Schema Run - up

3.5. Modello di decadimento dell'onda frangente

I modelli che descrivono il decadimento dell'onda nella zona del frangimento sono, nella maggior parte dei casi, funzione di parametri empirici stimati tramite calibrazione di dati sperimentali. Tali modelli possono essere suddivisi in due categorie: i modelli che utilizzano un criterio di similitudine e i modelli di flusso dell'energia. I primi impongono

che il rapporto tra l'altezza dell'onda e la profondità sia costante punto per punto da largo a riva. I secondi, nei quali rientra il modello di Dally, Dean e Dalryple implementato in questo elaborato, risolvono l'equazione di bilancio dell'energia valutando il termine dissipativo. In un regime di tipo stazionario si considera l'energia localmente sempre uguale a se stessa:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial x} = -D \quad (3.5.1)$$

Tale modello impone che prima del frangimento il flusso dell'energia rimanga costante ovvero che la dissipazione sia nulla, mentre considera che nella zona dei frangenti, il termine dissipativo sia proporzionale alla differenza tra il flusso di energia dell'onda e il flusso di energia stabile funzione della profondità d .

$$D = -0,15 \frac{F - F_{stab}}{d} \quad (3.5.2)$$

Dove il flusso di energia dell'onda e il flusso di energia stabile sono determinate tramite le seguenti relazioni:

$$F = \rho g \frac{H^2}{8} C_g b \quad (3.5.3)$$

$$F_{stab} = \rho g \frac{H_{stab}^2}{8} C_g b = \rho g \frac{(0,4d)^2}{8} C_g b \quad (3.5.4)$$

Dove $d = h + \text{setup} + \text{marea}$.

Il modello di Dally, Dean e Dalrymple permette che vi sia riformazione dell'onda, cioè riconosce l'esistenza di una soglia nell'altezza dell'onda sotto la quale il frangimento smette e l'onda ritorna ad essere stabile. Superato il valore di $H > 0,78 d$ l'onda comincia a frangere continuando fino al momento in cui $H > 0,4 d$; oltre tale valore il frangimento cessa. Tale intuizione risulta vantaggiosa quando si considera l'evoluzione dell'onda su profili reali dove può nascere una sequenza di frangimenti e riformazioni.

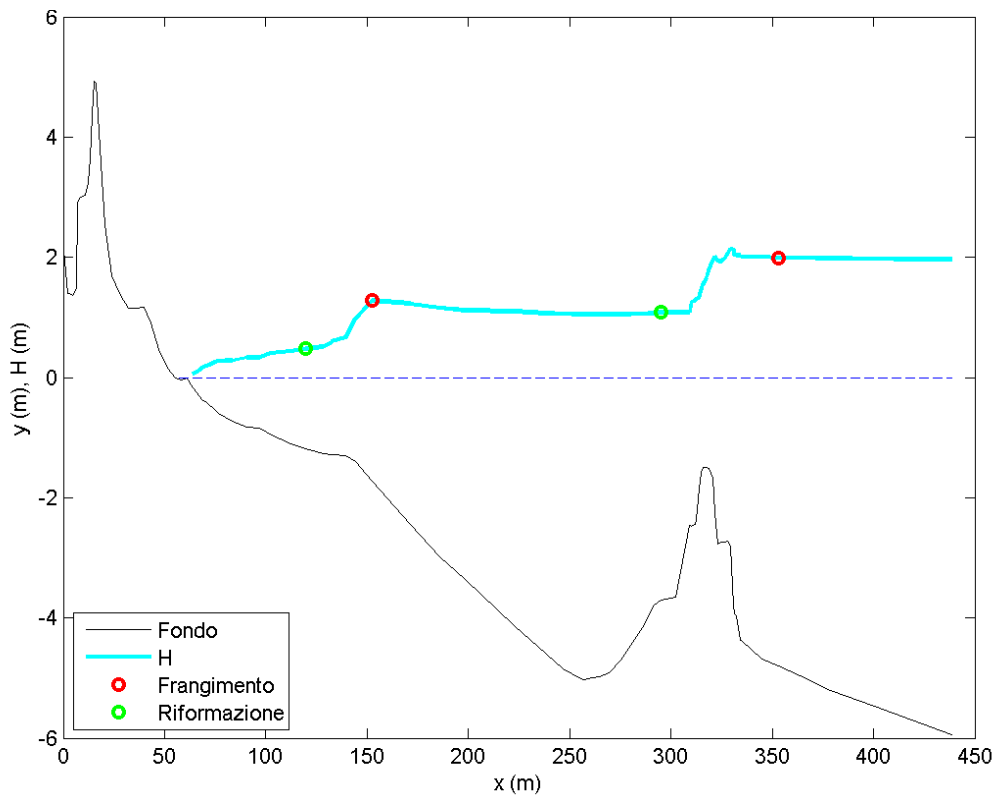


Figura 3.7 Posizioni Frangimento e Riformazione dell'onda

Discretizzando l'equazione del bilancio con il metodo delle differenze finite è innanzitutto possibile calcolare il flusso dell'energia in un punto del profilo ($j+1$) in funzione del flusso di energia stabile e del flusso di energia nel punto precedente del profilo (j):

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_{j+1} - F_j}{\Delta x} = -0,15 \frac{F_j - F_{stab}}{d} \quad (3.5.5)$$

Dalla quale è possibile ricavare l'altezza d'onda:

$$H_{j+1} = \sqrt{\frac{1}{C_{gj+1} b_{j+1}} \left[H_j^2 C_{gj} b_j - 0,15 \frac{H_j^2 C_{gj} b_j - (0,4d_j)^2 C_{gj} b_j}{d_j} \Delta x \right]} \quad (3.5.6)$$

Il numero d'onda k viene calcolato punto per punto utilizzando la relazione di dispersione, risolta attraverso la soluzione di Hunt:

$$c^2 = gh[y + (1 + 0,65y + 0,46y^2 + 0,086y^4 + 0,06y^5)^{-1}]^{-1} \quad (3.5.7)$$

$$y = \frac{(2\pi)^2}{gT^2} h \quad (3.5.8)$$

3.6. Applicazione del modello di evoluzione dell'onda

Il modello elaborato permette in conclusione di stimare uno stato di mare reale imponendo l'altezza significativa al largo, il periodo di picco e i parametri dello spettro Jonswap. Le altezze d'onda così ottenute vengono trasformate da largo al punto finale del profilo tramite i coefficienti di shoaling e rifrazione, infine con il modello di decadimento dell'onda frangente si stima l'andamento delle onde da largo a riva e il rispettivo Set - up.

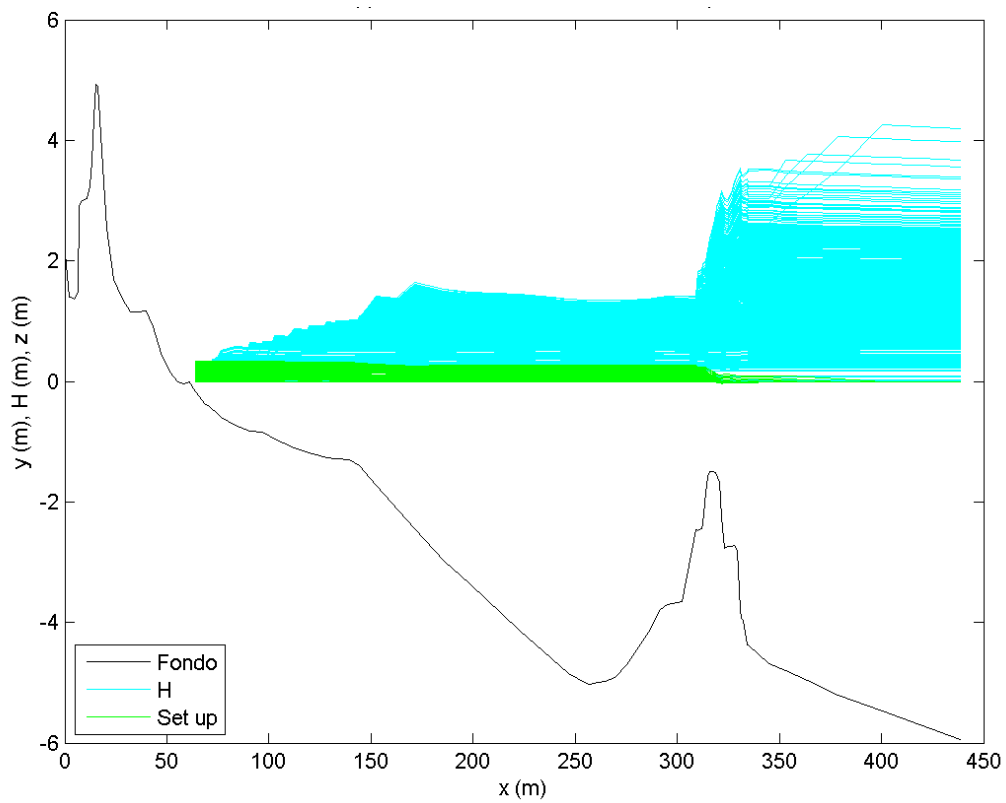


Figura 3.8 Rappresentazione Altezza d'onda e Set – up

In base alla distribuzione di Rayleigh si possono definire quindi l'altezza d'onda media H_m , l'altezza d'onda significativa H_s e l'altezza d'onda massima delle onde calcolate.

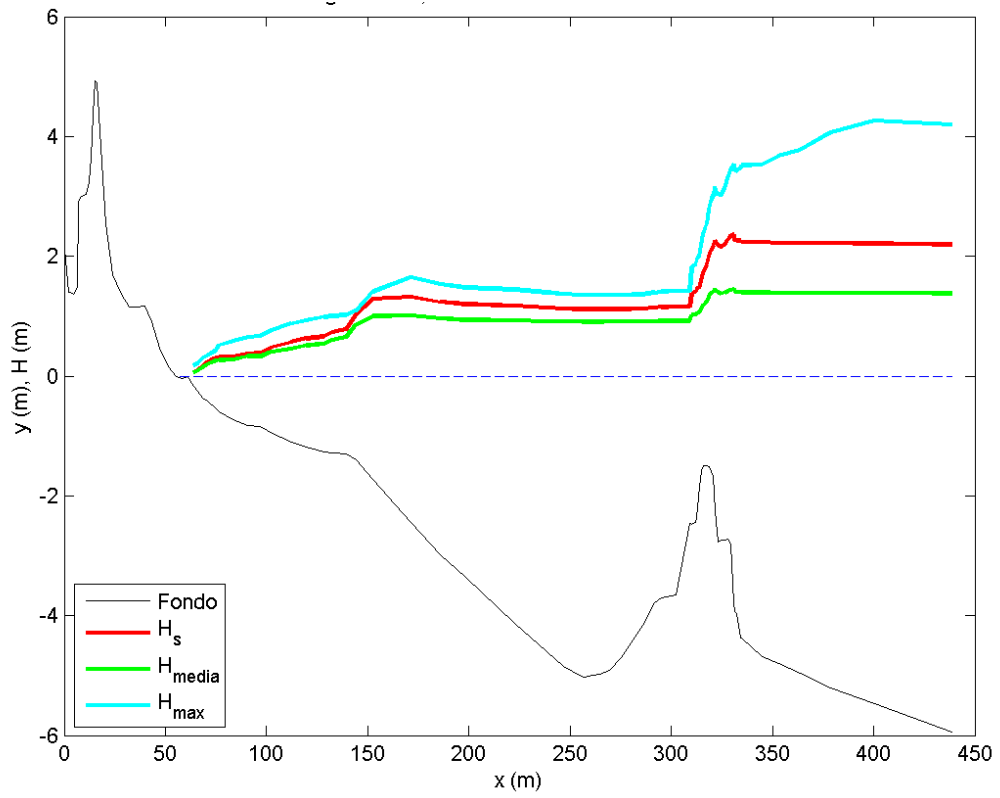


Figura 3.9 Rappresentazione Altezza d'onda significativa, media e massima

4. LA CIRCOLAZIONE LITORANEA

La circolazione litoranea riveste un ruolo di fondamentale importanza per lo studio dei fenomeni di trasporto nelle aree costiere e di conseguenza anche per il modellamento dei litorali. Le equazioni che consentono di descrivere la circolazione litoranea sono l'equazione del bilancio di massa, l'equazione del bilancio di quantità di moto in direzione parallela alla costa e l'equazione di bilancio di quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa. Si è deciso di risolvere quest'ultima con il metodo degli elementi finiti che ha permesso di tenere in considerazione tutti i termini presenti nell'equazione.

4.1. Introduzione

I litorali sono interessati dalla presenza di correnti che determinano l'instaurarsi di un sistema circolatorio; le correnti marine a media scala possono essere suddivise in correnti costiere e correnti litoranee. Le prime, indipendenti dal moto ondoso e quindi dal fenomeno del frangimento, si sviluppano al largo della zona dei frangenti; le seconde invece sono completamente dipendenti dal moto ondoso e si sviluppano dentro la surf-zone, compresa tra la linea di riva e la linea dei frangenti.

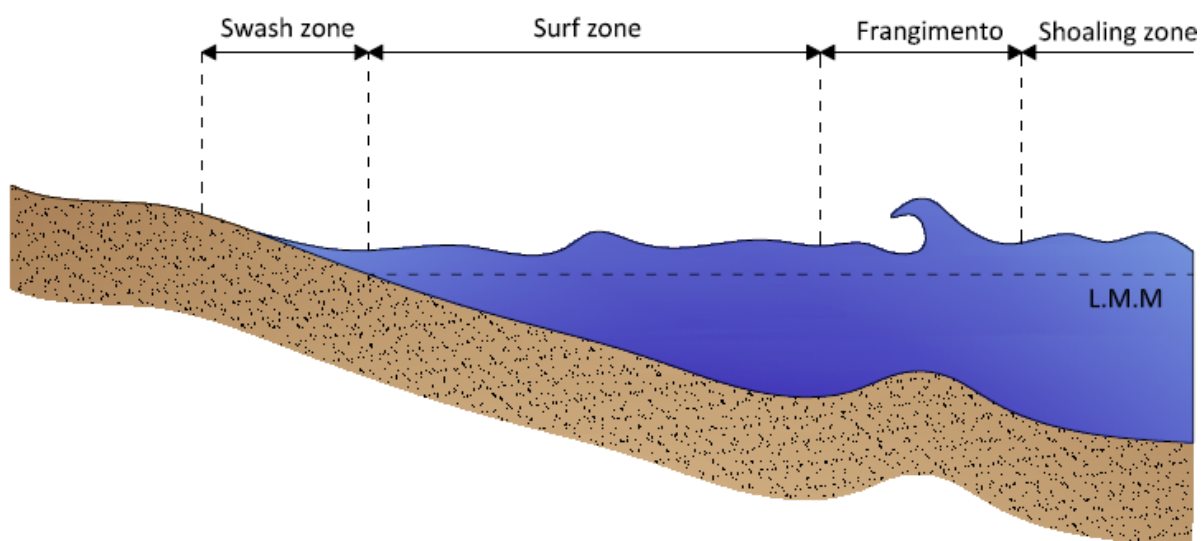


Figura 4.1 Suddivisione zone costiere

In questo sistema la circolazione può essere suddivisa secondo due direzioni prevalenti:

- in direzione ortogonale alla linea di costa, dove si possono osservare le rip-currents;
- in direzione parallela alla costa dove le correnti long - shore si intensificano man mano che ci si sposta verso la linea dei frangenti.

In questo capitolo si esporranno le relazioni teoriche alla base dei fenomeni della circolazione litoranea; successivamente si esporrà il modello, basato sul metodo degli elementi finiti, che ha permesso di ricavare l'andamento della corrente in direzione parallela alla costa.

4.2. La circolazione litoranea

Per poter affrontare lo studio della circolazione litoranea è innanzitutto necessario introdurre il concetto di Radiation Stress; esso infatti rappresenta la forzante del moto delle correnti lungo costa e la sua divergenza rappresenta la causa del set – up, ovvero della sopraelevazione del tirante idrico rispetto al livello indisturbato. Secondo la teoria lineare esso è fornito dalla relazione:

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \frac{E}{2} G \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{E}{2} (1 + G) \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

Dove E è l'energia dell'onda e G è dato dalla:

$$G = \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \quad (4.2.2)$$

Il tensore di radiazione S è composto da un termine dovuto alle pressioni e da un contributo del flusso della quantità di moto.

Le equazioni che consentono di ricostruire la circolazione litoranea in acque basse sono tre: il bilancio di massa, il bilancio di quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa e il bilancio di quantità di moto in direzione parallela alla costa.

4.3. Bilancio di massa

La prima equazione necessaria per poter valutare la circolazione di massa è l'equazione del bilancio di massa sulla verticale di una colonna di fluido:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho z + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Q_y) = 0 \quad (4.3.1)$$

Dove le variabili indipendenti sono x , y e t mentre le variabili dipendenti si ricavano dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} Q_x &= U_x h \\ Q_y &= U_y h \\ h &= d + z \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

Si è indicato con d il livello medio indisturbato e con z la sopraelevazione o l'abbassamento medio rispetto al livello indisturbato. Si è inoltre imposto che a largo e a riva la velocità in direzione x e in direzione y sia nulla.

4.4. Bilancio di quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa

La seconda equazione necessaria per la determinazione delle circolazioni è il bilancio di quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa che permette di valutare il Set - up. Si impongono le ipotesi di fondale prismatico e di moto stazionario, ovvero sono nulle le derivate rispetto al tempo e alla direzione y .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho Q_x Q_x}{h} + S_{xx} + R_{xx} \right) = -\rho g h \frac{\partial z}{\partial x} + \tau_a - \tau_b \quad (4.4.1)$$

Dal bilancio di massa e dalla condizione al contorno di riva si ottiene che $Q_x = \text{cost} = 0$, inoltre si trascurano i termini relativi allo stress di Reynolds (R_{xx}) e gli sforzi tangenziali dovuti al fondo e al contatto acqua – aria poiché dipendono dalla velocità della corrente in direzione perpendicolare alla costa che si considera nulla. L'equazione (4.4.1) diviene:

$$\frac{\partial}{\partial x} S_{xx} + \rho g h \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (4.4.2)$$

4.4.1. Set up e Set down

Il livello medio del mare subisce prima del frangimento un abbassamento rispetto al livello medio in quiete (Set – Down); entrando nella zona dei frangenti invece avviene un innalzamento della superficie media (Set – up).

Nella zona al largo della linea dei frangenti è possibile ipotizzare che z sia piccola quindi l'equazione della quantità di moto in direzione perpendicolare alla costa diventa:

$$\frac{\partial}{\partial x} S_{xx} + \rho g h \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx} + \rho g dz) = 0 \quad (4.4.3)$$

Il termine tra parentesi risulta essere costante in direzione x , ovvero al largo dei frangenti non vi è dissipazione. Uguagliando tale contributo calcolato al largo e nel punto di frangimento è possibile ricavare l'equazione del Set – down:

$$z_{down} = \frac{1}{d_b} \left[\frac{H_0^2}{16} (1 + 2G_0) + \frac{H_0^2 C_{g0}}{16 C_g} (1 + 2G) \right] \cong 4\%H \quad (4.4.4)$$

Dove si è imposto, grazie alla relazione di dispersione:

$$H^2 = H_0^2 \frac{C_{g0}}{C_g} \quad (4.4.5)$$

Entrando nella zona dei frangenti tale ipotesi non è più valida; l'altezza dell'onda H sarà proporzionale al fondale tramite l'indice di frangimento $\gamma = H/h$, inoltre nella zona dei frangenti $G = 1$. L'equazione che esprime il Set – up risulta essere:

$$z_{up} = z_{down} + \frac{3/8 \gamma^2}{(1 + 3/8 \gamma^2)} d_b = 10\%H \quad (4.4.6)$$

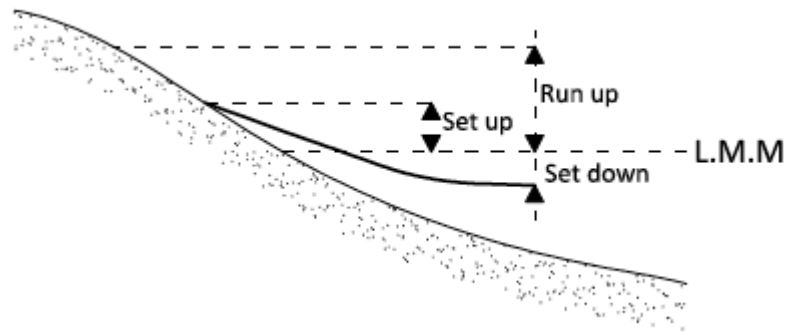


Figura 4.2 Set up e Set Down

4.5. Bilancio di quantità di moto in direzione parallela alla costa

La terza equazione necessaria per la determinazione delle circolazioni è il bilancio di quantità di moto in direzione parallela alla costa. Si impongono, come nell'equazione del moto in direzione perpendicolare alla costa, le ipotesi di fondale prismatico e di moto stazionario, ovvero sono nulle le derivate rispetto al tempo e alla direzione y .

$$\frac{\partial}{\partial x}(S_{xy} + R_{xy}) = -\tau_b \quad (4.5.1)$$

Dal bilancio di massa e dalla condizione al contorno di riva si ottiene che $Q_x = \text{cost} = 0$, inoltre si trascura lo sforzo tangenziale dovuto al contatto acqua - aria. L'equazione (4.5.1), esprimendo il termine legato allo stress di Reynolds R_{xy} in funzione del coefficiente di scambio turbolento ν_t , diviene:

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \tau_b - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \nu_t h \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.5.2)$$

Si assume che la velocità della corrente V sia piccola rispetto alla velocità orbitale dell'onda U_{1m} ($V \ll U_{1m}$); in tale modo si ottiene che l'angolo formato dalle due velocità è pari a $\pi/2$. Nella precedente equazione si sono indicati con τ_b lo sforzo tangenziale al fondo (linearizzato come indicato di seguito), r la scabrezza e f_w il fattore d'attrito pari a $\min[0,3 ; \exp(-5,977+5,213 (a_o/r)^{-0,194})]$:

$$v_t = Ch\sqrt{gh} \quad (4.5.3)$$

$$\tau_b = \frac{1}{\pi} \rho f_w U_{1m} V \quad (4.5.4)$$

$$U_{1m} = w \frac{H}{2} \frac{1}{\sinh(kh)} \quad (4.5.5)$$

Il coefficiente di scambio turbolento è proporzionale ad un coefficiente C che la trattazione di Longuet – Higgins stima pari a $C = 0,45 \div 1,8$.

Nell'equazione del moto in direzione parallela alla costa si osserva che la variazione della quantità di moto in direzione long - shore è bilanciata da tre forze:

- La variazione in direzione cross - shore della componente del tensore di radiazione long - shore S_{xy} che agisce come forza trainante per le correnti.
- Lo sforzo di taglio al fondo τ_b che invece agisce come forza frenante delle correnti.
- Un termine di tipo diffusivo che tiene conto delle turbolenze nel campo di moto.

Le correnti lungo riva rappresentano la forzante principale nella movimentazione dei sedimenti. Risulta dunque di fondamentale importanza riuscire a determinare, a partire dall'equazione del moto in direzione parallela alla costa, le correnti long - shore. Fuori dalla zona dei frangenti non vi è forzante in grado di innescare la circolazione litoranea anche se il tensore di radiazione varia, ovvero la velocità della corrente risulta sempre

nulla. All'interno della zona dei frangenti l'equazione (4.5.2), trascurando il termine relativo allo stress di Reynold, può essere riscritta:

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{E}{2} (1 + G) \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \right] = -\tau_b = -\frac{1}{\pi} \rho f_w U_{1m} V \quad (4.5.6)$$

Operando le corrette sostituzioni e ipotizzando che nella zona dei frangenti $G = 1$ e il $\cos \alpha_0 = 1$ si ottiene:

$$V = \frac{\sin \alpha_0}{c_0} \gamma g \frac{5\pi h \tan \theta}{8 f_w} \quad (4.5.7)$$

Dove $\tan \theta$ è la pendenza del fondale. Tale soluzione permette di ricavare un andamento della velocità della corrente long – shore a meno del contributo della turbolenza. Per poter stimare l'andamento della velocità long – shore senza trascurare lo stress di Reynolds si è creato un modello numerico risolvendo l'equazione differenziale con il metodo degli elementi finiti.

4.5.1. Determinazione delle correnti lungo costa con il F.E.M.

Per la risoluzione dell'equazione differenziale (4.5.2) lo schema di calcolo utilizzato è basato sul modello agli elementi finiti (F.E.M.). Si suddivide l'intervallo preso in esame in tanti sottointervalli non necessariamente di uguale ampiezza, chiamando tali punti di suddivisione nodi e i singoli sottointervalli elementi. Se la soluzione incognita V è rappresentata da una linea continua, si ricerca una soluzione approssimata V descritta da

una poligonale che approssimi la funzione sconosciuta. Per fare questo sarà sufficiente determinare i valori approssimati della funzione incognita nei nodi, in quanto i valori fra i nodi si potranno interpolare linearmente. In questo modo si rinuncia ad ottenere la soluzione esatta, ottenendo un insieme discreto e finito di valori. Riscrivendo l'equazione (4.5.2):

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + kV - \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.5.8)$$

Dove si sono indicati con:

$$k = \frac{2}{\pi} \rho f_w U_{1m} \quad (4.5.9)$$

$$A = \rho v_t h \quad (4.5.10)$$

Si sono scelte delle funzioni di forma nodali lineari ("a tetto"):

$$N_j(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} & \text{per } x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} & \text{per } x_j \leq x \leq x_{j+1} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (4.5.11)$$

Le loro derivate risultano essere:

$$\frac{dN_j}{dx} = \begin{cases} \frac{1}{x_j - x_{j-1}} & \text{per } x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ -\frac{1}{x_{j+1} - x_j} & \text{per } x_j \leq x \leq x_{j+1} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (4.5.12)$$

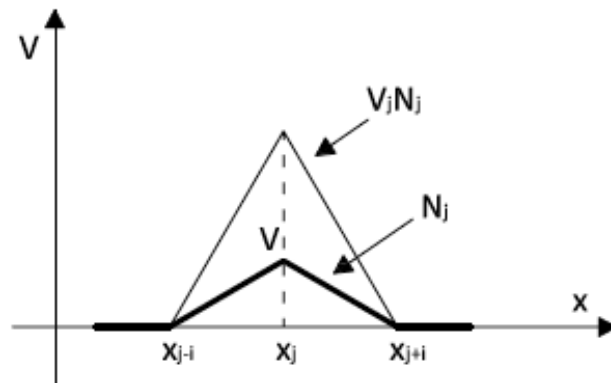


Figura 4.3 Funzione di forma

E' possibile dunque esprimere le funzioni approssimate \$V\$ (incognita) e \$S\$ (termine noto) come combinazioni lineari delle funzioni di forma nodali:

$$V = \sum_i v_i N_i \quad (4.5.13)$$

$$S_{xy} = \sum_i s_i N_i \quad (4.5.14)$$

Moltiplicando l'equazione (4.5.8) per funzioni di peso $N_j(x)$ imposte pari alle funzioni di forma lineari e integrando su tutto il profilo, si ottiene:

$$\begin{aligned}
 & \int_1^L \left[\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + kV - \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] N_j dx = \\
 & = \int_1^L \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} N_j dx + \int_1^L kV N_j dx - \int_1^L \left(A \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) N_j dx \quad (4.5.15) \\
 & = 0
 \end{aligned}$$

Applicando all'ultimo termine dell'equazione (4.5.15) il metodo dell'integrazione per parti:

$$\int_1^L \left(A \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) N_j dx = \left[A \frac{\partial V}{\partial x} N_j \right]_1^L - \int_1^L A \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \quad (4.5.16)$$

Dove, per le condizioni al contorno naturali:

$$\left[A \frac{\partial V}{\partial x} N_j \right]_1^L = \left[A \frac{\partial V}{\partial x} \right]_L N_j(L) - \left[A \frac{\partial V}{\partial x} \right]_1 N_j(1) = 0 \quad (4.5.17)$$

La forma integrale dell'equazione differenziale (di cui sono note le condizioni al contorno, ovvero velocità nulla a riva e a largo) risulta quindi essere:

$$\int_1^L A \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx + \int_1^L k V N_j dx + \int_1^L \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} N_j dx = 0 \quad (4.5.18)$$

Sostituendo nella forma integrale le funzioni approssimate espresse nelle equazioni (4.5.13) e (4.5.14) si ottiene:

$$\underbrace{\int_1^L A \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_i v_i N_i \right) \frac{\partial N_j}{\partial x} dx}_{\boxed{1}} + \underbrace{\int_1^L k \left(\sum_i v_i N_i \right) N_j dx}_{\boxed{2}} + \underbrace{\int_1^L \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_i s_i N_i \right) N_j dx}_{\boxed{3}} = 0 \quad (4.5.19)$$

Si analizzano ora i vari termini che compongono l'equazione precedente; l'obiettivo è quello di poter ricavare un'espressione della funzione incognita in forma matriciale.

1) E' possibile scrivere il primo termine dell'equazione (4.5.19) nella forma:

$$\begin{aligned} \int_1^L A \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_i v_i N_i \right) \frac{\partial N_j}{\partial x} dx &= \int_1^L A \left(\sum_i v_i \frac{\partial N_i}{\partial x} \right) \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \\ &= \sum_i \left(\int_1^L A \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dx \right) v_i = \sum_i f_{i,j} v_i \end{aligned}$$

Si valutano quindi i coefficienti $f_{i,j}$ che andranno a comporre una matrice $\underline{F} = [L,L]$:

- Se $i = j - 1$:

$$f_{j-1,j} = \int_{x_{j-1}}^{x_j} A \frac{\partial N_{j-1}}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_{j-1}}^{x_j} A \frac{-1}{x_j - x_{j-1}} \frac{1}{x_j - x_{j-1}} dx = -A \frac{1}{x_j - x_{j-1}}$$

- Se $i = j + 1$:

$$f_{j+1,j} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} A \frac{\partial N_{j+1}}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_j}^{x_{j+1}} A \frac{-1}{x_{j+1} - x_j} \frac{1}{x_{j+1} - x_j} dx = -A \frac{1}{x_{j+1} - x_j}$$

- Se $i = j$:

$$f_{j,j} = \int_{x_{j-1}}^{x_j} A \left(\frac{1}{x_j - x_{j-1}} \right)^2 dx + \int_{x_j}^{x_{j+1}} A \left(-\frac{1}{x_{j+1} - x_j} \right)^2 dx = A \left(\frac{1}{x_j - x_{j-1}} + \frac{1}{x_{j+1} - x_j} \right)$$

- Se $i = j = 1$:

$$f_{1,1} = \int_{x_1}^{x_2} A \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \right)^2 dx = A \frac{1}{x_2 - x_1}$$

- Se $i = j = L$:

$$f_{L,L} = \int_{x_{L-1}}^{x_L} A \left(\frac{1}{x_L - x_{L-1}} \right)^2 dx = A \frac{1}{x_L - x_{L-1}}$$

- In tutti gli altri casi $f_{i,j} = 0$, poiché i nodi non sono contigui.

Il primo termine risulta quindi, in forma matriciale:

$$\sum_i f_{i,j} v_i = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & f_{j,j-1} & f_{j,j} & f_{j,j+1} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & f_{L,L-1} & f_{L,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_L \end{bmatrix} = \underline{\underline{FV}}$$

- 2) E' possibile scrivere il secondo termine dell'equazione (4.5.19) nella forma:

$$\begin{aligned} \int_1^L k \left(\sum_i v_i N_i \right) N_j dx &= \sum_i \int_1^L k v_i N_i N_j dx = \sum_i \left(\int_1^L k N_i N_j dx \right) v_i \\ &= \sum_i g_{i,j} v_i \end{aligned}$$

Si valutano quindi i coefficienti $g_{i,j}$ che andranno a comporre una matrice $\underline{\underline{G}} = [L,L]$:

- Se $i = j - 1$:

$$\begin{aligned}
g_{j-1,j} &= \int_{x_{j-2}}^{x_{j+1}} kN_{j-1}N_j dx = \int_{x_{j-2}}^{x_{j-1}} kN_{j-1}N_j dx + \int_{x_{j-1}}^{x_j} kN_{j-1}N_j dx \\
&\quad + \int_{x_j}^{x_{j+1}} kN_{j-1}N_j dx = 0 + \int_{x_{j-1}}^{x_j} kN_{j-1}N_j dx + 0 \\
&= \int_{x_{j-1}}^{x_j} k \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \frac{x_j - x}{x_j - x_{j-1}} dx \\
&= \frac{k}{(x_j - x_{j-1})^2} \int_{x_{j-1}}^{x_j} (x - x_{j-1})(x_j - x) dx \\
&= \frac{k}{(x_j - x_{j-1})^2} \int_{x_{j-1}}^{x_j} (x_j x - x^2 - x_{j-1} x_j + x_{j-1} x) dx \\
&= \frac{k}{(x_j - x_{j-1})^2} \left[x_j \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - x_{j-1} x_j x + x_{j-1} \frac{x^2}{2} \right]_{x_{j-1}}^{x_j} = \frac{k(x_j - x_{j-1})}{6}
\end{aligned}$$

- Se $i = j + 1$:

$$g_{j,j+1} = \frac{k(x_{j+1} - x_j)}{6}$$

- Se $i = j$:

$$\begin{aligned}
g_{j,j} &= \int_{x_{j-1}}^{x_{j+1}} kN_j N_j dx = \int_{x_{j-1}}^{x_j} kN_j^2 dx + \int_{x_j}^{x_{j+1}} kN_j^2 dx \\
&= \int_{x_{j-1}}^{x_j} k \left(\frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right)^2 dx + \int_{x_j}^{x_{j+1}} k \left(\frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \right)^2 dx \\
&= \frac{k(x_j - x_{j-1})}{3} + \frac{k(x_{j+1} - x_j)}{3}
\end{aligned}$$

- Se $i = j = 1$:

$$g_{1,1} = \frac{k(x_2 - x_1)}{3}$$

- Se $i = j = L$:

$$g_{L,L} = \frac{k(x_L - x_{L-1})}{3}$$

Il secondo termine risulta quindi, in forma matriciale:

$$\sum_i g_{i,j} v_i = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & g_{j,j-1} & g_{j,j} & g_{j,j+1} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & g_{L,L-1} & g_{L,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_L \end{bmatrix} = \underline{\underline{GV}}$$

3) E' possibile scrivere il terzo termine dell'equazione (4.5.19) nella forma:

$$\int_1^L \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_i s_i N_i \right) N_j dx = \sum_i \left(\int_1^L \frac{\partial N_i}{\partial x} N_j dx \right) s_i = \sum_i b_{i,j} s_i$$

Si valutano quindi i coefficienti $b_{i,j}$ che andranno a comporre una matrice $\underline{\underline{B}} = [L,L]$:

- Se $i = j - 1$:

$$\begin{aligned}
 b_{j-1,j} &= \int_{x_{j-2}}^{x_{j+1}} N_{j-1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_{j-2}}^{x_{j-1}} N_{j-1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx + \int_{x_{j-1}}^{x_j} N_{j-1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \\
 &\quad + \int_{x_j}^{x_{j+1}} N_{j-1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = 0 + \int_{x_{j-1}}^{x_j} N_{j-1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx + 0 \\
 &= \int_{x_{j-1}}^{x_j} \frac{x_j - x}{x_j - x_{j-1}} \frac{1}{x_j - x_{j-1}} dx \\
 &= \frac{1}{(x_j - x_{j-1})^2} \int_{x_{j-1}}^{x_j} (x_j - x) dx = \frac{1}{(x_j - x_{j-1})^2} \left[x_j x - \frac{x^2}{2} \right]_{x_{j-1}}^{x_j} = \frac{1}{2}
 \end{aligned}$$

- Se $i = j + 1$:

$$b_{j+1,j} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} N_{j+1} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j} \frac{-1}{x_{j+1} - x_j} dx = -\frac{1}{2}$$

- Se $i = j$:

$$\begin{aligned}
 b_{j,j} &= \int_{x_{j-1}}^{x_j} N_j \frac{\partial N_j}{\partial x} dx + \int_{x_j}^{x_{j+1}} N_j \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \\
 &= \int_{x_{j-1}}^{x_j} \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \frac{1}{x_j - x_{j-1}} dx + \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \frac{-1}{x_{j+1} - x_j} dx = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

- Se $i = j = 1$:

$$b_{1,1} = \int_{x_1}^{x_2} N_j \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \frac{-1}{x_2 - x_1} dx = -\frac{1}{2}$$

- Se $i = j = L$:

$$b_{L,L} = \int_{x_{L-1}}^{x_L} N_j \frac{\partial N_j}{\partial x} dx = \int_{x_{L-1}}^{x_L} \frac{x - x_{L-1}}{x_L - x_{L-1}} \frac{1}{x_L - x_{L-1}} dx = \frac{1}{2}$$

Il terzo termine risulta quindi, in forma matriciale:

$$\sum_i b_{i,j} s_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_i \\ \vdots \\ s_L \end{bmatrix} = \underline{\underline{BS}}$$

È quindi possibile riscrivere l'equazione (4.5.19) con la seguente relazione:

$$\sum_i f_{i,j} v_i + \sum_i g_{i,j} v_i + \sum_i b_{i,j} s_i = 0 \quad (4.5.20)$$

La quale, scritta in forma compatta, risulta essere:

$$\underline{\underline{F}}V + \underline{\underline{G}}V + \underline{\underline{B}}S = 0 \quad (4.5.21)$$

Si può dunque ricavare la velocità media della corrente long - shore:

$$V = \left[\text{inv} \left(\underline{\underline{G}} + \underline{\underline{F}} \right) \right] \left(-\underline{\underline{B}}S \right) \quad (4.5.22)$$

La velocità della corrente lungo riva, tenendo conto del termine legato alla turbolenza, assumerà un andamento prossimo a quello triangolare, con un picco della velocità meno elevato e una forma più arrotondata. Di seguito si riporta l'andamento della velocità proposto da Longuet – Higgins (1970), al variare del parametro P funzione del coefficiente di turbolenza C.

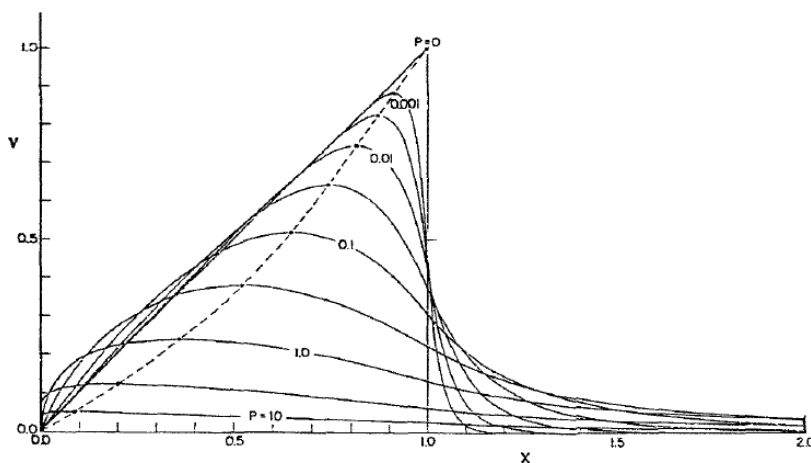


Figura 4.4 Forma teorica della corrente long - shore (Longuet – Higgins)

4.6. Suddivisione del trasporto solido costiero

La circolazione litoranea in direzione ortogonale e parallela alla costa riveste, come già accennato, un ruolo di fondamentale importanza nei fenomeni di trasporto solido costiero, il quale può essere scomposto in due componenti di moto:

- trasporto solido trasversale, in direzione perpendicolare alla linea di battigia (cross - shore), dovuto principalmente alle correnti di ritorno e alle asimmetrie del campo di moto ondoso;
- trasporto solido longitudinale, in direzione parallela alla linea di battigia (long - shore), prodotto dalla corrente litoranea.

Il trasporto solido long - shore influisce sull'evoluzione a lungo termine della morfologia costiera mentre quello cross - shore è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine dovuti a condizioni di mareggiata. Il trasporto solido trasversale è dunque promotore del rimodellamento del profilo della sezione garantendo tuttavia la conservazione della massa e la continuità; il trasporto solido longitudinale invece determina la sottrazione di sabbia allontanandola dalla sezione secondo la direzione definita dalle onde.

Nell'area compresa tra la linea di frangimento dell'onda più alta e la linea del litorale avviene la maggior parte del trasporto solido: la parte più fine del materiale posto in movimento viene trasportata per sospensione, la frazione più grossa viene spostata per rotolamento sul fondo secondo la direzione dell'onda verso riva; esistono quindi due gruppi di particelle in movimento: il carico sospeso e il carico di fondo.

Nei successivi paragrafi si esporranno le teorie applicate per l'implementazione dei modelli di trasporto solido long - shore e cross - shore. Per quanto riguarda il trasporto solido longitudinale il modello utilizzerà la formula proposta da Bijker che tiene conto sia del carico sospeso che di quello al fondo; il modello implementato per il trasporto solido

trasversale invece non arriva a questo grado di definizione, bensì assume che tutto il trasporto avvenga in sospensione, legando la portata solida alle caratteristiche dell'onda e al diametro del sedimento senza effettuare considerazioni riguardo la tensione tangenziale. Per quanto riguarda il trasporto solido perpendicolare a riva sarà implementato il modello proposto da Larson e Kraus, il quale suddivide il profilo in diverse zone e a ciascuna assegna una diversa formula per il calcolo della portata solida; noti i valori del trasporto si valuterà l'evoluzione a breve termine del profilo.

5. IL TRASPORTO SOLIDO LUNGO COSTA

Lo studio del trasporto solido in direzione parallela alla costa necessita di comprendere gli effetti del campo di moto sulla movimentazione dei sedimenti. La stima del trasporto long – shore può avvenire facendo riferimento a diverse formulazioni; quelle prese in considerazione in questo lavoro sono la formula di Bijker e la formula del CERC. La prima considera l'interazione tra moto ondoso e corrente, suddivide il trasporto in carico al fondo e carico in sospensione e ne stima la distribuzione all'interno della zona dei frangenti; la seconda formulazione invece consente solamente un calcolo complessivo del trasporto.

5.1. Introduzione

Nei capitoli precedenti sono stati introdotti i principali aspetti morfologici e i fenomeni idrodinamici che caratterizzano la zona costiera; in questo capitolo saranno invece descritti gli effetti del campo di moto sulla movimentazione dei sedimenti che compongono il trasporto in direzione parallela alla costa.

Il trasporto solido longitudinale è tipicamente maggiore dove si osserva l'interazione tra moto ondoso e corrente; infatti il meccanismo di movimentazione dei sedimenti prevede che l'onda sollevi la particella solida mentre la corrente la trasporti.

I sedimenti non coesivi possono essere trasportati secondo quattro diverse modalità:

- Slittamento
- Rotolamento
- Saltellamento
- Sospensione

Le prime tre modalità di trasporto implicano un continuo contatto con il fondo e sono quelle che presuppongono la presenza del carico di fondo, mentre l'ultima, avvenendo nella colonna d'acqua, interessa particelle che vanno a costituire il cosiddetto carico in sospensione.

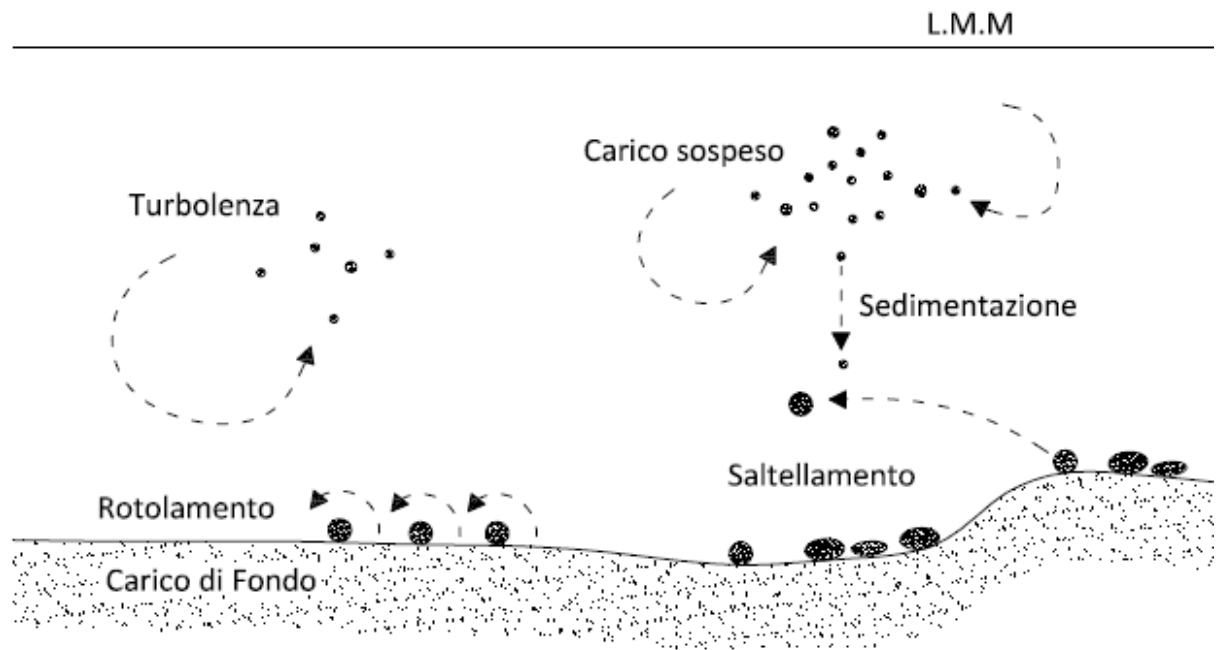


Figura 5.1 Modalità di trasporto dei sedimenti marini

In letteratura esistono diverse formulazioni per la quantificazione del trasporto long - shore, frequentemente però si fa riferimento a due approcci fondamentali basati su:

- calcolo complessivo del trasporto totale attraverso la zona dei frangenti;
- calcolo della distribuzione del trasporto all'interno della zona dei frangenti.

Nel primo caso si tratta dell'approccio su cui si è fondata la formula del CERC (Civil Engineering Research Centre del Us Army Corps Of Engineers) riportata nello Shore Protection Manual (1984); tale formula è quella maggiormente utilizzata per il calcolo del trasporto long - shore, essa però considera la corrente esclusivamente attraverso i parametri relativi al frangimento, non utilizzando esplicitamente la corrente.

Per questo motivo è di rilevante importanza lo studio di formule basate sul secondo approccio, che permettano di combinare insieme gli effetti di corrente e dell'onda e che, alla stesso tempo, permettano di distribuire da largo a riva tale valore di portata.

La formula che si andrà ad analizzare in questo elaborato è quella sviluppata tra il '66 e il '71 da Bijker; essa, oltre a considerare congiuntamente onde e correnti, suddivide il trasporto in due componenti: una relativa al trasporto al fondo e una relativa al trasporto in sospensione.

Il modello presenta un modulo che calcola la variazione dell'altezza dell'onda e del livello del set - up e quindi le grandezze collegate a tali fenomeni in direzione trasversale, facendo riferimento ad onde di piccola ampiezza e quindi applicando la teoria lineare; la propagazione dell'onda è ricavata tramite il modello di Dally, Dean e Dalrymple (1985), calcolando precedentemente gli effetti dello shoaling e della rifrazione. In seguito viene calcolata la velocità della corrente lungo riva tramite il metodo agli elementi finiti e quindi viene stimata la portata solida in direzione parallela alla costa con la formula di Bijker. Per maggiore completezza la portata solida è stata valutata anche con la formula del CERC per poter effettuare un confronto tra i due risultati.

Il modello, implementato in linguaggio Matlab, viene avviato all'interno di tale software; esso è stato strutturato in moduli ed in functions in modo tale da permettere di modificarlo utilizzando differenti relazioni di trasporto o diversi criteri per lo studio dell'evoluzione dell'onda, quali la possibilità di considerare onde irregolari o adottare un modello di decadimento dell'onda differente come ad esempio quello di Battjes e Janssen.

5.2. Sollecitazione al fondo dovuta alle correnti

Le correnti rappresentano la forzante principale per il trasporto di sedimenti in aree costiere e possono essere causate dalle maree, dal vento, da gradienti di pressione dovuti a fenomeni atmosferici e dal moto ondoso. Le correnti lungo riva, legate alla presenza delle onde, hanno generalmente una velocità media che varia da 0,3 a 1 m/s e sono generate da fronti d'onda che si approssimano alla riva con angolo di incidenza non nullo.

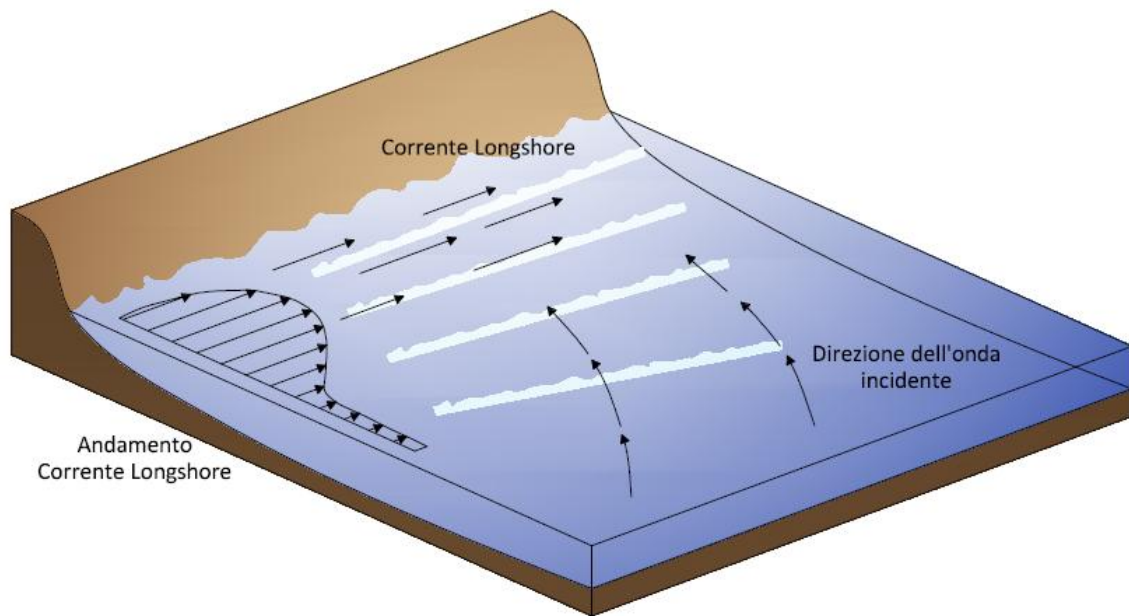


Figura 5.2 Rappresentazione della generazione e del campo di moto di una corrente long - shore

Nel capitolo precedente si è studiato l'andamento della velocità lungo riva risolvendo l'equazione del bilancio della quantità di moto in direzione parallela alla costa con il metodo agli elementi finiti, esso verrà quindi utilizzato nell'implementazione del modello di trasporto long - shore.

Considerando moto uniforme, la relazione che lega la velocità della corrente V , la pendenza del fondo i , la profondità h e il coefficiente d'attrito al fondo C è data dalla formula di Chezy:

$$V = C\sqrt{hi} \quad (5.2.1)$$

Dalla quale è possibile ricavare la tensione tangenziale al fondo relativa alla corrente:

$$\tau_{b,c} = \frac{\rho g V^2}{C^2} = \rho \kappa^2 v_c^2 \quad (5.2.2)$$

Dove $\kappa = 0,4$ è il coefficiente di Von Karman e v_c risulta essere:

$$v_c = \frac{v_*}{\kappa} = \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} V \quad (5.2.3)$$

Essendo r la scabrezza, il coefficiente di Chézi viene stimato:

$$C = 18 \log_{10}(12h/r) \quad (5.2.4)$$

5.3. Sollecitazione al fondo dovuta al moto ondoso

Le onde rivestono un ruolo fondamentale nei meccanismi di movimentazione dei sedimenti; per stimare il contributo del moto ondoso sul trasporto è fondamentale conoscere il valore della velocità orizzontale di una particella che si trova vicino al fondo.

Dalla teoria dell'onda lineare, l'equazione che descrive il potenziale risulta essere:

$$\phi = -\frac{H w}{2 k} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (5.3.1)$$

Dalle quale è possibile ricavare il valore della velocità al fondo:

$$U_{1m} = u|_{z=-h} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{z=-h} = \frac{H w}{2 k} \frac{1}{\sinh kh} \quad (5.3.2)$$

Bijker definì lo sforzo di taglio al fondo relativo al moto ondoso in maniera simile a quello relativo alla corrente:

$$\tau_{b,w} = \rho \kappa^2 v_w^2 \quad (5.3.3)$$

Dove v_w risulta essere:

$$v_w = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_{1m} \quad (5.3.4)$$

Ottenendo dunque la seguente relazione per lo sforzo tangenziale relativo al moto ondoso:

$$\tau_{b,w} = \frac{1}{2} \rho f_w U_{1m}^2 \quad (5.3.5)$$

5.4. Interazione onde e correnti

Come già affermato precedentemente le onde sono responsabili della movimentazione dei sedimenti mentre le correnti ne determinano lo spostamento. Nel caso siano presenti sia l'effetto delle correnti che l'effetto del moto ondoso si può osservare che in prossimità della superficie libera è prevalente la componente relativa alla corrente, mentre nelle vicinanze del fondo è maggiore la parte attinente al moto ondoso.

Lo sforzo tangenziale totale al fondo, dovuto all'azione combinata della corrente e del moto ondoso, può essere calcolato:

$$\tau_{b,wc} = \tau_{b,c} + \frac{1}{2}\tau_{b,w} = \tau_{b,c} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{U_{1m}}{V} \right)^2 \right] \quad (5.4.1)$$

Il coefficiente ξ è dato dalla seguente relazione:

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (5.4.2)$$

5.5. Portata solida long - shore con la formula di Bijker

Il metodo di Bijker permette di stimare il trasporto long - shore considerando unitamente l'effetto delle onde e della corrente. Tale trasporto è suddiviso in due parti: una relativa al trasporto al fondo $q_{b,B}$ e una relativa al trasporto in sospensione $q_{s,B}$.

$$q_{t,B} = q_{b,B} + q_{s,B} \quad (5.5.1)$$

5.5.1. Trasporto al fondo

La portata al fondo ($m^3/s/m$) è calcolata tramite la seguente formula:

$$q_{b,B} = Ad_{50} \frac{V}{C} \sqrt{g} \exp \left[\frac{-0,27(s-1)d_{50}\rho g}{\mu\tau_{b,wc}} \right] \quad (5.5.2)$$

Dove A è un coefficiente empirico (1 per onde non frangenti, 5 per onde frangenti), d_{50} è il diametro medio delle particelle, V è la velocità media della corrente long - shore, s è la densità relativa ($=\rho_s/\rho_w$), μ è il ripple factor infine $\tau_{b,wc}$ è la tensione al fondo relativa all'onda e alla corrente.

Per quanto riguarda il ripple factor μ , che indica l'influenza delle forme di fondo sul trasporto, viene calcolato con la seguente formula:

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1,5} \quad (5.5.3)$$

Dove il coefficiente di Chézi per un fondo con diametro d_{90} viene stimato:

$$C_{90} = 18 \log_{10}(12h/d_{90}) \quad (5.5.4)$$

5.5.2. Trasporto in sospensione

Per il calcolo del carico sospeso si parte dalla valutazione della concentrazione di materiale nello strato di fondo, assumendo costante lo spessore:

$$c_b = \frac{q_{b,B}}{6,34 \sqrt{\frac{\tau_{b,c}}{\rho}} r} \quad (5.5.5)$$

La distribuzione di concentrazione lungo z , considerando w la velocità di caduta delle particelle, risulta:

$$c(z) = c_b \left[\frac{r}{h-r} \frac{h-z}{z} \right]^{\frac{w\sqrt{\rho}}{k\sqrt{\tau_{b,wc}}}} \quad (5.5.6)$$

Tramite integrazione dalla quota del fondo alla superficie libera, il carico sospeso è determinato dalla seguente formulazione:

$$q_{s,B} = 1,83Q = 1,83q_{b,B} \left[I_1 \ln \left(\frac{33h}{r} \right) + I_2 \right] \quad (5.5.7)$$

Dove I_1 e I_2 sono gli integrali di Einstein:

$$I_1 = 0,216 \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \int_A^1 \left[\frac{1-\zeta}{\zeta} \right]^{z_*} d\zeta \quad (5.5.8)$$

$$I_2 = 0,216 \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \int_A^1 \left[\frac{1-\zeta}{\zeta} \right]^{z_*} \ln \zeta d\zeta \quad (5.5.9)$$

Dove:

$$A = \frac{r}{h} \quad (5.5.10)$$

$$z_* = \frac{w_f}{0,4v_*} = \frac{w_f}{0,4\sqrt{\tau_{b,wc}/\rho}} \quad (5.5.11)$$

Nel modello implementato per il calcolo degli integrali di Einstein si è utilizzata una function elaborata da Junke Guo (2005); di seguito si riportano due tabelle nelle quali, al variare di z^* e A , sono stati determinati i valori di Q dell'equazione (5.5.7). La prima tabella restituisce i valori calcolati tramite il codice Matlab, la seconda invece è indicata nel “Sediment Transport by waves and currents” (Eco W. Bijker). Si può osservare che i valori computati tramite il codice sono meno approssimati, tuttavia per valori di z^* grandi e A piccoli i risultati di Q coincidono.

METODO DI JUNKE GUO (2005)										
	$z^*=0$	$z^*=0,2$	$z^*=0,4$	$z^*=0,6$	$z^*=0,8$	$z^*=1$	$z^*=1,5$	$z^*=2$	$z^*=3$	$z^*=4$
$A = r/h$	Q									
0,00001	302603	31451,2	3722,7	514,3	87,5	20,0	2,33	0,971	0,432	0,276
0,00002	143815	17144,5	2325,4	367,1	70,8	17,9	2,31	0,970	0,432	0,276
0,00005	53567,4	7653,0	1242,1	233,7	53,1	15,4	2,28	0,970	0,432	0,276
0,0001	25286,3	4141,6	769,6	165,2	42,4	13,6	2,25	0,968	0,431	0,276
0,0002	11894,3	2232,8	474,7	116,1	33,6	11,9	2,21	0,966	0,431	0,276
0,0005	4361,5	980,0	248,7	72,1	24,4	9,8	2,13	0,960	0,431	0,275
0,001	2030,8	522,4	151,4	49,8	18,9	8,3	2,06	0,952	0,430	0,275
0,002	940,3	276,8	91,5	34,1	14,4	7,0	1,96	0,939	0,428	0,275
0,005	336,2	118,1	46,3	20,2	9,9	5,4	1,79	0,908	0,424	0,273
0,01	152,9	61,2	27,2	13,4	7,2	4,3	1,62	0,869	0,417	0,270
0,02	68,7	31,3	15,7	8,6	5,1	3,3	1,43	0,810	0,404	0,264
0,05	23,2	12,5	7,3	4,6	3,1	2,2	1,12	0,693	0,370	0,248
0,1	9,8	6,0	3,9	2,7	1,9	1,5	0,85	0,568	0,325	0,223
0,2	3,9	2,6	1,9	1,4	1,1	0,9	0,58	0,414	0,256	0,183
0,5	0,8	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3	0,37	0,180	0,124	0,095
1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

"SEDIMENT TRANSPORT BY WAVES AND CURRENT" (Eco W. Bijker)										
	$z^*= 0$	$z^*= 0,2$	$z^*= 0,4$	$z^*= 0,6$	$z^*= 0,8$	$z^*= 1$	$z^*= 1,5$	$z^*= 2$	$z^*= 3$	$z^*= 4$
A = r/h	Q									
0,00001	303000	32800,0	3880,0	527,0	88,0	20,0	2,33	0,973	0,432	0,276
0,00002	144000	17900,0	2430,0	377,0	71,6	17,9	2,31	0,973	0,432	0,276
0,00005	53600,0	7980,0	1300,0	239,0	53,6	14,4	2,28	0,967	0,432	0,276
0,0001	25300,0	4320,0	803,0	169,0	42,7	13,6	2,25	0,967	0,432	0,276
0,0002	11900,0	2330,0	496,0	119,0	33,9	11,9	2,21	0,967	0,431	0,275
0,0005	4360,0	1020,0	260,0	74,3	24,6	9,8	2,13	0,962	0,431	0,275
0,001	2030,0	545,0	158,0	51,2	19,1	8,4	2,05	0,951	0,430	0,275
0,002	940,0	289,0	95,6	35,1	14,6	7,0	1,96	0,940	0,428	0,274
0,005	336,0	123,0	48,5	20,8	10,0	5,4	1,78	0,907	0,424	0,273
0,01	153,0	63,9	28,6	13,8	7,3	4,3	1,62	0,869	0,417	0,270
0,02	68,9	32,8	16,5	8,9	5,2	3,3	1,42	0,809	0,404	0,264
0,05	23,2	13,1	7,7	4,8	3,1	2,2	1,10	0,694	0,374	0,249
0,1	9,8	6,3	4,1	2,8	2,0	1,5	0,84	0,568	0,339	0,236
0,2	3,9	2,8	2,0	1,5	1,2	0,9	0,55	0,414	0,317	-
0,5	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,17	-	-	-
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-

5.6. Portata long - shore con la formula del C.E.R.C.

La formula del C.E.R.C. stabilisce una diretta dipendenza tra il flusso d'energia associato ad un'onda in direzione parallela alla costa e il trasporto di sedimenti nella stessa direzione, il quale infatti interessa una fascia ristretta della costa e la sua intensità e direzione dipendono principalmente dall'altezza, dal periodo e dalla direzione delle onde. Si introduce la variabile P_l , funzione del flusso di energia per unità di larghezza ortogonale al raggio d'onda valutato al frangimento:

$$P_l = (EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (5.6.1)$$

$$P_l = \rho g \frac{H_b^2}{16} \sqrt{gh_b} \sin 2\alpha_b = \rho g^{1,5} \frac{H_b^{2,5}}{16 \sqrt{0,78}} \sin 2\alpha_b \quad (5.6.2)$$

Tale variabile è possibile correlarla al flusso di materiale solido longitudinale espresso in peso immerso:

$$I_l = (\rho_s - \rho)g(1 - n)Q_l = KP_l \quad (5.6.3)$$

Ottenendo dunque la portata solida lungo riva:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)}P_l \quad (5.6.4)$$

Dove è stato assunto, come consigliato dallo “Shore Protection Manual”, $K = 0,92$. Uno dei principali limiti di questa formula è legato al fatto che essa consente di calcolare il trasporto solido totale parallelamente alla linea di costa senza dare alcuna indicazione su come quest'ultimo è distribuito all'interno della zona dei frangenti. Inoltre, la formula non tiene conto delle variazioni granulometriche del sedimento e in essa non compare nessun parametro caratteristico della morfologia della spiaggia come la pendenza o la larghezza della zona dei frangenti.

5.7. Struttura del modello implementato

La struttura del modello implementato consiste sostanzialmente in tre moduli di calcolo:

- Modulo di calcolo della trasformazione dell'onda
- Modulo di calcolo della velocità long - shore
- Modulo di calcolo del trasporto solido lungo riva

Il primo modulo valuta la trasformazione dell'onda dalla prima cella di calcolo a lato mare alla fine della surf zone; il secondo modulo, in base alle grandezze valutate dal modulo

precedente determina la velocità della corrente lungo riva secondo quanto visto al paragrafo 4.5.1. Con le velocità calcolate, il terzo modulo determina le portate solide con la formula di Bijker.

Inizialmente il modello richiede di imporre le condizioni marine al largo con le loro relative frequenze annue, il litorale (assegnato mediante il caricamento di un file di testo contenente le coordinate altimetriche in funzione della progressiva da una posizione 0) e le costanti delle varie relazioni applicate (parametri dello spettro Jonswap, indice di frangimento, densità relativa dell'acqua e della sabbia, diametro medio D_{50} e D_{90}). In seguito il modello calcola la variazione dell'onda dal largo a riva secondo la teoria di Dally, Dean e Dalrymple; in ogni posizione viene stimata l'altezza d'onda limite oltre la quale inizia il frangimento e si verifica che l'onda calcolata non superi tale altezza; qualora ciò avvenga la forma dell'onda si rompe generando delle turbolenze fortemente dissipative e l'altezza dell'onda inizia a decadere. Nel caso in cui l'andamento del fondale sia tale da permettere la riformazione dell'onda, la dissipazione risulta nuovamente nulla e torna valida la conservazione dell'energia fino al successivo frangimento.

Nota l'altezza d'onda è possibile valutare la velocità lungo riva in ogni posizione del profilo con il metodo degli elementi finiti, partendo dal calcolo delle matrici e dei coefficienti relativi ai vari termini che compongono l'equazione del bilancio di massa in direzione parallela a riva.

Il modello, noto l'andamento della velocità, stima la portata solida al fondo e in sospensione con la formula di Bijker ed infine valuta il volume annuo movimentato tramite le frequenze annue che caratterizzano ciascuna onda.

5.8. Conclusioni

A differenza dell'utilizzo di un modello di tipo commerciale, la formulazione e l'implementazione di un modello numerico permette di conoscere i vantaggi e i limiti dello stesso, consentendo inoltre di calibrare i diversi coefficienti e parametri in base alle caratteristiche in esame. Nel caso specifico il modello è in grado di stimare il trasporto solido long – shore per qualsiasi profilo trasversale immettendo come input il clima ondoso della zona presa in considerazione.

6. IL TRASPORTO SOLIDO ORTOGONALE A RIVA

Il trasporto solido cross – shore è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine dovuti a condizioni di mareggiata; esso è dunque il promotore del rimodellamento del profilo garantendo tuttavia la conservazione della massa e la continuità. Il modello implementato, per stimare il trasporto solido trasversale, è quello elaborato da Larson e Kraus, il quale suddivide il profilo in diverse zone a seconda della propagazione dell'onda e assegna a ciascuna una formula per il calcolo della portata. Utilizzando le portate solide determinate, la variazione del profilo viene calcolata mediante l'equazione di conservazione della massa discretizzata con il metodo delle differenze finite. Si è deciso inoltre di introdurre nel modello il concetto di “avalanching”, ovvero se la pendenza locale supera l'angolo di crollo iniziale, il materiale viene ridistribuito lungo il fondale fino a raggiungere una nuova pendenza più stabile, nota come angolo residuo.

6.1. Introduzione

La possibilità di prevedere in modo quantitativo la risposta del profilo di una spiaggia, sottoposto all'azione delle onde incidenti e alle variazioni del livello della superficie del mare per effetto della marea e dello storm surge, è un importante obiettivo dell'ingegneria marittima. Al fine di progettare correttamente degli interventi considerando valutazioni di tipo economico è necessario disporre di strumenti che possano fornire una stima quantitativa, non solamente qualitativa, dell'erosione delle dune eventualmente presenti e della risposta della spiaggia.

Il modello implementato presenta l'ipotesi fondamentale che la causa più rilevante del cambiamento del profilo in direzione cross - shore sia il frangimento delle onde e pertanto la maggior parte del trasporto cross - shore avvenga nella surf zone. Il volume di sedimenti trasportati viene calcolato in funzione della dissipazione di energia dell'onda per unità di volume tramite relazioni semi-empiriche. La direzione del trasporto, onshore o offshore è data da un criterio empirico e il calcolo del campo di velocità del fluido nella surf zone non è necessario.

Quando il moto ondoso è frontale rispetto al litorale vi è un trasporto normale alla riva localizzato prevalentemente nella zona a valle dei frangenti, ovvero nell'area compresa tra la linea di frangimento dell'onda più alta e la linea del litorale, denominata fascia attiva.

6.2. Direzione del trasporto cross-shore

La previsione della direzione del trasporto, dunque della tendenza all'erosione piuttosto che all'accrescimento, è importante al fine di progettare correttamente le strutture di difesa della spiaggia e stabilire la posizione oltre la quale è sconsigliabile realizzare insediamenti produttivi, abitativi o turistici.

Il trasporto solido cross - shore generato dal mare può essere studiato mediante il controllo del profilo trasversale; in un canale di laboratorio il profilo di una spiaggia sommersa piana declive, dopo la sollecitazione prolungata di un moto ondoso regolare, può assumere due forme che prendono il nome di profilo a gradoni e profilo a barra.

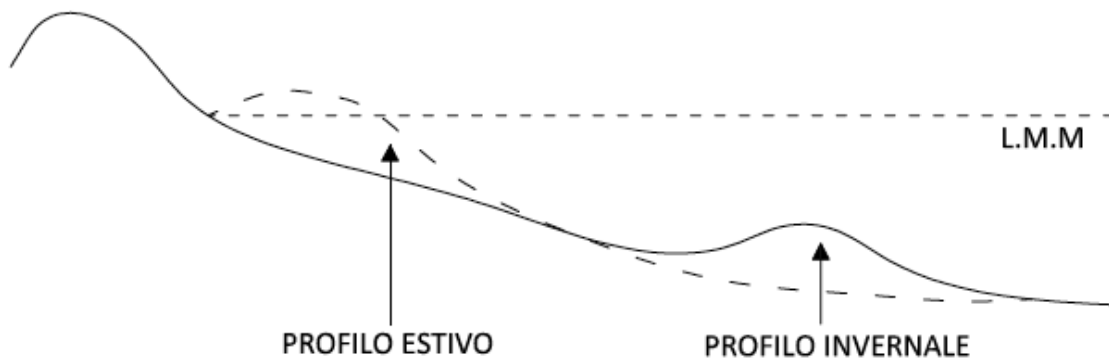


Figura 6.1 Profilo estivo - Profilo invernale

Se il profilo di una spiaggia non è in equilibrio per una data onda incidente, la sabbia verrà ridistribuita per permettere al profilo di raggiungere una condizione equilibrata; in funzione delle onde incidenti, della forma del profilo e delle proprietà dei sedimenti il trasporto sarà prevalentemente diretto verso la costa o verso il largo. Qualora il profilo tenda ad una condizione di erosione, esso sarà caratterizzato da una sottrazione di sedimenti nella parte alta e un deposito nella zona dei frangenti con la conseguente formazione di una barra; qualora invece tendesse a una condizione di accrescimento si osserverà un deposito di sabbia nei pressi della battigia e la conseguente formazione di una berma.

Le prove di laboratorio, eseguite a livello costante e con onde regolari, dimostrano che il profilo a berma si ottiene con onde poco ripide tipiche della stagione estiva, mentre quello a barra si realizza per onde molto ripide, tipiche della stagione invernale; per questo motivo il primo tipo di profilo è definito come profilo estivo, il secondo come profilo invernale.

Il valore che determina il passaggio da una condizione all'altra tuttavia non è costante, bensì dipende dal livello dell'acqua e dalla dimensione dei granuli, ovvero dalle caratteristiche di sedimentazione di quest'ultimi. I criteri per prevedere la tendenza del profilo all'erosione o all'accrescimento in genere includono un parametro riconducibile alle caratteristiche dei sedimenti, un parametro correlato alle caratteristiche dell'onda ed eventualmente la pendenza della spiaggia.

Nel modello implementato si è voluto utilizzare il criterio proposto da Sunamura e Horikawa (1975) e Sunamura (1980), che utilizza tre parametri adimensionali: la ripidità dell'onda al largo, il rapporto tra diametro medio dei sedimenti e lunghezza d'onda e la pendenza media della spiaggia.

$$\frac{H_0}{L_0} = \text{cost} (\tan\beta)^{-0.27} \left(\frac{D_{50}}{L_0}\right)^{0.67} \quad (6.2.1)$$

Qualora la grandezza di sinistra, che rappresenta le caratteristiche dell'onda, sia maggiore di quella di destra, che comprende invece le caratteristiche del fondale, si ha una condizione di erosione, viceversa di accrescimento. Dai dati ricavati in laboratorio la costante è stata valutata pari a 4 mentre da analisi sul campo è risultata pari a 9.

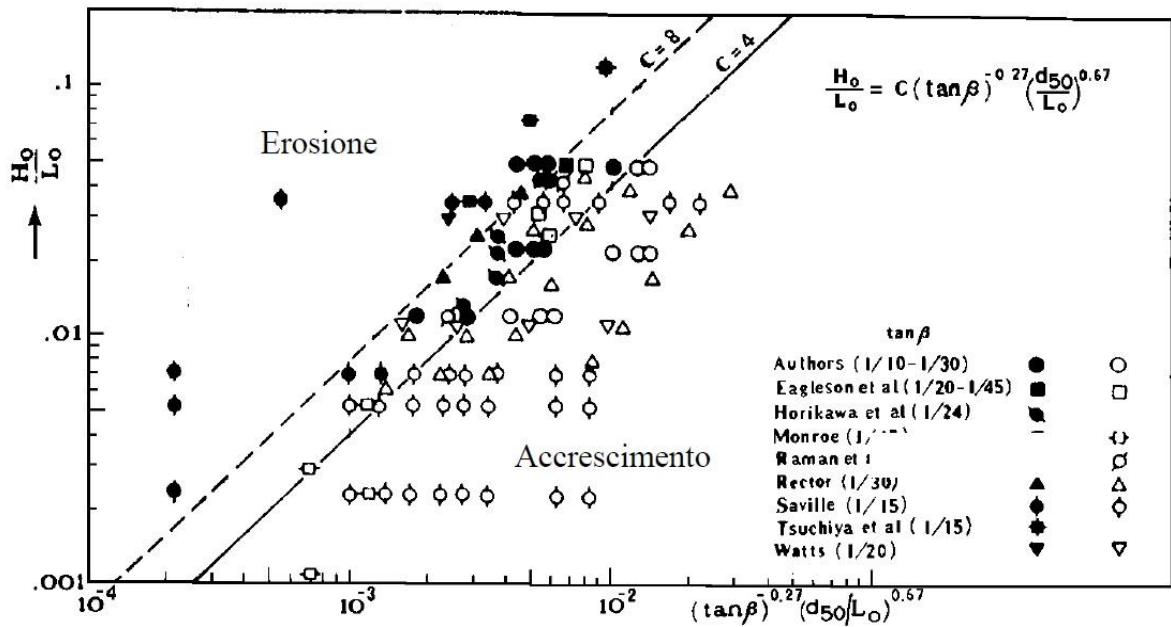


Figura 6.2 Risultati sperimentali Sunamura Horikawa Laboratorio

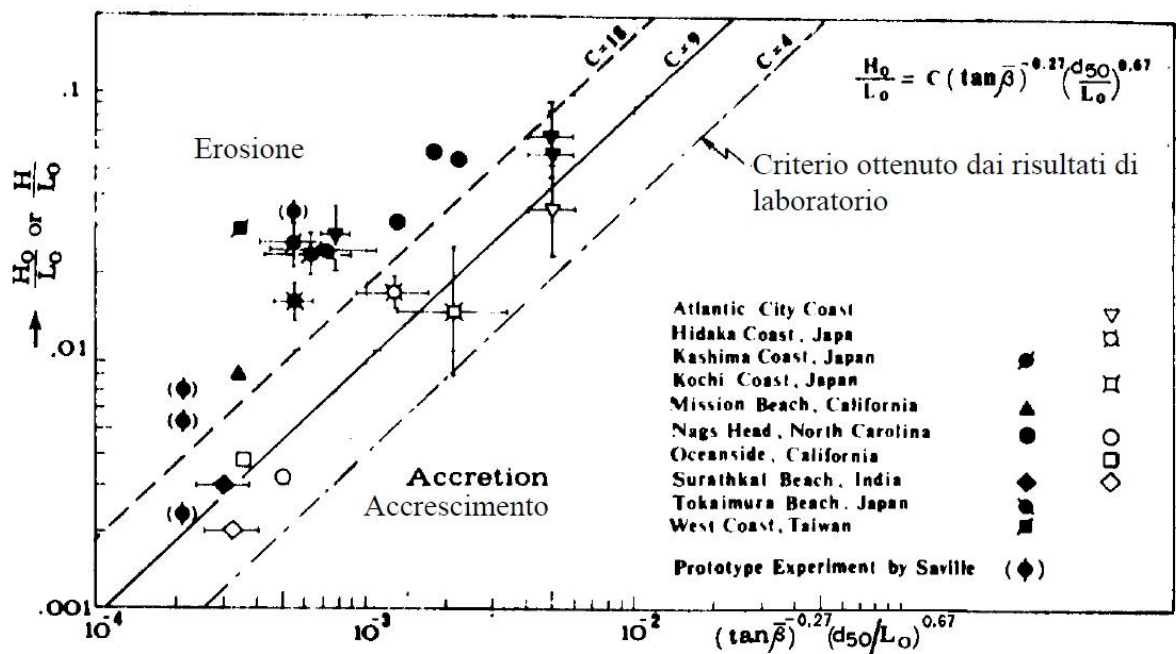


Figura 6.3 Risultati sperimentali Sunamura Horikawa in situ

6.3. Il modello di trasporto di Larson e Kraus

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il modello ideato da Larson e Kraus è che la variazione del profilo trasversale del litorale sia correlato solamente all'azione del trasporto solido cross - shore e quindi l'effetto di una redistribuzione trasversale avviene all'interno della medesima cella sedimentologica. L'azione di trasporto long - shore è considerata uniforme nella medesima sezione e conseguentemente viene trascurata dal modello. Quest'assunzione è considerata valida qualora si desideri studiare l'evoluzione indotta da singoli eventi di mareggiata o comunque variazioni a breve termine mentre per studi sul lungo termine tale ipotesi è da ritenere valida qualora il trasporto parallelo a riva sia di entità trascurabile o comunque lo sia la variazione indotta da questo; in generale tale situazione si presenta su litorali privi di strutture di difesa trasversali, ovvero prive di interferenze nel trasporto longitudinale e con un naturale apporto di sedimenti sufficiente o, in alternativa, su litorali con celle completamente isolate.

Nel calcolo della variazione del profilo, il modello assume che il trasporto cross - shore sia indotto essenzialmente dal frangimento delle onde, dalla variazione del livello del mare per effetto del set - up e della marea e dalla geometria del profilo stesso. Le maggiori portate solide cross - shore sono correlate infatti alle onde frante che trasferiscono energia al fondo dissipandola e ponendo in sospensione i sedimenti in modo che possano poi venire trasportati. Il grado di dettaglio necessario per lo studio del moto dei singoli sedimenti è computazionalmente troppo dispendioso per il presente modello e conseguentemente vengono utilizzati approcci semplificati. Una classificazione dei modelli di trasporto può essere la seguente:

- Energy dissipation models: la portata solida viene correlata alla dissipazione di energia e non vengono studiati i problemi di circolazione;

- Energetics models: la portata solida è correlata alla velocità del fluido ad una certa quota dal fondo. In questi modelli deve essere valutato in dettaglio l'andamento delle velocità;
- Concentration- velocity models: la portata solida è ottenuta dall'integrazione del prodotto della concentrazione media di sedimenti e la velocità del fluido determinata punto per punto sulla colonna d'acqua.

Nel presente modello viene fatto riferimento alla prima tipologia con la fondamentale ipotesi che le onde frangenti di breve periodo durante una mareggiata sono la causa dominante dell'evoluzione del profilo della spiaggia e conseguentemente della formazione e dello spostamento delle barre di fondo. Dally (1980) e Birkemeier (1987) hanno fissato dei criteri per stimare la validità di un modello che intenda determinare l'evoluzione di un profilo. Il modello dovrebbe:

- simulare accuratamente l'evoluzione nel tempo di un profilo di forma arbitraria soggetto a cambiamenti in termini di livello dell'acqua e di parametri delle onde incidenti;
- determinare una condizione di equilibrio se tutti i parametri del modello e valori di input sono mantenuti costanti;
- simulare la formazione e lo spostamento di forme di fondo macroscopiche quali barre e berme;
- riprodurre cambiamenti del profilo della spiaggia sia in erosione sia in accrescimento;
- essere verificato in un ampio ambito di condizioni reali.

Il modello, anch'esso implementato in linguaggio Matlab, presenta lo stesso modulo per il calcolo della variazione dell'altezza d'onda usato per la valutazione del trasporto lungo

riva. Con le informazioni ricavate dal modello di trasformazione dell'onda, all'interno del medesimo intervallo temporale, il profilo viene suddiviso in specifiche regioni in cui sono calcolate le portate solide cross - shore utilizzando relazioni semi-empiriche ricavate sperimentalmente da Larson e Kraus mediante l'analisi di dati di laboratorio su prototipi in scala (Large Wave Tank, LWT) e misurazioni sul campo. Il modulo che infine calcola la variazione geometrica del profilo è sostanzialmente basato sull'equazione di conservazione della massa.

La procedura descritta è condotta ad ogni intervallo temporale seguendo lo schema risolutivo tipico delle differenze finite, usando le condizioni dell'onda corrente incidente sulla spiaggia e il livello del mare e aggiornando quindi di volta in volta la geometria della sezione trasversale. E' doveroso specificare che il modello ha come finalità principale il calcolo della variazione del profilo da un punto di vista macroscopico: conseguentemente non viene posto l'accento sui processi di evoluzione delle forme di fondo a scala ridotta, quali le ripples, e si evita di considerare espressioni di trasporto solido complicate che prevedano un elevato grado di precisione nello studio dei processi idrodinamici e della concentrazione dei sedimenti.

Il presente modello numerico rappresenta un efficace strumento per valutare tali effetti a livello macroscopico, trascurando fenomeni su piccola scala come increspature del livello del mare ed evitando di addentrarsi in complesse formulazioni riguardanti flusso e concentrazione dei sedimenti. Uno dei vantaggi offerti dal modello è quello di riprodurre le principali caratteristiche morfologiche del profilo, in particolare ostacoli, barriere e berme pur trascurando la formazione di forme di fondo di scala dimensionale minore (ripples).

Il modello richiede, quali dati di input, la serie di altezze d'onda da simulare con i relativi periodi, l'andamento del profilo iniziale e la direzione delle onde incidenti. Per il calcolo del trasporto solido il modello necessita inoltre delle dimensioni del diametro D_{50} del fondale, dell'intervallo spaziale di integrazione e dell'intervallo temporale; tipici valori per la griglia di calcolo sono 2 m per l'intervallo spaziale e 5 minuti per l'intervallo temporale.

Vanno inoltre inseriti i valori delle costanti e dei coefficienti relativi alle formule di trasporto solido.

La principale applicazione è la valutazione di differenti tipologie di ripascimento oltre al comportamento senza alcuna opera di difesa della spiaggia, analizzando la risposta del litorale sottoposto a diverse condizioni di mareggiata in termini di durata ed intensità.

6.4. Suddivisione del profilo e formule di trasporto solido

In un profilo trasversale vengono definite varie zone aventi diverse relazioni di trasporto solido in relazione all'evoluzione delle onde incidenti; la ricerca nel campo delle onde della zona litoranea (nearshore) ha infatti evidenziato zone diverse in funzione delle diverse proprietà idrodinamiche collegate allo shoaling, alla riduzione dell'altezza dell'onda e all'intensità del moto dei sedimenti sia su piccola che su grande scala. Larson e Kraus sono arrivati a suddividere il profilo secondo lo schema della successiva figura.

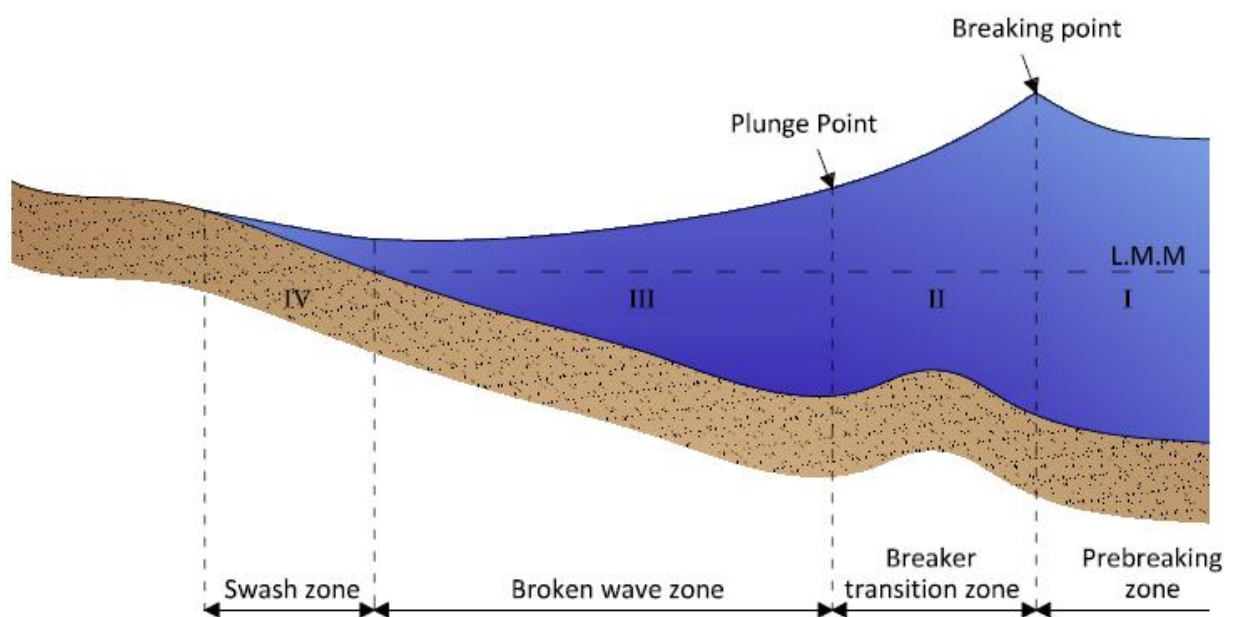


Figura 6.4 Definizione schema delle quattro principali zone di trasporto solido

La regione definita come prebreaking si estende dal largo fino al punto di primo frangimento. Di seguito verrà indicata come Zona I; in tale zona avviene lo shoaling, ossia l'aumento dell'altezza d'onda per effetto dell'interazione col fondo.

La Zona II corrisponde alla zona di transizione di frangimento, breaking zone, ed è posta tra il punto di incipiente frangimento e il punto di frangimento interamente sviluppato (plunge point).

La Zona III corrisponde al tratto compreso tra il plunge point e il punto in cui inizia la swash zone o in alternativa, qualora avvenga una riformazione dell'onda, al punto in cui avviene tale riformazione. In questa zona le onde sono considerate interamente frangenti e avviene una riduzione dell'altezza dell'onda per effetto della dissipazione di energia.

A differenza del modello di Kraus e Larson, qualora avvenga una riformazione dell'onda, si definisce una Zona V compresa tra il punto in cui per Dally Dean e Dalrymple l'altezza d'onda è inferiore all'altezza d'onda stabile e il successivo breaking point. L'andamento del trasporto solido in questa zona è considerato simile a quello della zona di prebreaking. Qualora vi siano più frangimenti vi sarà una sequenza di zone II, III, V, II, III ecc.

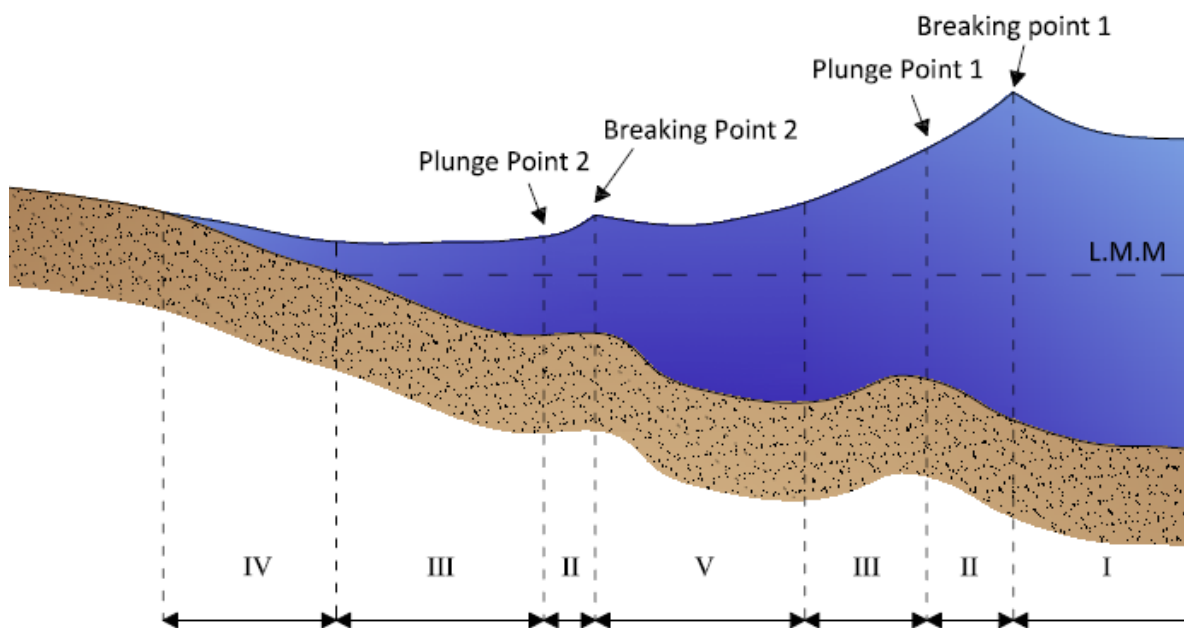


Figura 6.5 Schema di profilo con riformazione dell'onda

Le condizioni di trasporto nella swash zone differiscono da quelle delle zone descritte appartenenti alla surf zone, rendendo logico definire una quarta zona di trasporto, Zona IV. Il trasporto solido cross - shore nella swash zone dipende principalmente dalle proprietà del run up, della pendenza locale della spiaggia e dalle caratteristiche dei sedimenti. Si impone che il limite a terra del trasporto solido cross - shore sia costituito dal punto di massima risalita dell'onda.

Il trasporto solido verrà calcolato punto per punto nella zona III in funzione della dissipazione di energia; tramite i valori calcolati alle estremità di tale zona, mediante formule empiriche, verranno ricavati i valori di portata solida nelle altre zone.

Riassumendo, supponendo vi sia un solo frangimento, le quattro zone di trasporto sono schematizzate come segue:

- zona I: dalla profondità limite a mare ove si nota effettivamente una modificazione morfologica del profilo al primo punto di frangimento (prebreaking zone);
- zona II: dal punto di frangimento al plunge point (breaker transition zone);
- zona III: dal plunge point al punto di riformazione dell'onda o al limite lato mare della swash zone (broken wave zone)
- zona IV: dal limite lato mare della swash zone al punto di massima risalita dell'onda (swash zone).

Qualora vi siano più frangimenti e quindi sia possibile la riformazione dell'onda, si definisce anche una zona V, schematizzata come di seguito:

- zona V: dal plunge point al successivo breaking point.

6.4.1. Portata solida nella zona I

Nel determinare la relazione caratteristica della zona, Larson e Kraus hanno distinto il caso di profilo in erosione da quello di profilo in accrescimento.

Considerando per prima cosa i profili in erosione, hanno rilevato che l'andamento della distribuzione della portata solida è ben approssimata da una funzione esponenziale negativa, come si nota in figura. La portata viene calcolata a partire dal punto di breaking.

$$q = q_b e^{-\lambda(x-x_b)} \quad (6.4.1)$$

Dove q_b è la portata solida al punto di frangimento, λ è il coefficiente di decadimento spaziale e x_b è la posizione del punto di frangimento.

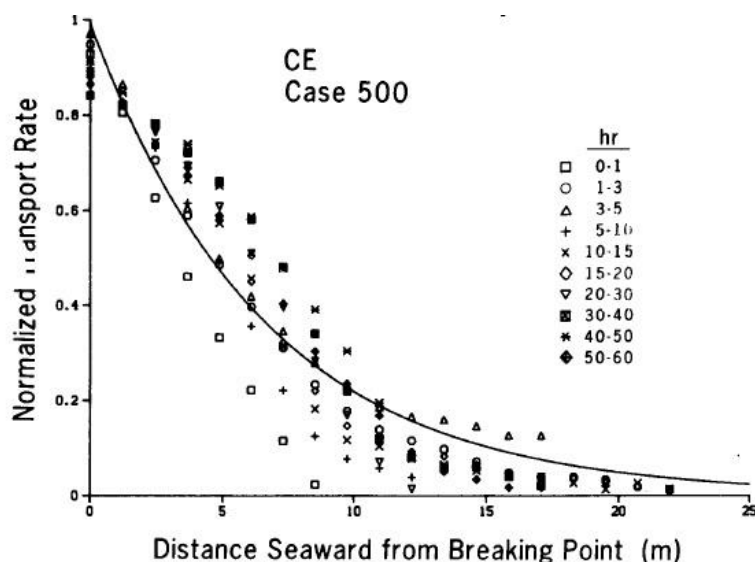


Figura 6.6 Andamento spaziale portata solida Zona I in fase di erosione

Il coefficiente di decadimento spaziale della portata λ è stato valutato nei test di Larson e Kraus pari a 0.18 m^{-1} , in generale è un valore compreso tra 0,1 e 0,5. In fase di erosione è stata evidenziata una correlazione tra il valore di λ , l'altezza dell'onda frangente H_b espressa in metri, ed il diametro del sedimento D espresso in mm e conseguentemente il valore non è costante.

$$\lambda_1 = 0.40 \left(\frac{D}{H_b} \right)^{0.47} \quad (6.4.2)$$

In fase di accrescimento è stata individuata ancora una relazione esponenziale negativa analoga all'equazione per la fase di erosione come evidenziato dalla figura successiva, tuttavia il valore di λ è in questo caso costante. Nel modello implementato, in via semplificativa, è stato adottato per la fase accrescitiva un coefficiente costante pari a 0,4.

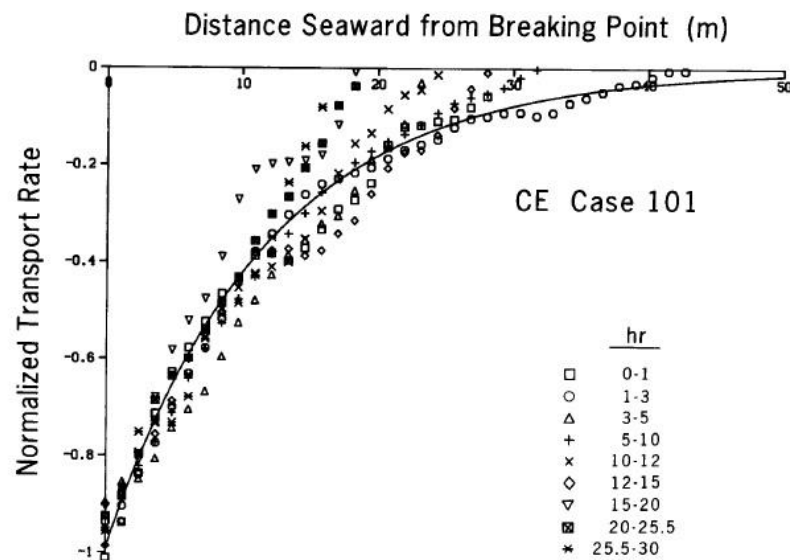


Figura 6.7 Andamento trasporto solido Zona I in accrescimento

6.4.2. Portata solida nella Zona II

Nella zona II l'onda si propaga dal punto di frangimento al punto in cui il collasso è terminato e la dissipazione di energia è massima. A causa della relativamente ridotta estensione del tratto e dello spostamento della zona dovuto alla migrazione delle barre di fondo è stato difficile ricavare una relazione sperimentale correlata alla zona. Analizzando i dati, Larson e Kraus hanno individuato un andamento esponenziale negativo della portata solida analoga alla relazione della zona I. Tale riduzione spaziale tuttavia si è rivelata di entità inferiore e conseguentemente il parametro λ è stato ridotto e posto pari al 20-25 %.

$$q = q_p e^{-\lambda(x-x_p)} \quad (6.4.3)$$

Dove q_p è la portata solida al punto di plunge, λ è il coefficiente di decadimento spaziale e x_p è la posizione del punto di plunge.

6.4.3. Portata solida nella Zona III

Le onde frangenti e frange generano turbolenze in grado di porre in sospensione i sedimenti e renderli quindi disponibili al trasporto cross - shore. L'espressione della portata solida, in questa zona, viene calcolata dunque in funzione della dissipazione di energia a partire dal punto di massima dissipazione, ossia il plunge point:

$$q = \begin{cases} K \left(D - D_{eq} + \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \right) & \text{se } D > D_{eq} - \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \\ 0 & \text{se } D \leq D_{eq} - \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \end{cases} \quad (6.4.4)$$

Dove q è la portata solida, K è il coefficiente di trasporto solido, D è la dissipazione di energia per unità di volume d'acqua, D_{eq} è la dissipazione di energia di equilibrio per unità di volume d'acqua, ε è il coefficiente di correlazione del trasporto con la pendenza della spiaggia e h è la profondità del livello indisturbato. L'equazione di trasporto indica che quando D diviene minore di D_{eq} non vi è trasporto solido; i motivi della presenza di questa soglia sono essenzialmente due:

- prevenire l'eventuale cambio di segno della portata con conseguente cambio di segno nella direzione del trasporto;
- riprodurre il caso di una barra sufficientemente sviluppata che faccia in modo che l'onda franga ma al tempo stesso il livello dell'acqua sia tale per cui a lato riva della barra il valore di D sia minore di D_{eq} pur non avendo riformazione dell'onda. In tal caso la portata diviene nulla.

Fisicamente la dissipazione di energia all'equilibrio rappresenta uno stato in cui il trasporto netto mediato nel tempo è nullo lungo tutto il profilo; il valore di D_{eq} può essere espresso in funzione del parametro A di Dean di un profilo di equilibrio nel seguente modo:

$$D_{eq} = \frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma^2 A^{\frac{3}{2}} \quad (6.4.5)$$

Dove γ rappresenta l'indice di frangimento nel punto di frangimento.

6.4.4. Portata solida nella zona IV

La portata solida nella zona IV è considerata funzione della pendenza locale della spiaggia, delle caratteristiche dei sedimenti e delle proprietà dell'onda che risale lungo il profilo. La regione si estende approssimativamente tra il punto di massima risalita dell'onda e una profondità corrispondente alla massima profondità di arretramento delle onde nella zona di swash.

Larson e Kraus hanno evidenziato che il trasporto solido in questa zona ha un andamento sostanzialmente lineare, con un valore massimo nella posizione limite lato mare e nullo nel punto di run - up. Una riduzione lineare della portata solida implica che il volume di sedimenti eroso per ogni punto della battigia sia costante.

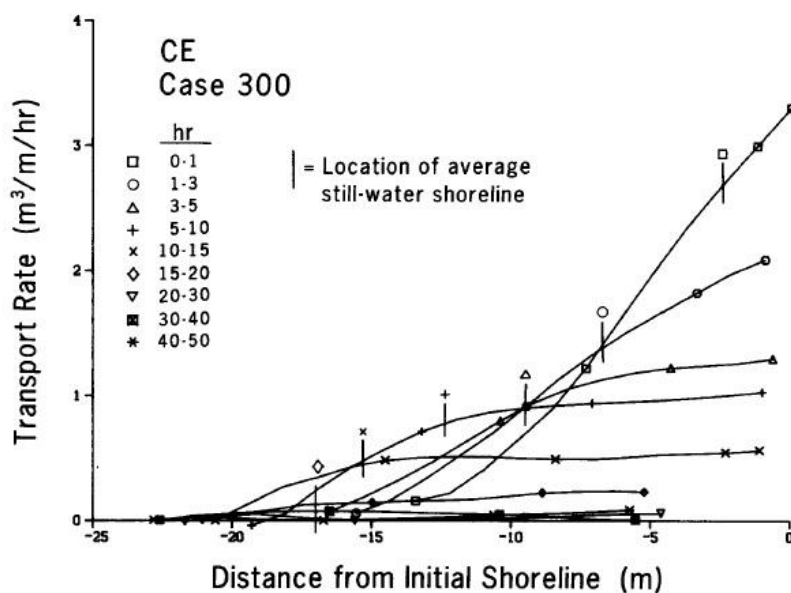


Figura 6.8 Andamento portata solida zona IV

$$q = q_z \left(\frac{x - x_r}{x_z - x_r} \right) \quad x_r < x < x_z \quad (6.4.6)$$

Dove q è la portata solida, q_z è la portata solida nel limite offshore della zona IV, x_r è la posizione del punto di massima risalita e x_z è la posizione del limite offshore della zona IV.

6.4.5. Portata solida nella zona V

Se l'andamento del litorale lo consente dopo il frangimento può verificarsi la riformazione dell'onda. L'onda riformata si propagherà in modo oscillatorio verso riva subendo nuovamente il fenomeno dello shoaling e arrivando a un nuovo frangimento, causando la formazione di una nuova barra sul fondo. I dati sperimentali a disposizione di Larson e Kraus portarono a dedurre che la formazione di una seconda barra inshore rispetto al frangimento più esterno è una posizione di minimo locale del trasporto solido, con andamento decrescente sia rispetto alle posizioni onshore più prossime sia alle posizioni immediatamente offshore. Nel modello viene ipotizzato che tale andamento sia esprimibile mediante una funzione di potenza e una funzione esponenziale: la prima utilizzata per esprimere la portata tra la posizione di minimo e il punto di riformazione dell'onda, la seconda per il tratto compreso tra il minimo e il frangimento successivo.

E' ragionevole assumere che la portata solida nella zona di riformazione dell'onda dipenda dalle portate della zona III lato mare e della zona II lato spiaggia:

$$q = q_r e^{-v(x_r - x)} \quad x_m \leq x < x_r \quad (6.4.7)$$

$$q = q_b + (q_m - q_b) \left(\frac{x - x_b}{x_m - x_b} \right)^n \quad x_b < x < x_m \quad (6.4.8)$$

Dove q è la portata solida, q_m è la portata solida nella posizione di minimo, q_b è la dissipazione portata solida nel punto di frangimento, x_m è la posizione di minimo della portata solida nella zona di riformazione, x_b è la posizione di frangimento, q_r è la portata solida nel punto di riformazione dell'onda, n è l'esponente di riduzione spaziale del trasporto solido ($= 0,5$) e ν è il coefficiente di riduzione spaziale del trasporto solido ($= 0,1$).

Per quanto concerne la direzione della portata solida, sulla base di quanto ottenuto da Larson e Kraus, è stato deciso di considerare la portata solida diretta in modo unidirezionale sull'intero profilo trasversale, cambiando eventualmente direzione ad ogni passo temporale, permettendo in tal modo di semplificare notevolmente la discretizzazione dell'equazione di continuità di massa senza commettere un errore considerevole; infatti, qualora il profilo sia lontano dalla condizione di equilibrio, è ragionevole assumere l'unidirezionalità del trasporto in prima approssimazione.

6.5. Calcolo numerico della variazione del profilo

La variazione del profilo è calcolata mediante l'equazione di conservazione della massa utilizzando le portate solide determinate secondo quanto riportato nei paragrafi precedenti. Si ipotizza non vi siano né apporti di materiale solido né estrazioni e quindi l'equazione diviene:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad (6.5.1)$$

Dove h è la profondità del fondale, orientata positivamente verso il basso, t è il tempo e q è la portata solida. Per quanto riguarda le condizioni al contorno si impone che non vi sia

trasporto solido oltre il limite di risalita dell'onda e nel punto più al largo della griglia di calcolo.

Una volta nota la suddivisione del litorale in varie zone di trasporto solido e quindi determinata la distribuzione della portata, viene calcolata la variazione del profilo mediante l'equazione di continuità di massa discretizzata.

- In caso di direzione di trasporto offshore:

$$h_i^{k+1} = h_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{i+1}^k - q_i^k) \quad (6.5.2)$$

- In caso di direzione di trasporto onshore:

$$h_i^{k+1} = h_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_i^k - q_{i+1}^k) \quad (6.5.3)$$

avendo indicato con i la posizione spaziale e con k l'istante temporale, Δt è il passo temporale di integrazione espresso in secondi, Δx il passo spaziale, espresso in metri.

Dal momento che il calcolo della distribuzione delle portate solide lungo il profilo è effettuata mediante relazioni piuttosto diverse tra una zona e un'altra, la sua variazione spaziale potrebbe risultare piuttosto discontinua alle estremità di ciascuna zona. Per ottenere un andamento del trasporto più realistico, si è deciso di applicare un "filtro a tre punti" lungo l'intero profilo secondo la seguente equazione:

$$q_i' = 0,25q_{i-1} + 0,50q_i + 0,25q_{i+1} \quad (6.5.4)$$

Dove q_i' definisce la portata mediata nell' i -esima cella. Il passo temporale di integrazione tipicamente varia tra i 5 ed i 20 minuti mentre il passo spaziale è in genere

compreso tra 1 e 5 metri. Generalmente a un passo spaziale minore corrisponde un passo temporale anch'esso ridotto; non è stata proposta una relazione diretta tra i due termini a causa della non linearità di molte equazioni utilizzate.

Nei loro studi su LWT per la formulazione del modello, Larson e Kraus si accorsero che localmente la pendenza della spiaggia, sotto l'azione di onde regolari di altezza costante, poteva superare il valore massimo dell'angolo d'attrito. In base a queste osservazioni si è deciso di introdurre nel modello il concetto di "avalanching", già discusso da Allen (1970), implementando una routine che considera il trasporto indotto da tale fenomeno.

Allen si accorse dell'esistenza di due pendenze limite lungo il profilo: l'angolo di crollo iniziale, angle of initial yield (angolo d'attrito secondo la definizione di Shields) e l'angolo residuo dopo il crollo, residual angle. Se la pendenza locale supera l'angolo di crollo iniziale, ψ_{iy} , il materiale viene ridistribuito lungo il fondale fino a raggiungere una nuova pendenza più stabile, nota appunto come angolo residuo e indicata con ψ_{ra} . Dal punto di vista computazionale tale controllo viene effettuato ad ogni passo temporale per ogni cella di calcolo e se ψ_{iy} viene superato inizia il processo di avalanching. La procedura descritta di seguito vale per una direzione, ma nel modello implementato in Matlab tale controllo viene poi ripetuto nella direzione opposta.

Le due condizioni che controllano la ridistribuzione del materiale lungo il profilo sono la conservazione della massa e l'angolo residuo dopo l'avalanching. In figura è rappresentato lo schema di riferimento; le quote prima dell'avalanching sono indicate con h mentre dopo il processo di avalanching con h' .

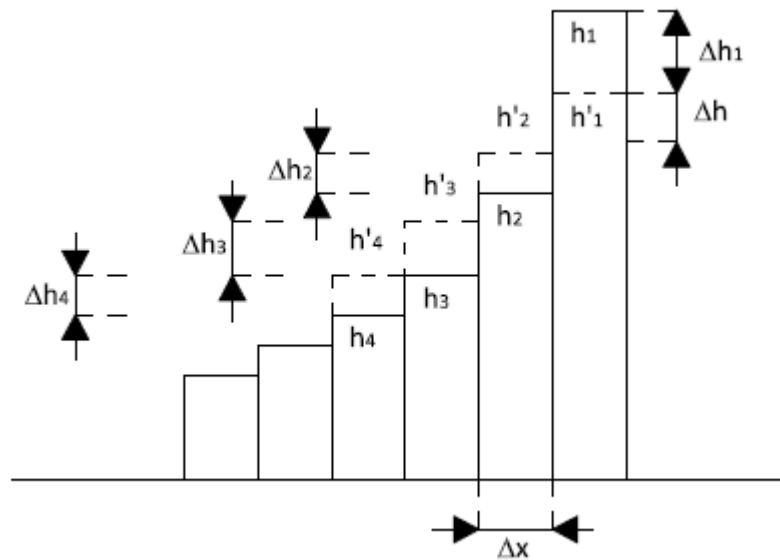


Figura 6.9 Schema processo di Avalanching

Il numero di celle N su cui il processo si manifesta non è noto a priori e va quindi determinato in modo iterativo; per il caso generico in cui sono interessate dall'avalanching N celle di calcolo, l'equazione di conservazione della massa è scritta come indicato di seguito:

$$\sum_{i=1}^N \Delta h_i = \sum_{i=1}^N h'_i - h_i = 0 \quad (6.5.5)$$

Si precisa che il pedice "i" inizia dalla cella in cui il processo si innesca e si incrementa nella direzione della redistribuzione del materiale; inoltre la variazione della quota del fondale va presa con il proprio segno. L'altro criterio adottato, come già accennato, è che dopo il processo dell'avalanching la pendenza tra le celle interessate dal fenomeno sia pari a ψ_{ra} . Se la lunghezza del passo spaziale è indicata con Δx , la pendenza residua dopo il crollo è espressa come:

$$\psi_{ra} = \frac{h_i - h_{i+1}}{\Delta x} \quad (6.5.6)$$

Dal momento che ψ_{ra} e Δx sono costanti, la differenza tra due celle attigue dopo il crollo sarà una costante pari a:

$$\Delta h = \psi_{ra} \Delta x \quad (6.5.7)$$

Il requisito che la differenza di profondità tra celle attigue sia costante, può essere applicato alle N-1 coppie di celle interessate dall'avalanching:

$$\begin{aligned} \Delta h &= (h_1 + \Delta h_1) - (h_2 + \Delta h_2) \\ \Delta h &= (h_i + \Delta h_i) - (h_{i+1} + \Delta h_{i+1}) \\ \Delta h &= (h_{N-1} + \Delta h_{N-1}) - (h_N + \Delta h_N) \end{aligned} \quad (6.5.8)$$

Tale sistema di equazioni può essere riscritto, applicando una combinazione lineare, nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \Delta h &= (h_1 + \Delta h_1) - (h_2 + \Delta h_2) \\ i\Delta h &= (h_1 + \Delta h_1) - (h_{i+1} + \Delta h_{i+1}) \\ (N-1)\Delta h &= (h_1 + \Delta h_1) - (h_N + \Delta h_N) \end{aligned} \quad (6.5.9)$$

Dalle precedenti relazioni la grandezza incognita Δh_i può essere espressa in modo esplicito:

$$\begin{aligned}
\Delta h_2 &= (h_1 + \Delta h_1) - h_2 - \Delta h \\
\Delta h_3 &= (h_1 + \Delta h_1) - h_3 - 2\Delta h \\
\Delta h_{i+1} &= (h_1 + \Delta h_1) - h_{i+1} - i\Delta h \\
\Delta h_N &= (h_1 + \Delta h_1) - h_N - (N - 1)\Delta h
\end{aligned} \tag{6.5.10}$$

Dalle quali è possibile calcolare tutte le variazioni del fondale una volta noto il cambiamento nella prima cella di calcolo. Per calcolare la variazione nella prima cella viene applicata la conservazione della massa; la somma di tutte le variazioni deve essere pari a zero:

$$\sum_{i=1}^N \Delta h_i = \Delta h_1 + \sum_{i=2}^N \Delta h_i = 0 \tag{6.5.11}$$

Operando le dovute sostituzioni è possibile scrivere:

$$\Delta h_1 + \sum_{i=2}^N (\Delta h_1 + h_1) - \sum_{i=2}^N (h_i) - \sum_{i=2}^N \Delta h = 0 \tag{6.5.12}$$

E' dunque possibile ricavare in modo esplicito la variazione di profondità per la cella 1:

$$\Delta h_1 = -\frac{N-1}{N}h_1 + \frac{1}{N}\sum_{i=2}^N h_i + \frac{1}{2}(N-1)\Delta h \tag{6.5.13}$$

Le variazioni di fondale per effetto dell'avalanching dalla cella 2 alla N sono calcolate tramite:

$$\Delta h_i = (h_1 + \Delta h_1) - h_i - (i - 1)\Delta h \quad (6.5.14)$$

Riassumendo la procedura prevede l'applicazione iterativa delle condizioni espresse dalla Eq. (6.5.13) e (6.5.14), andando di volta in volta all'aumentare di N a verificare che tra l'N-esima cella e la N+1-esima la pendenza massima sia inferiore od al più pari a ψ_{iy} .

6.6. Struttura del modello implementato

La struttura del modello consiste sostanzialmente in tre moduli di calcolo, ripetuti ciclicamente fino al tempo limite stabilito:

- Modulo di calcolo della trasformazione dell'onda;
- Modulo di calcolo del trasporto solido cross - shore;
- Modulo per il calcolo della variazione del profilo.

Il primo modulo valuta la trasformazione dell'onda dalla prima cella di calcolo a lato mare alla fine della surf zone, imposta nella posizione in cui la profondità del fondale è pari a 0,5 m; il secondo modulo, in base alle grandezze valutate dal modulo precedente determina le portate solide, infine il terzo modulo determina la variazione del fondale dh sulla base dell'equazione di continuità della massa e successivamente calcola il nuovo fondale. Il ciclo viene quindi ripetuto per la durata prevista per la simulazione.

Il primo modulo di calcolo è il simile a quello usato nella trattazione del trasporto solido lungo riva, in questo caso, per poter confrontare i risultati con quelli ottenuti da un modello commerciale, si è deciso di rappresentare lo stato di mare reale tramite una randomizzazione dell'onda di input con una prefissata variabilità attorno al valore medio. Nota quindi la propagazione dell'onda da largo a riva vengono calcolate alcune posizioni

necessarie per i passi successivi: i punti di frangimento (breaking point, bp), di massima dissipazione (plunging point, pp) e di eventuale riformazione dell'onda (reformation point, rp). Il secondo modulo suddivide quindi il profilo nelle diverse zone, secondo quanto previsto da SBEACH e quindi, in funzione di queste e della dissipazione calcolata punto per punto, determina la portata solida q . Il modulo successivo determina la variazione dh del profilo applicando la conservazione della massa e aggiornandone l'andamento. Si procede infine implementando la procedura di avalanching.

6.7. Conclusioni

Come nel caso del modello per il calcolo del trasporto solido longitudinale, l'implementazione del presente modello permette di conoscere i parametri in esame consentendo di stimarli in base alle esigenze del caso. Il modello per il trasporto solido cross – shore è in grado di valutare l'effetto di una singola mareggiata ed in generale l'azione del moto ondoso a breve termine e di stimare il modellamento del profilo della spiaggia.

7. VALIDAZIONE DEI MODELLI DI TRASPORTO

I diversi modelli fino ad ora illustrati presentano diversi parametri che ne influenzano il funzionamento; risulta dunque importante valutarne la risposta in relazione a quanto riportato nella parte teorica. Tale procedimento permette inoltre di calibrare alcuni di questi parametri per ottenere dei risultati il più possibile corretti.

7.1. Introduzione

Nel presente capitolo si valuteranno le risposte dei diversi modelli implementati in relazione a quanto si è riportato nella parte teorica. Nella prima parte si osserveranno i risultati del modello per il calcolo della velocità in direzione parallela alla riva; nella seconda parte, per quanto riguarda il trasporto solido lungo riva, si confronteranno i risultati ottenuti con le due differenti formulazioni citate nei precedenti paragrafi, ovvero la relazione di Eco W. Bijker e la relazione proposta dal CERC; infine nella terza parte si stimerà il trasporto solido perpendicolare alla costa osservando il modellamento su un profilo reale e verificando se il modello è in grado di riprodurre i profili di tipo invernale ed estivo.

7.2. Validazione del modello per il calcolo della velocità long – shore

Si mostrano ora gli andamenti delle velocità ottenuti con la formula teorica e con il modello numerico basato sul metodo degli elementi finiti. Per tale validazione del modello è stato utilizzato un profilo lineare di pendenza 1 : 25, per quanto riguarda le caratteristiche dell'onda si è considerata un'altezza al largo pari a $H_{s0} = 1,5$ m, periodo $T = 6$ s e direzione rispetto alla linea di riva pari a $\theta = 20^\circ$.

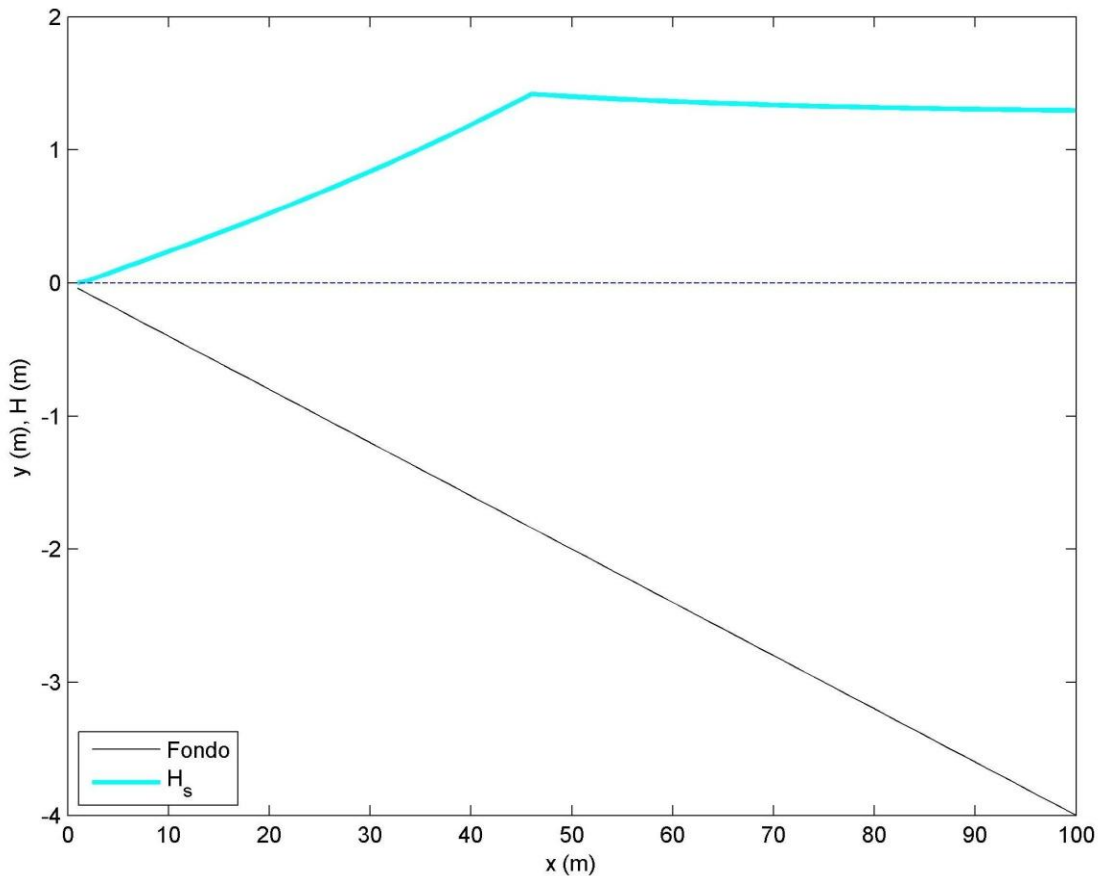


Figura 7.1 Andamento altezza d'onda e fondale

Si riportano quindi le velocità, adimensionalizzate rispetto alla velocità nel punto di frangimento, al variare del coefficiente C che rappresenta il termine turbolento. Si osserva che la velocità all'aumentare di tale coefficiente diminuisce il suo massimo.

La velocità teorica calcolata con l'equazione (4.5.7) ha un andamento di tipo triangolare che coincide con l'andamento della velocità calcolato con il metodo degli elementi finiti ponendo $C = 0$.

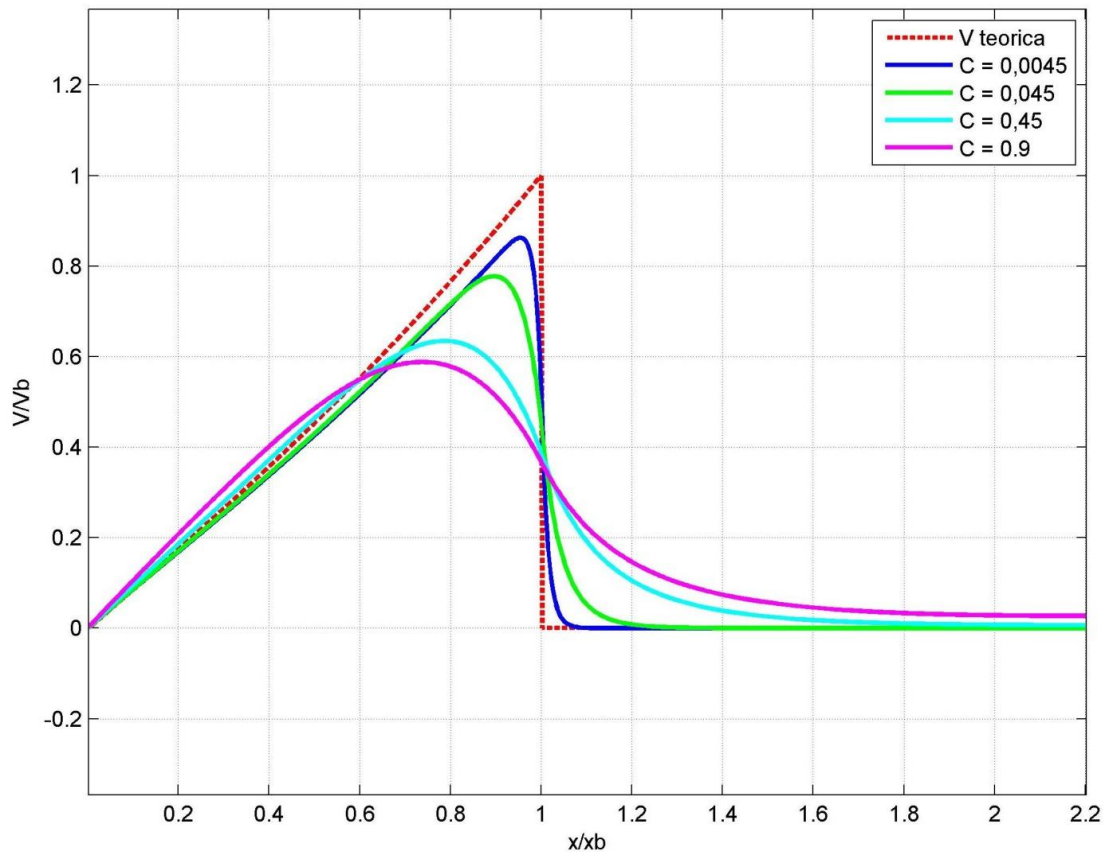


Figura 7.2 Andamento della velocità lungo riva

Si può inoltre osservare che il grafico sopra riportato rispecchia l'andamento delle velocità proposto da Longuet – Higgins al variare del parametro P (figura 4.4). I due grafici non sono direttamente confrontabili poiché è stato utilizzato un modello di decadimento dell'onda frangente più accurato rispetto a quello usato da Longuet – Higgins.

7.3. Validazione del modello di trasporto lungo riva

Nel presente paragrafo si esegue un confronto tra i risultati delle portate ottenuti con la formula proposta da Bijker e quella proposta dal CERC. Si utilizza un profilo lineare con pendenza 1:30, Per quanto riguarda le caratteristiche dell'onda si è considerata un'altezza

al largo pari a $H_{s0} = 2,5$ m, periodo $T = 8$ s e direzione rispetto alla linea di riva pari a $\theta = 20^\circ$. Nella formula di Bijker si è imposto che il coefficiente A dell'equazione (5.5.2) sia pari a 5 nel caso di onde frangenti e uguale ad 1 nel caso di onde non frangenti come indicato in letteratura; si è utilizzato inoltre un coefficiente di turbolenza pari a $C = 0,3$. La scabrezza considerata è pari a 2 cm mentre la granulometria della spiaggia è stata assunta pari a:

	DIAMETRI [mm]	
	D_{50}	D_{90}
$0 < x < x_{\text{Chiusura}}$	0,20	0,60
$x_{\text{Chiusura}} < x < x_{\text{Largo}}$	0,15	0,45

Di seguito vengono riportate la distribuzione in direzione cross – shore del trasporto longitudinale lungo il fondale calcolata con la formula di Bijker.

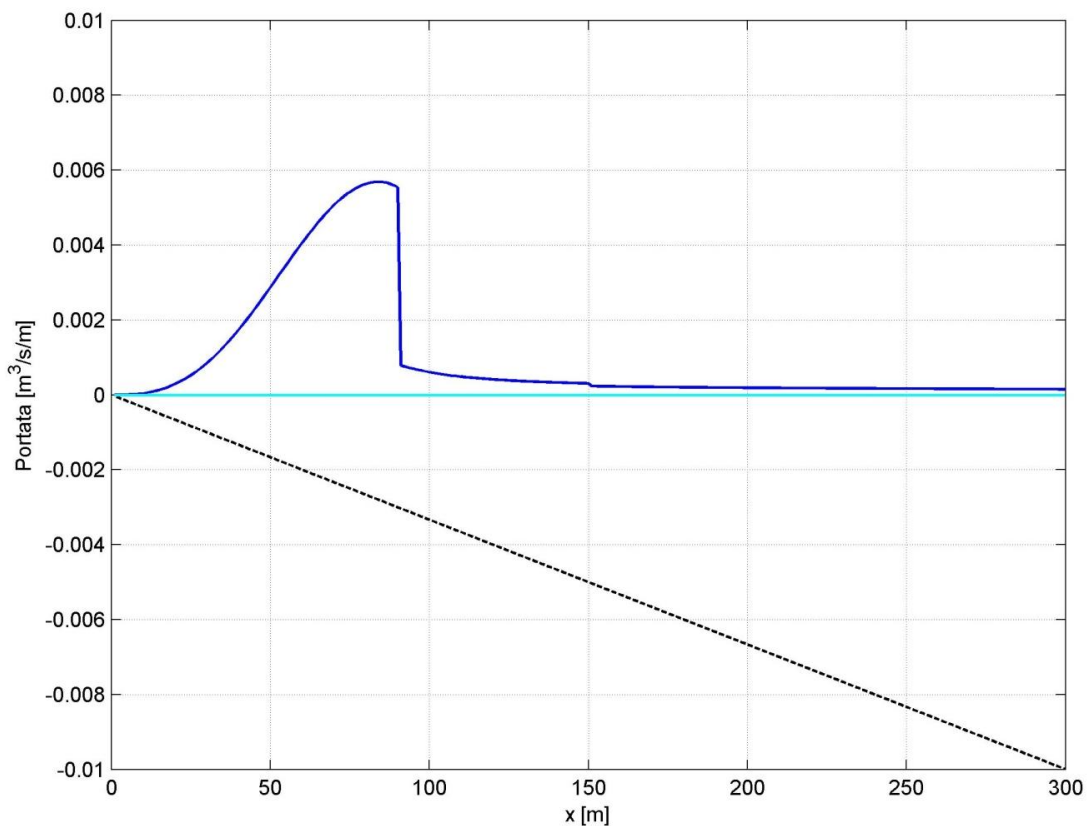


Figura 7.3 Distribuzione del Trasporto calcolato con la formula di Bijker

Poiché la formula del CERC non fornisce informazioni sulla distribuzione da largo a riva della portata solida ma ne stima solo il valore complessivo, il confronto tra le due formule va effettuato stimando, anche per la formula di Bijker, l'apporto totale. La formula di Bijker calcola una portata di $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$, la formula del CERC stima un trasporto di $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$. E' possibile constatare che la formula del CERC, che considera la portata in funzione dell'energia potenziale posseduta dall'onda, sovrastima il trasporto rispetto alla formula di Bijker; quest'ultima tuttavia possiede la peculiarità di valutare la distribuzione in direzione trasversale del trasporto.

7.4. Validazione del modello di trasporto perpendicolare a riva

Nel presente paragrafo si eseguirà una validazione del modello di trasporto solido ortogonale a riva per poterlo in seguito utilizzare nella valutazione della variazione del profilo di una spiaggia. Nella prima parte si confronterà la soluzione ottenuta dal modello implementato in Matlab con i risultati del modello SBEACH di Larson e Kraus. In seguito si valuterà la capacità del modello di riprodurre un profilo di tipo estivo (accrescimento) e un profilo di tipo invernale (erosione) in presenza di differenti condizioni iniziali.

7.4.1. Mareggiata su profilo reale

Si procede, su un profilo di spiaggia reale, simulando una mareggiata con condizioni variabili attorno a un valore di H_s prefissato; vengono imposte le seguenti caratteristiche per l'onda, il litorale e la griglia di calcolo:

VALIDAZIONE		
D ₅₀	mm	0,13
H _s	m	2,8
T	s	7,9
Alfa	°	0
Marea	m	0
Durata Mareggiata	ore	8
dt	minuti	5
dX	m	2
Angolo limite di crollo	°	25
Variabilità onde		20%
K	m ⁴ /N	1,75*10 ⁻⁶
ε	m ² /s	0,002
λ	m ⁻¹	0,5

Per quanto riguarda l'indice di frangimento è stato utilizzato il criterio di Larson e Kraus. Si riporta di seguito l'evoluzione dell'onda dal punto più al largo del profilo fino a riva in 3 istanti della simulazione e il loro relativo set – up; come previsto si ha un effetto di set – down in prossimità del frangimento mentre un innalzamento del livello medio a valle della rottura dell'onda.

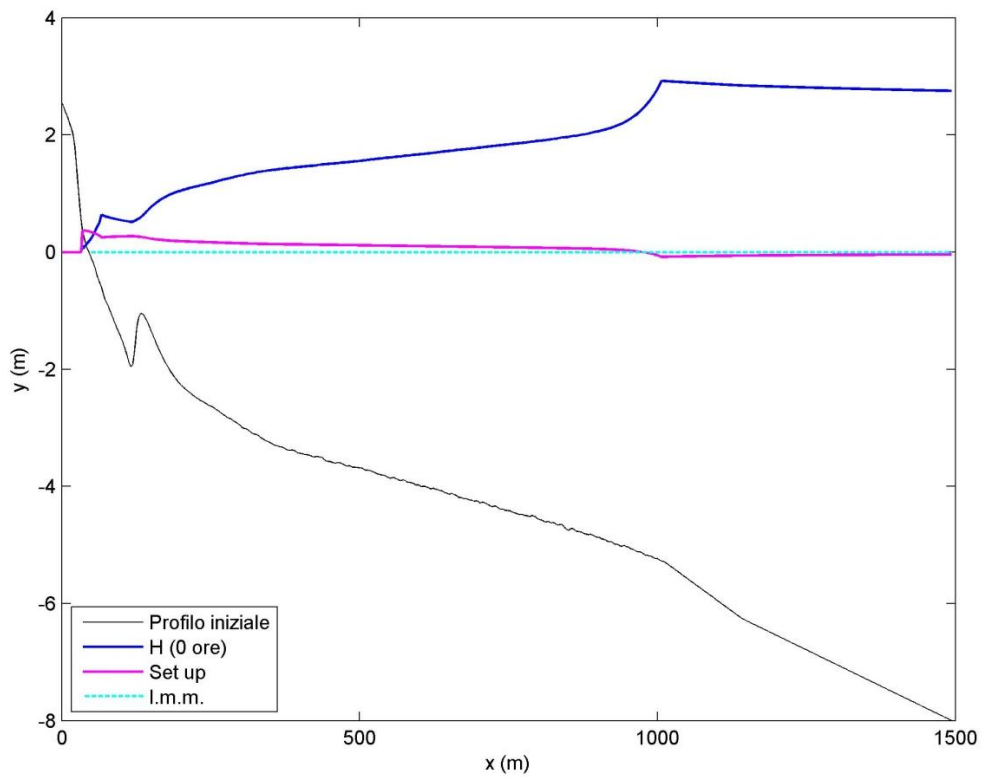


Figura 7.4 Andamento altezza d'onda (0 ore)

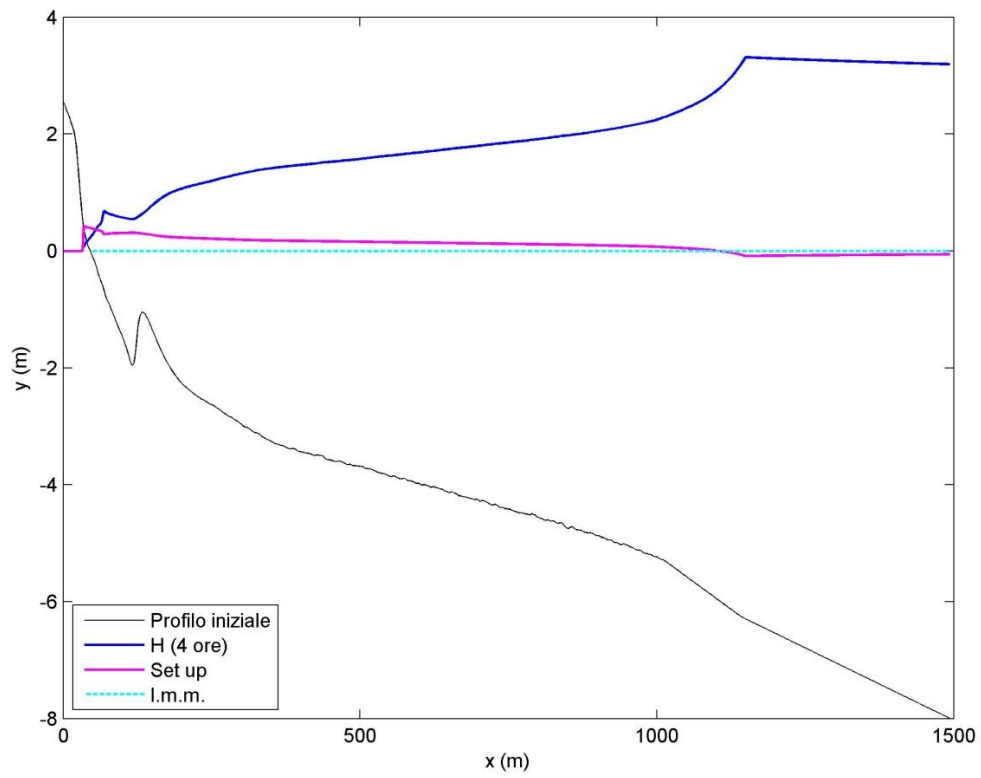


Figura 7.5 Andamento altezza d'onda (4 ore)

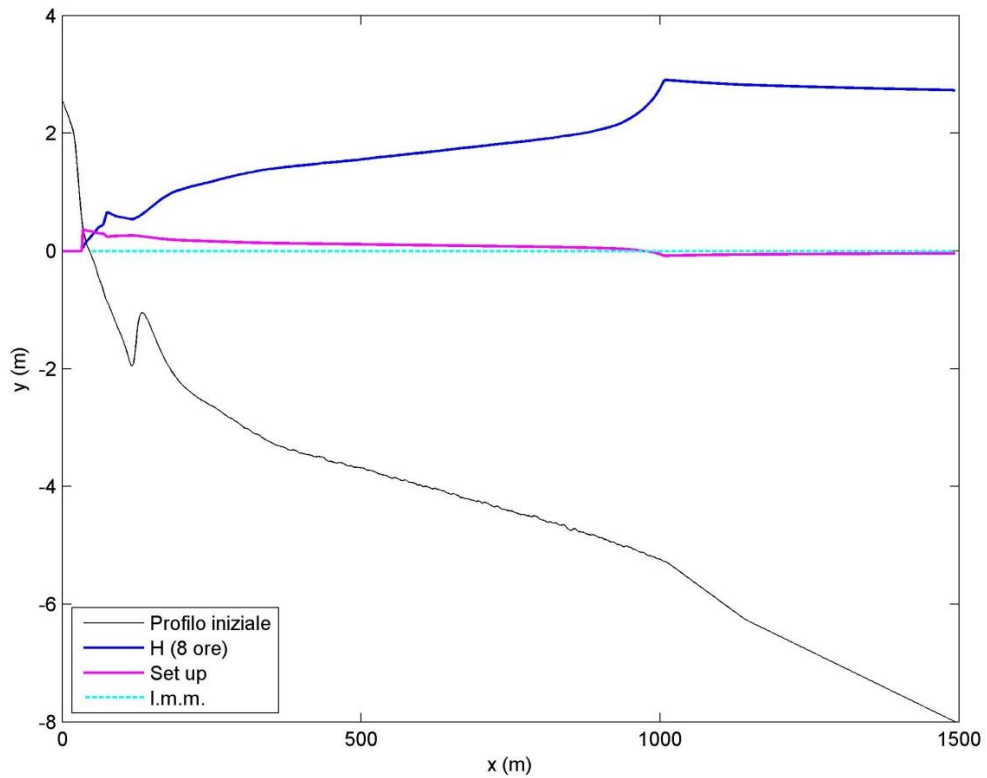
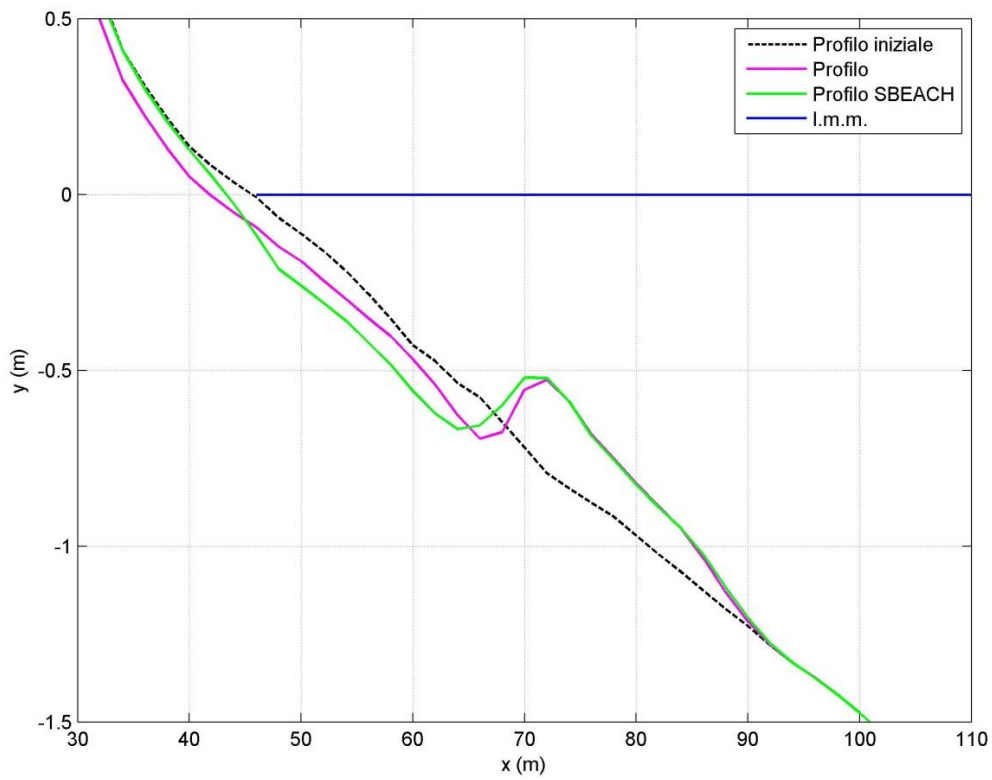
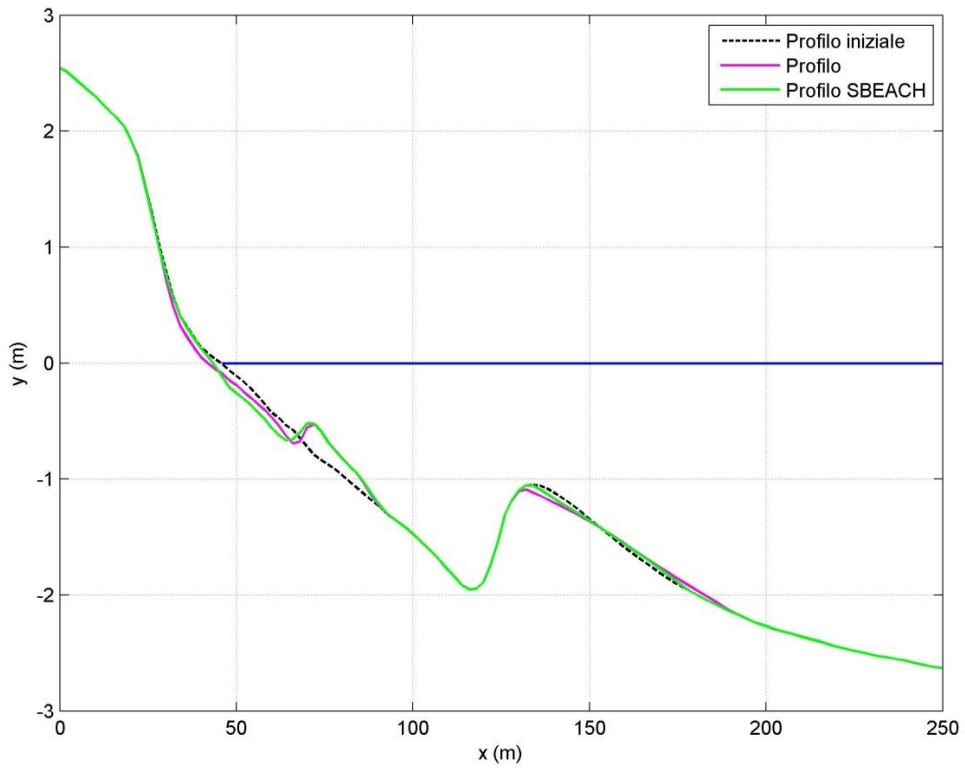


Figura 7.6 Andamento altezza d'onda (8 ore)

Di seguito si mostrano le variazioni del profilo al variare della dissipazione d'equilibrio: si riporta il profilo ottenuto dopo una simulazione di mareggiata di 8 ore confrontato con il fondale ottenuto dal modello SBEACH di Larson e Kraus; verranno presentate solo porzioni di profilo poiché la scala è fortemente distorta.

- $D_{eq} = 44,27 \text{ Nm/m}^3\text{s}$, $\gamma = 0,78$:



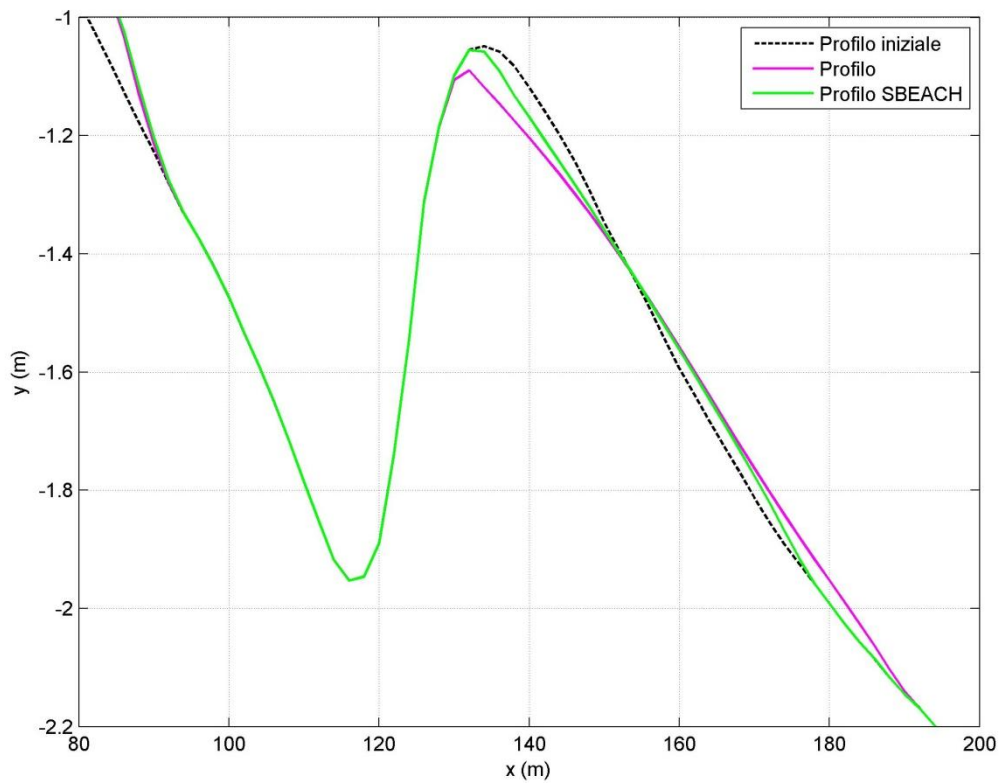
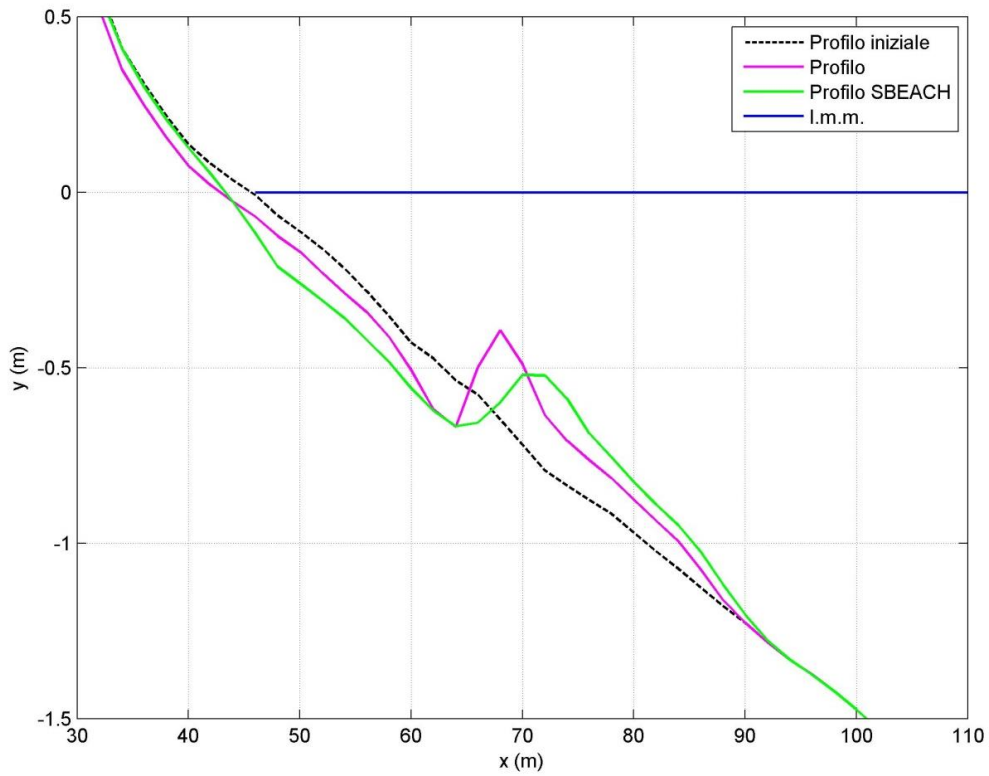
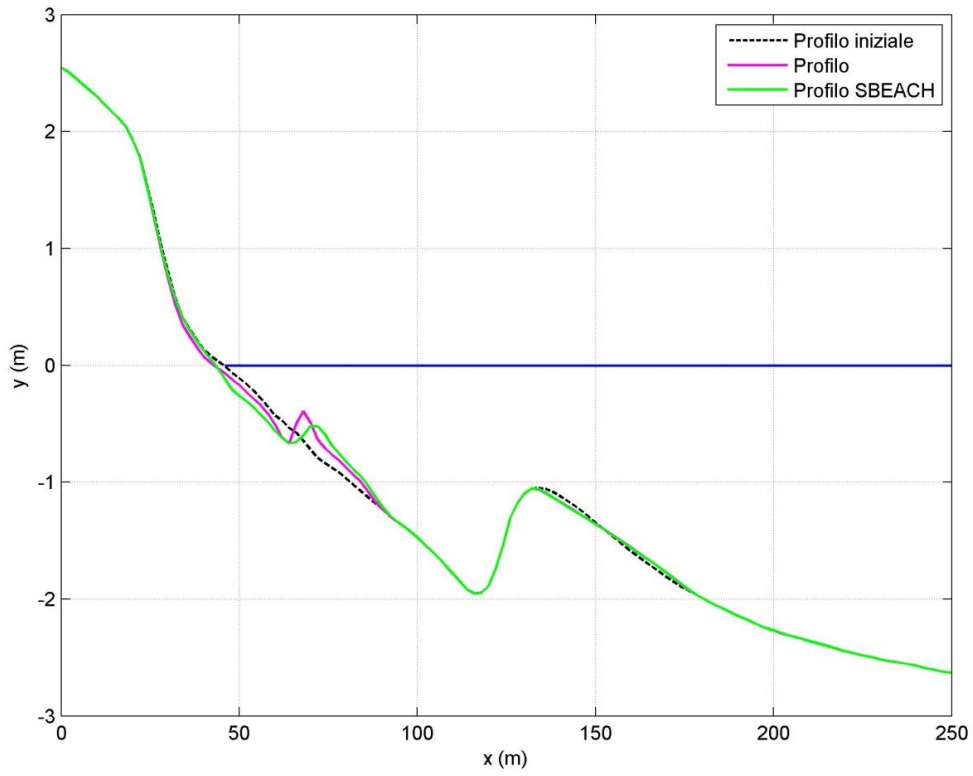


Figura 7.7 Andamento profilo $\gamma = 0,78$

In generale si osserva che l'azione erosiva tende a formare una seconda barra, posizionata tra la barra iniziale del profilo (130 m) e la linea di riva. Tale barra presenta forma, dimensioni e posizione analoghe a quelle calcolate dal modello SBEACH; tuttavia si osserva che il modello implementato riproduce un'azione erosiva maggiore sia nell'arretramento della linea di riva che nel rimodellamento della barra del profilo.

- $D_{eq} = 58,93 \text{ Nm/m}^3\text{s}$, $\gamma = 0,9$:



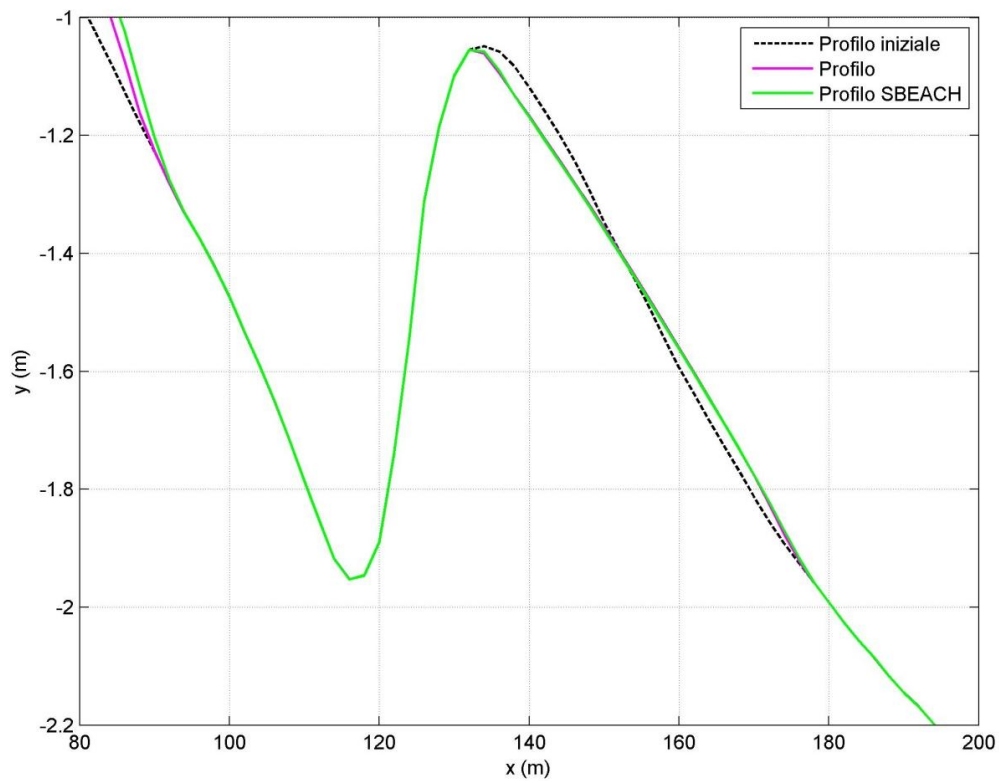
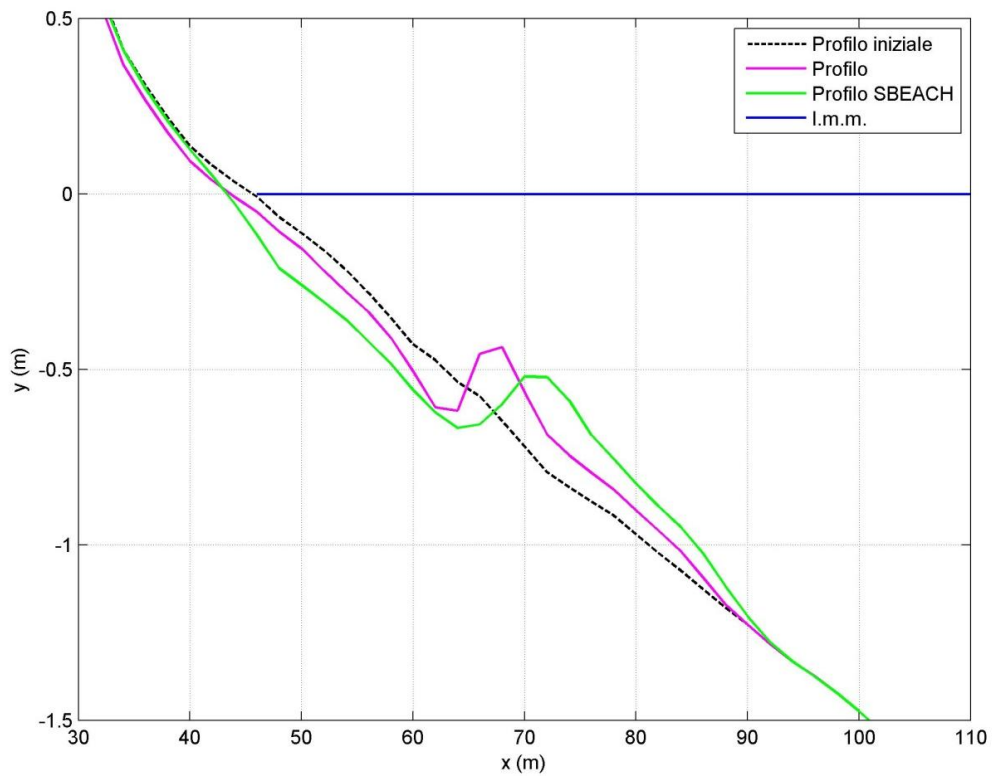
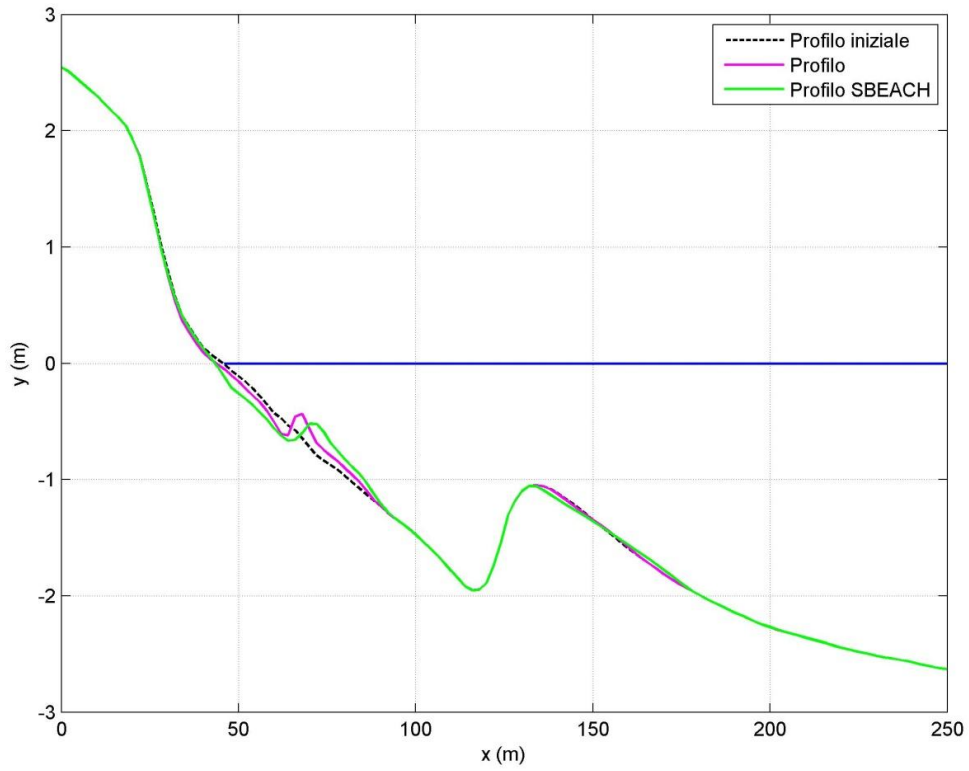


Figura 7.8 Andamento profilo $\gamma = 0,9$

In generale si osserva che l'azione erosiva tende a formare una seconda barra, posizionata tra la barra iniziale del profilo (130 m) e la linea di riva. Tale barra si presenta leggermente più a riva di quella calcolata dal modello SBEACH e la sua forma risulta essere meno smussata. Tuttavia si osserva che il modello implementato, utilizzando $\gamma = 0,9$, riproduce perfettamente il rimodellamento della barra già esistente nel profilo.

- $D_{eq} = 72,76 \text{ Nm/m}^3\text{s}$, $\gamma = 1$:



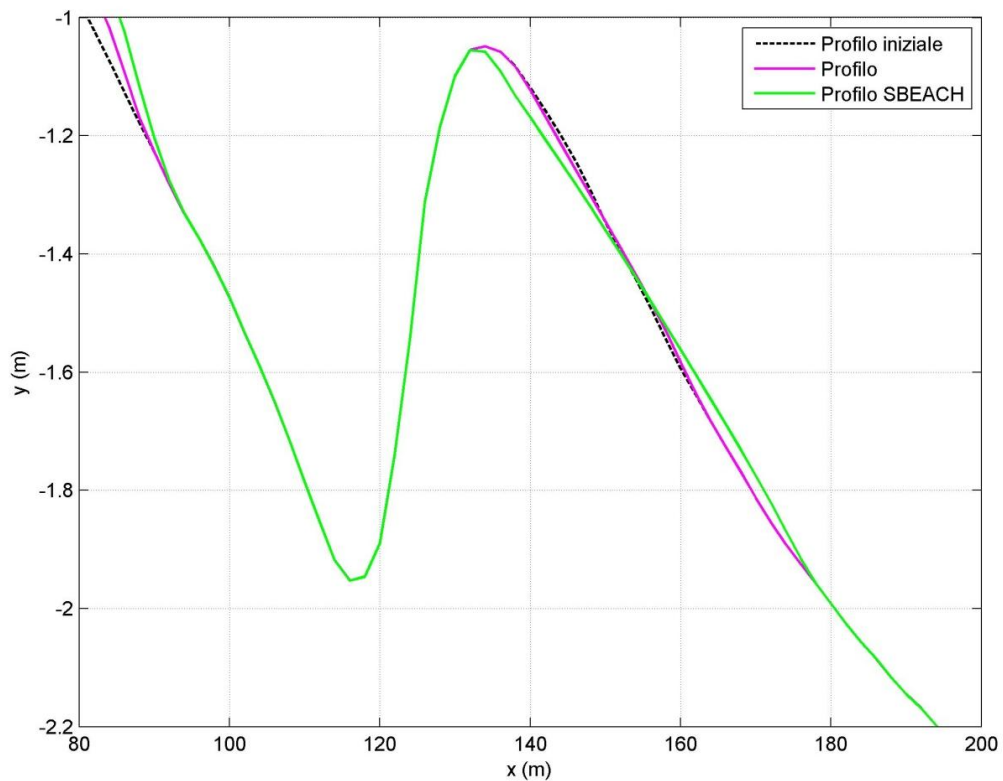


Figura 7.9 Andamento profilo $\gamma = 1$

In questo caso la barra che si forma tra la linea di riva e la barra già presente nel profilo si presenta più a riva rispetto ai casi precedenti e a quella calcolata dal modello SBEACH; inoltre anche il rimodellamento della barra posizionata a 140 m risulta essere molto diverso. Tuttavia si osserva che il modello implementato stima un arretramento da riva simile a quello valutato dal modello SBEACH, ovvero di circa 2 m.

In conclusione, si può affermare che la dissipazione d'equilibrio influenza molto la soluzione finale, come accade anche per altri parametri; si potrebbe dedurre che il valore di γ , utile a stimare tale dissipazione, dovrebbe variare punto per punto.

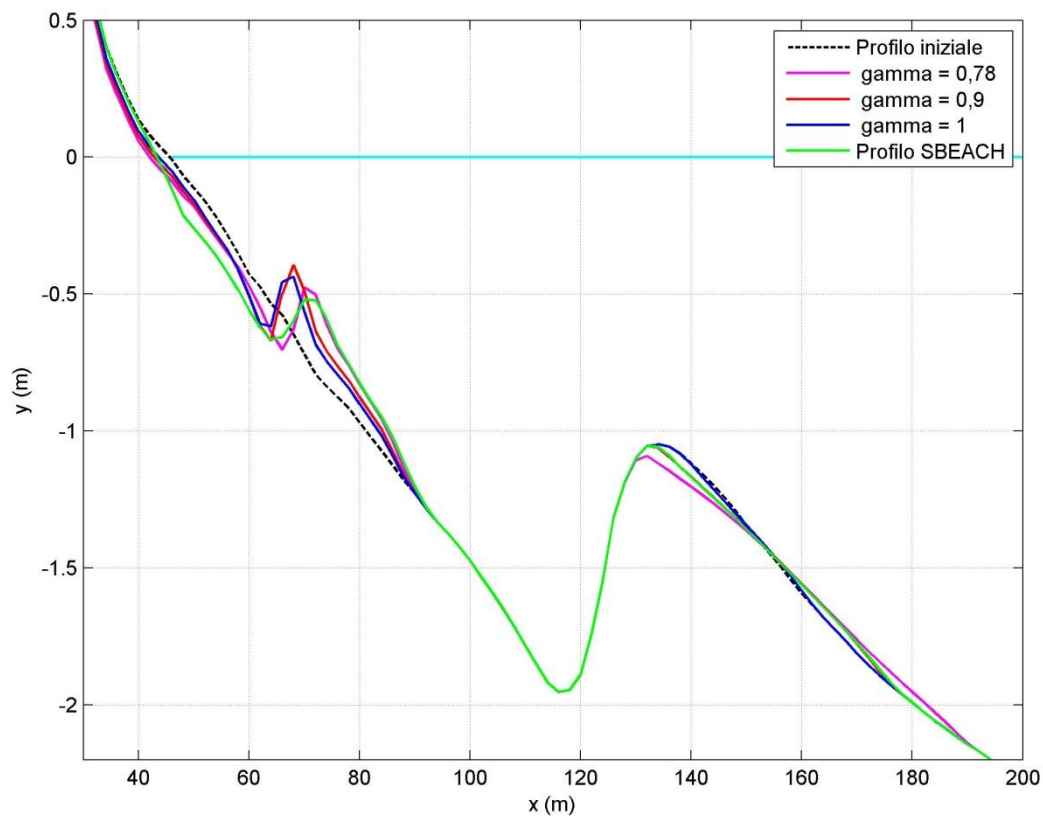


Figura 7.10 Andamento profilo al variare di Deq

7.4.2. Profilo invernale

Si verifica ora la capacità del modello di riprodurre un profilo invernale, simulando una mareggiata reale con durata di 12 ore attraverso l'azione di un'onda regolare di tipo erosivo. L'onda utilizzata ha H_s pari a 2,5 m, periodo $T = 8$ s e angolo di incidenza nullo; si ipotizza inoltre la presenza di una marea di 1 metro. La granulometria del materiale è $D_{50} = 0,18$ mm.

La simulazione viene effettuata su un profilo reale nel quale si suppone di effettuare un ripascimento di 200 m^3 per metro di litorale; la pendenza locale è di 1 : 20.

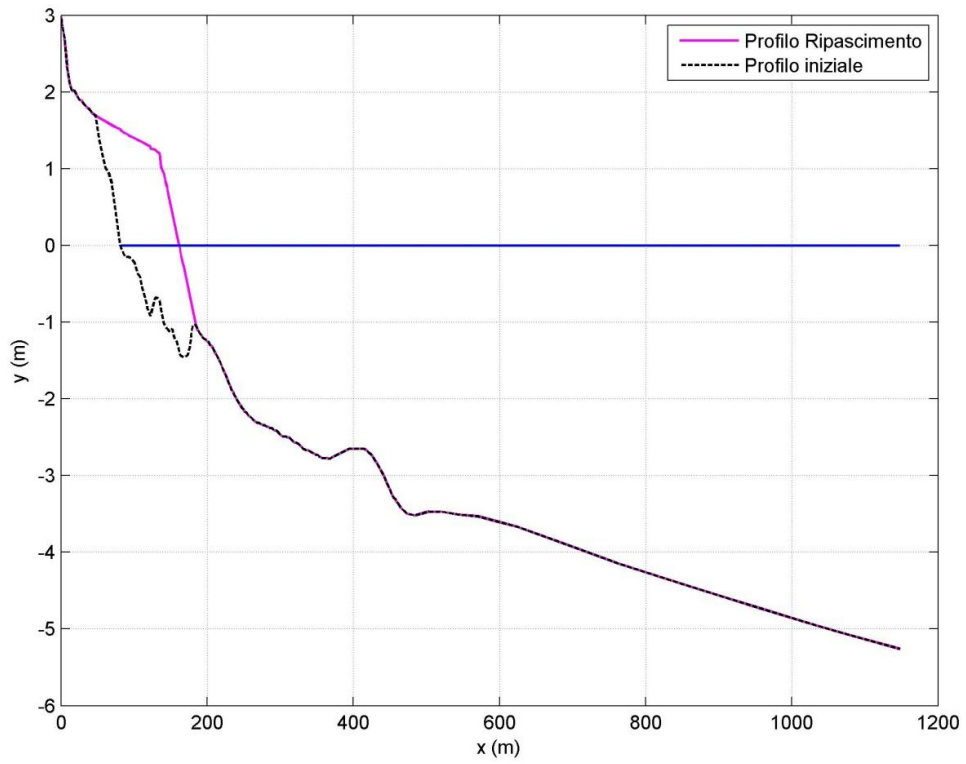


Figura 7.11 Profilo iniziale

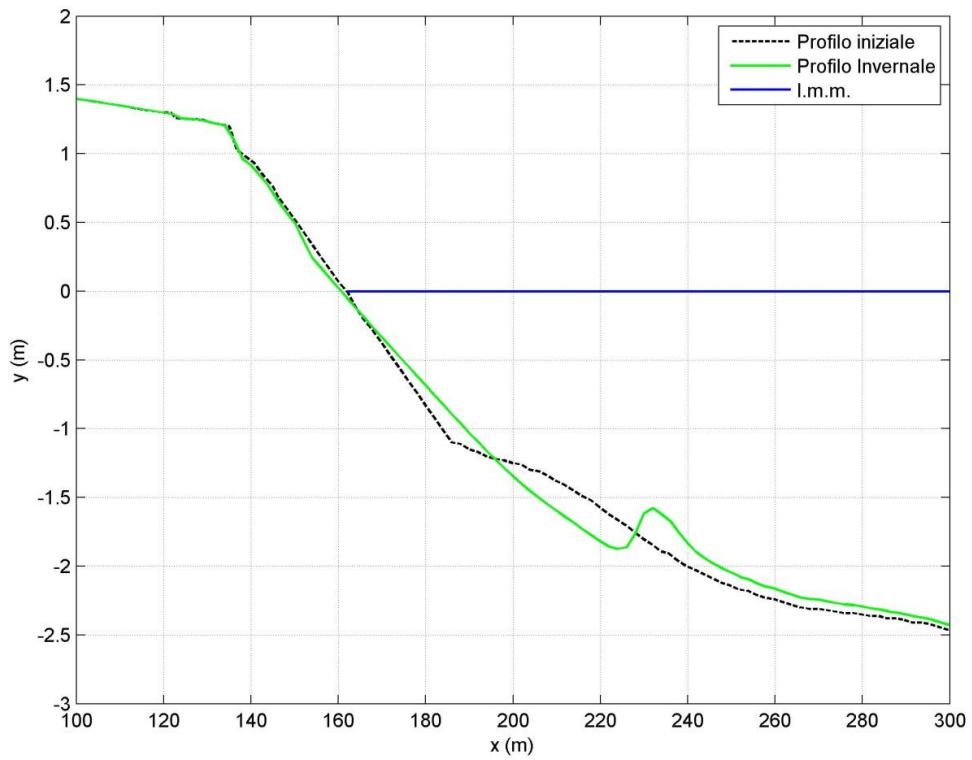


Figura 7.12 Profilo Invernale

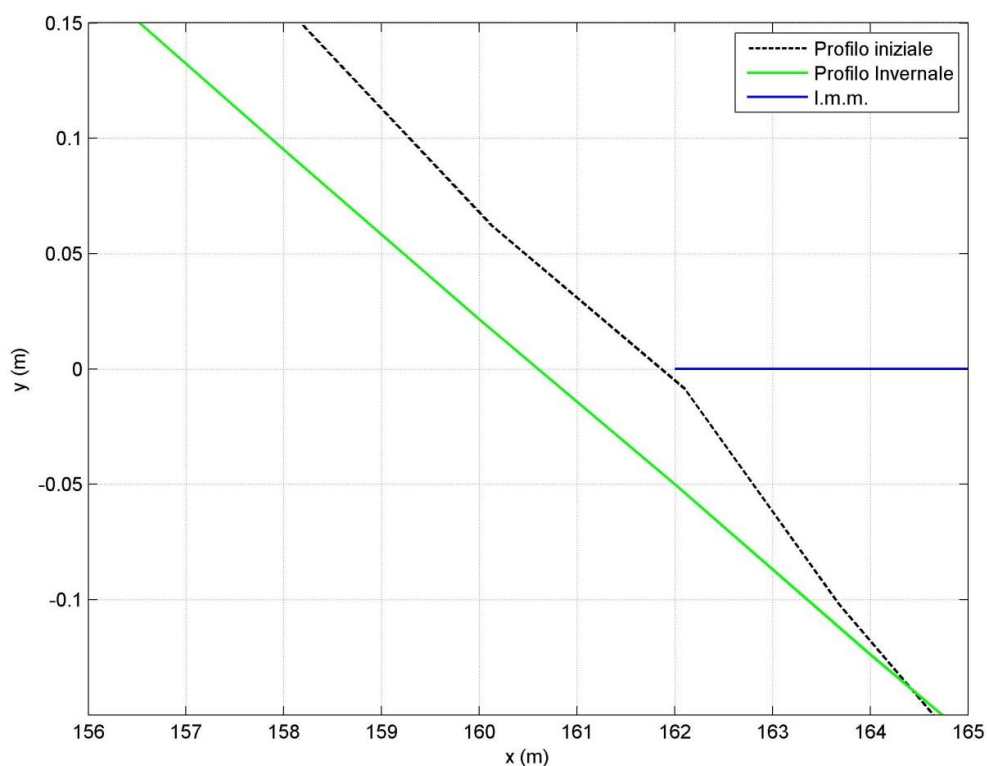


Figura 7.13 Arretramento linea di riva profilo Invernale

Nei grafici riportati l'andamento del profilo rispecchia quanto visto nella parte teorica, ovvero nel caso dell'azione di un'onda regolare di tipo erosivo si osserva l'arretramento della linea di riva e la formazione di una barra. Nel caso preso in esame l'arretramento è di circa 1,5 m mentre la posizione della barra è a circa 80 m dalla linea di riva.

7.4.3. Profilo estivo

Utilizzando il medesimo profilo del paragrafo precedente, si procede con una simulazione di mareggiata di tipo accrescitivo in assenza di marea; l'onda ha $H_s = 0,5$ m, periodo $T = 10$ s, la direzione dell'onda si suppone perpendicolare alla linea di riva. La granulometria del materiale è $D_{50} = 0,18$ mm e la pendenza locale è di 1 : 20. La durata della simulazione è di 7 giorni, ovvero 168 ore.

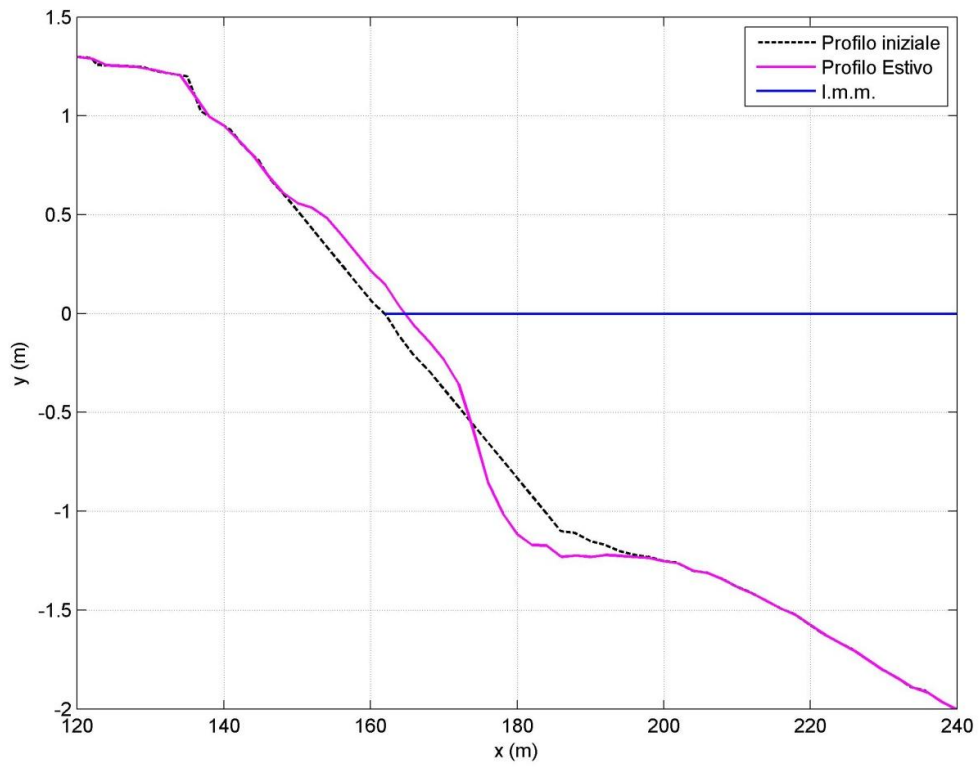


Figura 7.14 Profilo Estivo

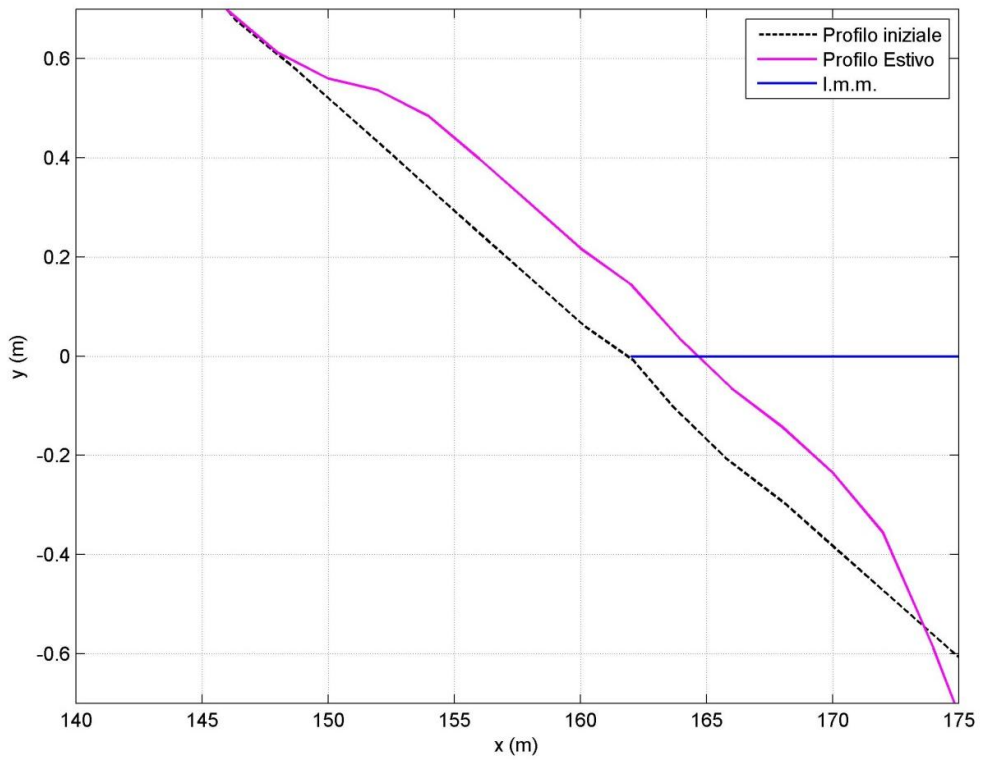


Figura 7.15 Formazione berma profilo Estivo

L'evoluzione del profilo, nel caso dell'azione di un'onda regolare di tipo accrescitivo, determina la formazione di una berma in corrispondenza della linea di riva e un avanzamento della stessa di circa 2,5 m, rispecchiando quanto visto nella parte teorica.

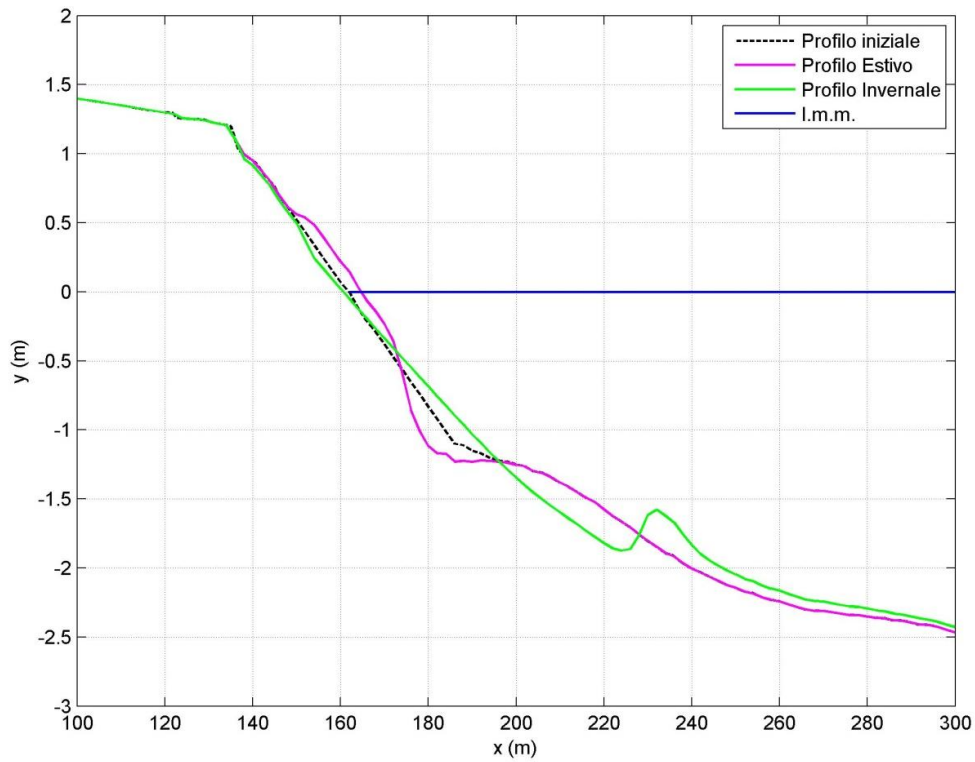


Figura 7.16 Confronto profilo estivo e profilo invernale

8. APPLICAZIONE DEI MODELLI DI TRASPORTO

Si è deciso di applicare i modelli ad un profilo trasversale del litorale di Cortellazzo, sito nel Comune di Jesolo; a partire dai dati contenuti nel database MEDATLAS è stata ricavata una statistica delle onde da cui è risultato, per il caso in esame, che le direzioni prevalenti sono quelle di Bora e di Scirocco. Sono state effettuate delle simulazioni mediante il modello di trasporto cross – shore al fine di determinare l'evoluzione del profilo e delle simulazioni utilizzando il modello di trasporto solido longitudinale per poterne stimare il valore medio annuo.

8.1. Introduzione

In questo capitolo si procede con l'applicazione del modello a un profilo trasversale reale del litorale di Cortellazzo (Ve); per ciascuna stagione viene effettuata, con il modello di Larson e Kraus, una simulazione sul profilo naturale per poterne valutare l'arretramento della linea di riva, in seguito viene stimato il trasporto solido longitudinale.

8.2. Inquadramento geografico

Le simulazioni di seguito rappresentate sono state eseguite su un profilo batimetrico della spiaggia di Cortellazzo (Lat 45°32'08"N Long 12°43'15"E), frazione del Comune di Jesolo (VE). Cortellazzo sorge sul punto in cui il canale Cavetta si immette nel Piave, in prossimità della sua foce; il suo territorio si estende sino al mare (Jesolo Pineta) e, in parte, sull'argine sinistro del Piave comprendendo parte della Laguna del Mort. Il litorale è orientato di circa 70° rispetto al Nord.

Il sito in indagine è caratterizzato da una tendenza erosiva causata principalmente dal deficit di apporto da parte del fiume Piave, nell'ultimo decennio è stato oggetto di interventi strutturali, quali la realizzazione di pennelli e di ripascimenti annuali per un volume complessivo di materiale apportato pari a 850.000 m³.

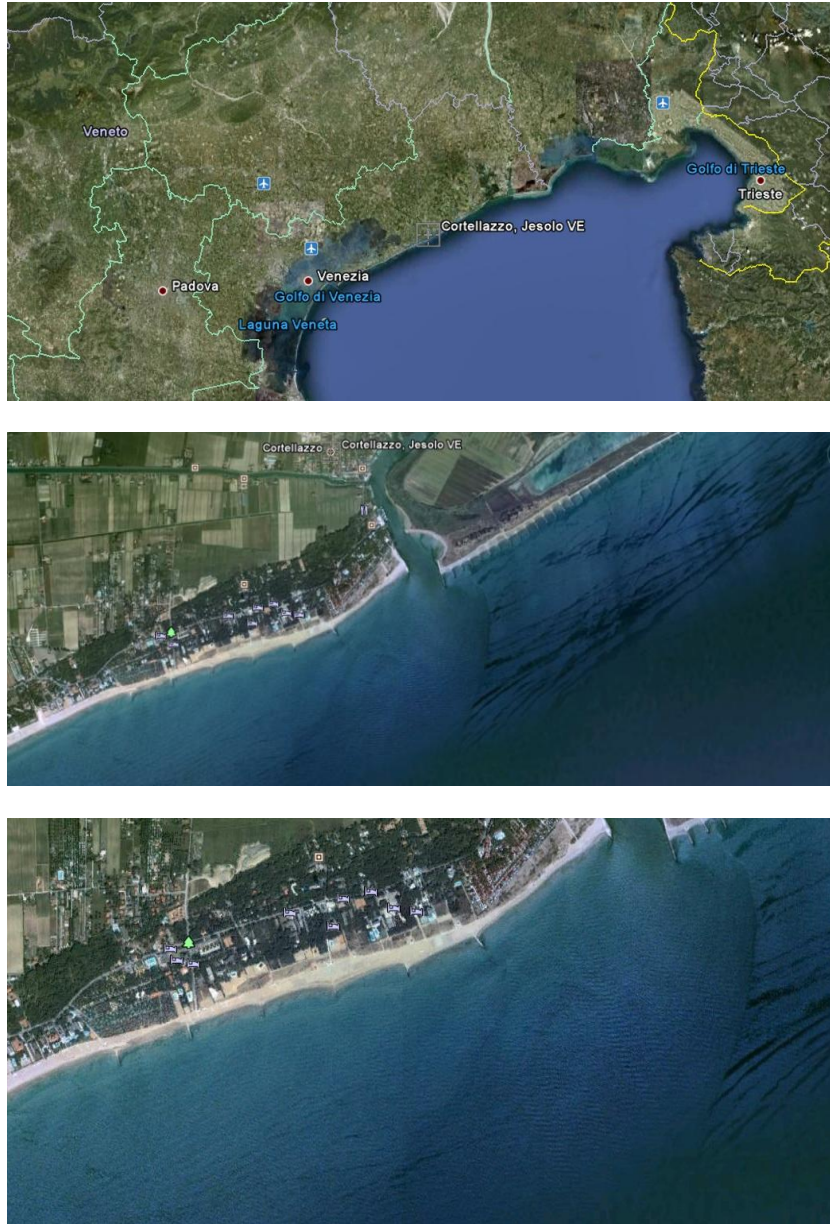


Figura 8.1 Cortellazzo (Ve)

8.3. Clima ondosso

Per la definizione delle caratteristiche meteo marine della zona in esame si è fatto riferimento ai dati contenuti nel database MEDATLAS.

Il progetto MEDATLAS (1999-2004) è stato condotto da un consorzio di sei istituzioni dislocate in Francia, Italia e Grecia, tra cui l'italiano C.N.R. e la francese Meteo France. Lo scopo principale del progetto è stato quello di fornire statistiche di moto ondoso e di vento nel Mare Mediterraneo relative a punti con distribuzione quasi regolare e distanti tra loro mediamente 50 km; i dati forniti nel progetto Atlas riguardano un totale di 239 punti.

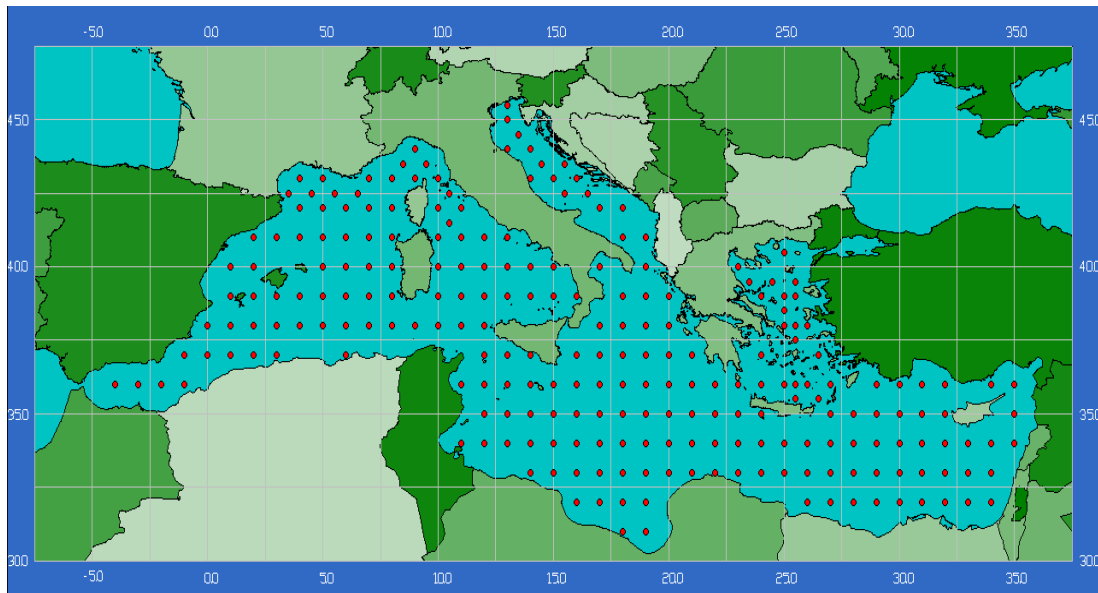


Figura 8.2 Distribuzione dei punti MEDATLAS nel Mar Mediterraneo

Attraverso i dati MEDATLAS è stato possibile definire il clima ondoso in corrispondenza di un punto al largo del paraggio di Cortellazzo, di coordinate geografiche (13°00' E, 45°30' N), su un fondale di circa 20 m.

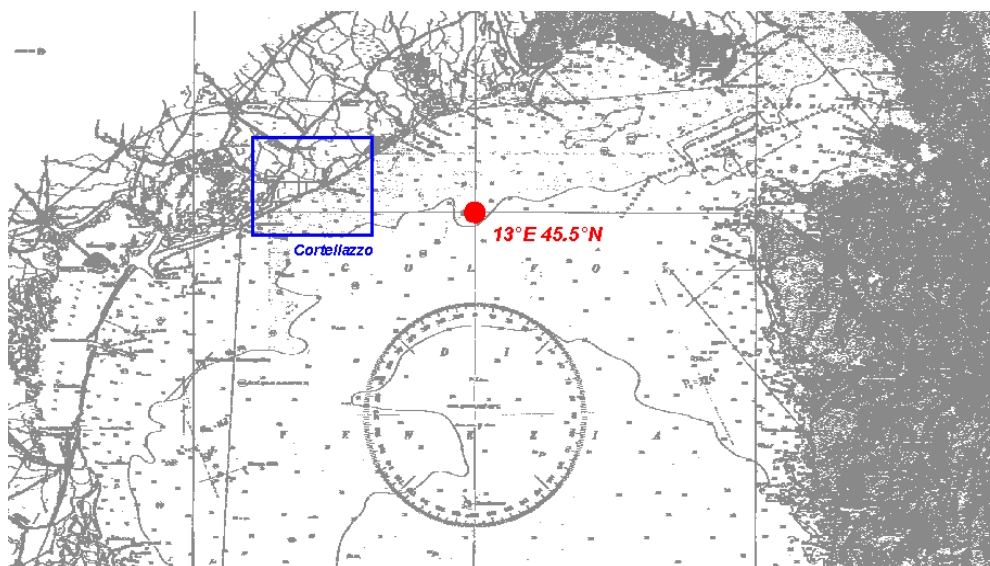


Figura 8.3 Ubicazione punto MEDATLAS relativo al paraggio di Cortellazzo

La ricostruzione delle condizioni meteomarine è stata realizzata mediante modelli matematici (calibrati in base a rilevazioni da satellite e da boe ondametriche) sviluppati a partire dai dati meteorologici contenuti nell'archivio del Centro Meteorologico Europeo (ECMWF).

Le informazioni, disponibili come campi bidimensionali esaorari, sono state organizzate in serie temporali che comprendono altezza significativa H_s , periodo di picco T_p e direzione media di provenienza. I dati coprono il periodo compreso tra Luglio 1992 e Giugno 2002, a intervalli di sei ore, e possono poi essere utilizzati per ricavare, attraverso un opportuno processo di elaborazione, la climatologia al largo del paraggio prescelto.

Nella tabella sottostante sono riportate le caratteristiche delle onde, riferite al punto MEDATLAS precedentemente individuato, ordinate per classi di direzione di provenienza e altezza significativa. Le frequenze attribuite alle singole classi sono espresse in parti per 4000, ovvero il numero totale di eventi in cui è stato suddiviso il periodo di osservazione. Dall'osservazione delle registrazioni si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da Bora (60°N) e da Scirocco ($135\text{-}150^\circ\text{N}$), con prevalenza di quelle provenienti da Scirocco.

REGISTRAZIONI DI MOTO ONDOSO, STUDIO ANNUALE													
H _s (m)													
DIR	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
(°N)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4	5
0	12	7	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	27	27	15	7	6	2	1	1	1	0	0	0	0
30	38	28	25	15	10	4	3	1	4	1	0	0	0
45	61	49	45	32	17	11	9	4	6	3	0	1	1
60	41	49	54	44	32	23	13	13	13	5	2	1	0
75	44	41	32	33	20	12	8	3	5	1	0	0	1
90	54	29	27	16	14	6	2	0	1	0	0	0	0
105	70	34	15	11	5	1	1	1	2	0	0	0	0
120	154	39	24	12	4	6	0	2	1	0	0	0	0
135	266	82	37	15	12	8	3	2	1	1	0	0	0
150	363	263	100	48	28	11	7	5	5	1	1	1	0
165	145	162	93	31	16	9	5	4	3	2	0	0	0
180	117	78	49	21	9	8	4	2	3	0	0	0	0
195	83	72	30	8	7	3	4	3	0	0	0	0	0
210	64	33	11	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0
225	35	18	7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
240	23	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
300	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

REGISTRAZIONI DI MOTO ONDO SO, ANDAMENTO ESTATE													
H _s (m)													
DIR	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
(°N)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4	5
0	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	13	10	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	19	9	6	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
45	18	8	10	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
60	13	13	11	7	6	3	2	1	1	0	0	0	0
75	16	8	7	4	1	1	0	0	1	0	0	0	0
90	17	6	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
105	25	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	60	8	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
135	96	16	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
150	111	69	19	8	3	1	0	0	0	0	0	0	0
165	57	54	26	8	2	2	0	0	0	0	0	0	0
180	40	21	11	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
195	13	13	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
210	8	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
225	5	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
240	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

REGISTRAZIONI DI MOTO ONDOSO, ANDAMENTO AUTUNNO													
H _s (m)													
DIR	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
(°N)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4	5
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	4	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
30	4	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
45	22	11	7	7	5	2	3	1	2	0	0	0	0
60	11	11	14	12	9	8	5	6	5	1	0	0	0
75	9	10	9	12	7	4	3	1	2	1	0	0	0
90	12	6	9	6	3	3	1	0	1	0	0	0	0
105	14	11	6	4	1	0	1	0	1	0	0	0	0
120	28	10	7	4	2	2	0	1	1	0	0	0	0
135	53	30	13	5	4	3	2	1	1	1	0	0	0
150	87	74	35	16	12	6	4	4	3	1	1	1	0
165	28	38	20	13	9	5	3	2	2	2	0	0	0
180	21	12	11	5	3	3	3	1	2	0	0	0	0
195	12	11	7	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
210	10	7	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
225	6	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

REGISTRAZIONI DI MOTO ONDOSO, ANDAMENTO INVERNO													
H _s (m)													
DIR	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
(°N)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4	5
0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	5	7	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0
30	7	7	9	5	4	3	2	1	3	1	0	0	0
45	14	16	18	17	8	6	4	3	3	3	0	1	1
60	7	12	18	19	14	10	4	5	5	4	2	1	0
75	11	11	9	7	8	5	4	2	2	0	0	0	1
90	10	9	6	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0
105	16	8	2	2	3	0	0	1	1	0	0	0	0
120	37	12	3	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0
135	68	13	6	3	3	3	1	1	0	0	0	0	0
150	66	38	16	11	7	3	2	1	2	0	0	0	0
165	24	21	14	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0
180	27	16	14	4	2	2	0	0	1	0	0	0	0
195	33	22	7	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0
210	29	13	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
225	17	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	14	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

REGISTRAZIONI DI MOTO ONDOSO, ANDAMENTO PRIMAVERA													
H _s (m)													
DIR	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
(°N)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4	5
0	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	5	6	5	2	3	1	0	1	1	0	0	0	0
30	8	8	6	5	3	1	0	0	1	0	0	0	0
45	7	14	10	5	3	2	2	0	1	0	0	0	0
60	10	13	11	6	3	2	2	1	2	0	0	0	0
75	8	12	7	10	4	2	1	0	0	0	0	0	0
90	15	8	7	4	6	1	1	0	0	0	0	0	0
105	15	8	4	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
120	29	9	11	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
135	49	23	13	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0
150	99	82	30	13	6	1	1	0	0	0	0	0	0
165	36	49	33	7	2	0	1	1	1	0	0	0	0
180	29	29	13	8	3	2	1	1	0	0	0	0	0
195	25	26	10	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0
210	17	10	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
225	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.4. Trasporto solido costiero stagionale

Per effettuare le simulazioni sono stati utilizzati i dati ricavati dal progetto MEDATLAS.

Nel caso del trasporto solido trasversale, dal momento che le onde registrate si riferiscono ad intervalli orari e poiché il modello utilizza passi temporali minori, si è deciso di randomizzare, con una prefissata variabilità, le onde attorno al valore medio dell'intervallo

orario. E' stato imposto un livello di marea compreso tra + 50 cm per condizioni con H_s inferiore ad 1 m, mentre con H_s superiori è stato deciso di sommare 1 m al livello calcolato. Non essendo rilevanti dal punto di vista del trasporto solido, non sono state considerate le onde di altezza significativa inferiore ai 50 cm e conseguentemente l'intervallo efficace in un anno è risultato pari a 120 giorni all'anno (ovvero 30 giorni per ogni stagione). L' H_s massima applicata è di 4,5 m, la minima di 0,625 m mentre il diametro medio è stato fissato pari a 0,2 mm.

Nel caso del trasporto solido longitudinale si sono invece utilizzate tutte le misurazioni delle tabelle sopra riportate, per quanto riguarda la sedimentologia si è fatto riferimento alla seguente tabella:

	DIAMETRI [mm]	
	D ₅₀	D ₉₀
0 < x < x Chiusura	0,20	0,60
x Chiusura < x < x Largo	0,15	0,45

Il profilo iniziale utilizzato presenta una barra in corrispondenza dei 140 metri, mentre la linea di riva è a 46,5 m dalla posizione posta come riferimento. Il profilo è caratterizzato da una pendenza media del fondo pari a 1:200; in prossimità della linea di riva la pendenza del profilo naturale è dell'ordine dell' 1:35 con un massimo dell'1:20.

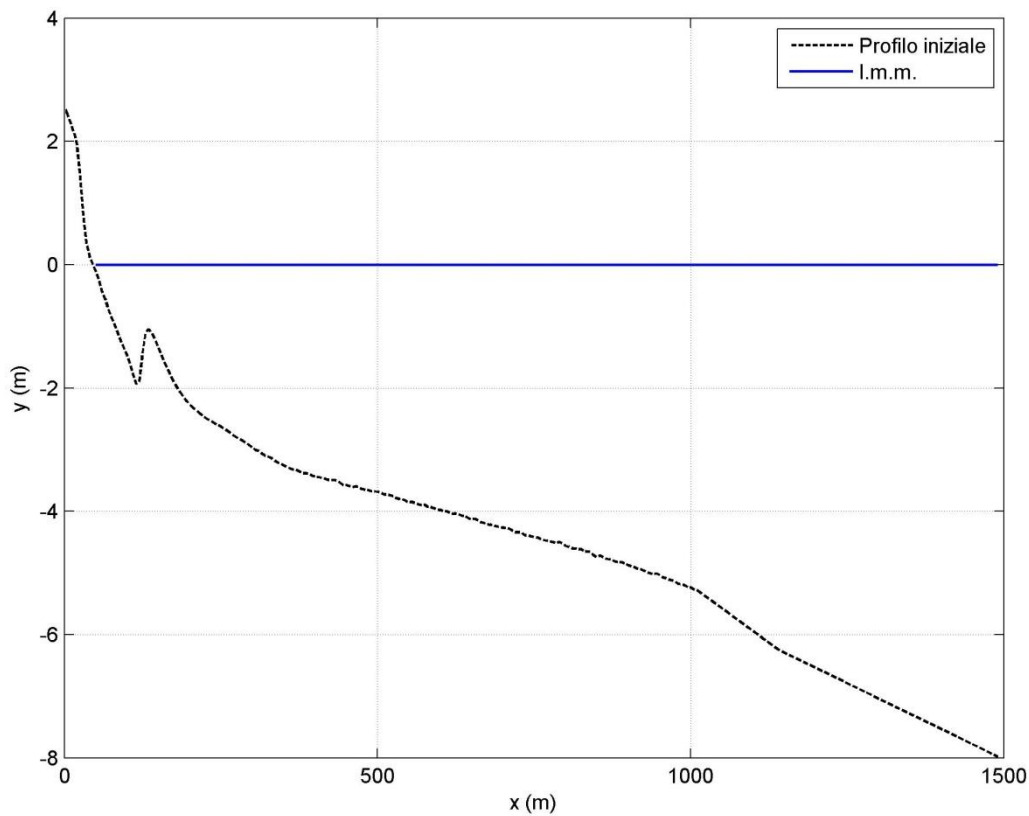


Figura 8.4 Profilo iniziale

Nei successivi paragrafi si valuterà, per ciascuna stagione, il modellamento del profilo causato dal trasporto solido trasversale e si stimerà il trasporto solido longitudinale

8.4.1. Andamento del trasporto solido in Autunno

Si valuta inizialmente il rimodellamento del profilo nella stagione autunnale, imponendo una griglia di calcolo pari a $\Delta x = 2\text{m}$ e $\Delta t = 20$ minuti. La simulazione ha una durata di circa 30 giorni dato che sono state escluse le onde con altezza significativa inferiore a 0,5 m. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

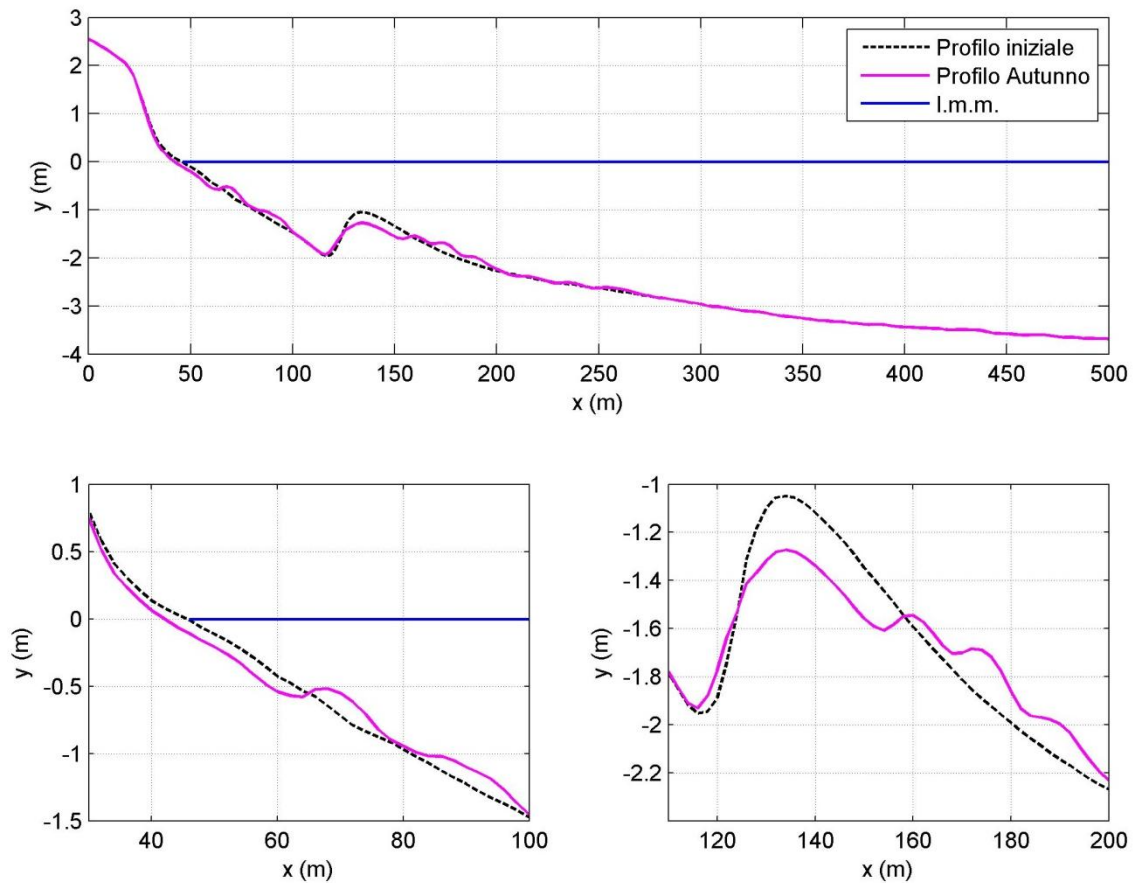


Figura 8.5 Modellamento profilo (Autunno)

Si osserva, dal precedente grafico, che nella stagione autunnale avviene un arretramento della linea di riva pari a circa 3,6 m e la formazione di una piccola barra a circa 70 m, inoltre la barra presente nel profilo viene rimodellata attraverso un'azione erosiva delle onde.

Si riporta ora la distribuzione del trasporto solido longitudinale nella stagione autunnale (positivo verso Nord).

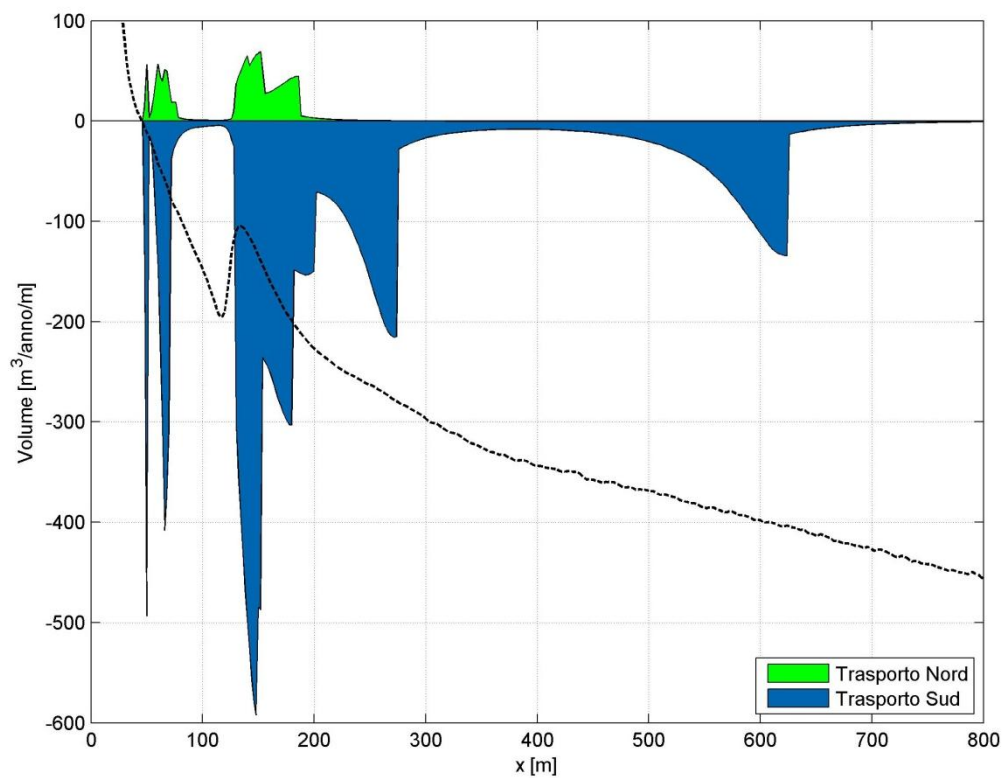


Figura 8.6 Distribuzione del trasporto longitudinale (Autunno)

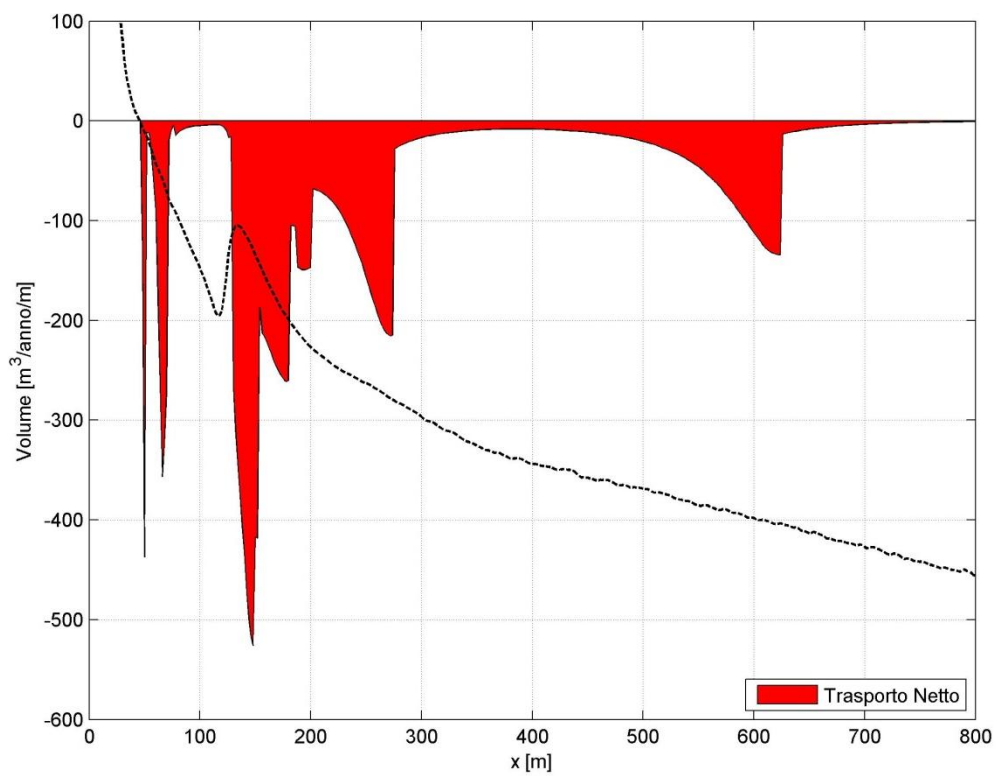


Figura 8.7 Distribuzione del trasporto longitudinale netto(Autunno)

8.4.2. Andamento del trasporto solido in Inverno

Si valuta inizialmente il rimodellamento del profilo nella stagione invernale, imponendo una griglia di calcolo pari a $\Delta x = 2\text{m}$ e $\Delta t = 20$ minuti. La simulazione ha una durata di circa 30 giorni dato che sono state escluse le onde con altezza significativa inferiore a 0,5 m. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

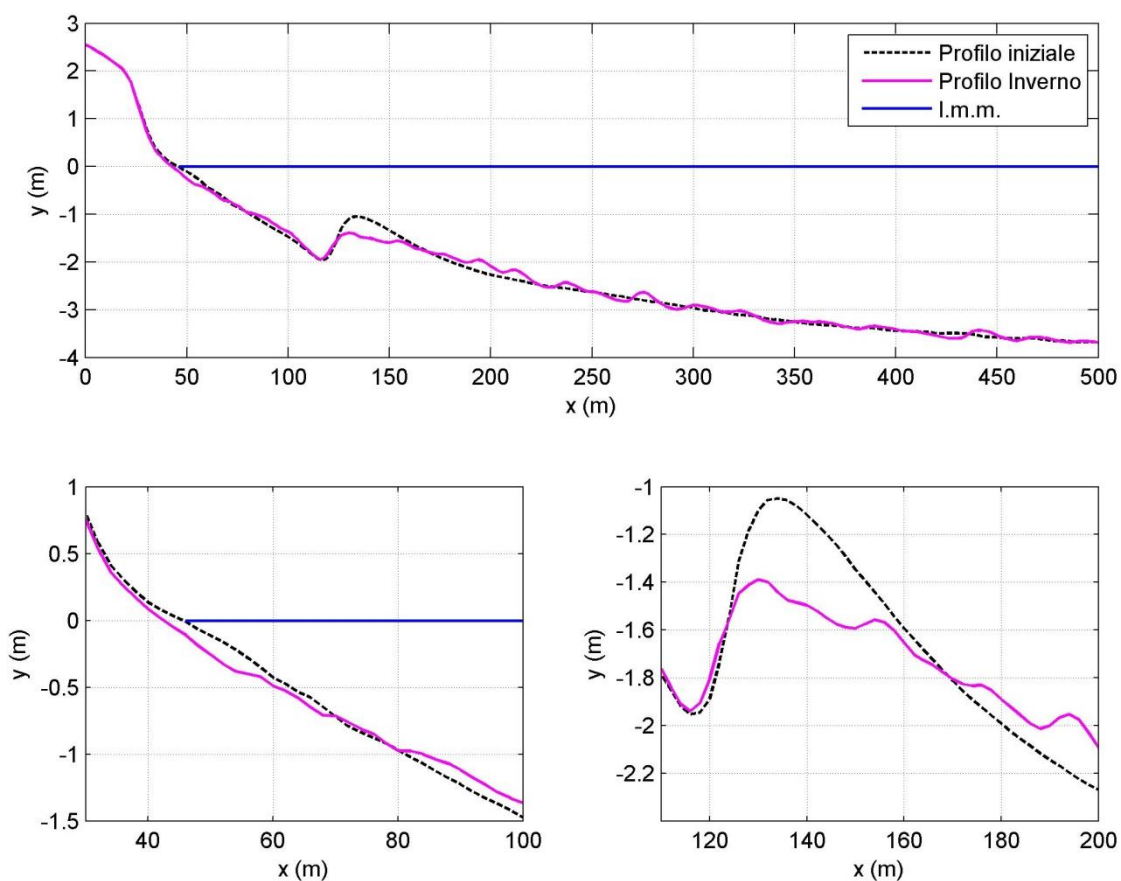


Figura 8.8 Modellamento profilo (Inverno)

Dal precedente grafico è possibile constatare che nella stagione invernale avviene un arretramento della linea di riva pari a circa 3 m, inoltre la barra presente nel profilo viene rimodellata attraverso un'azione erosiva delle onde. L'andamento del profilo proposto dal modello implementato risulta essere fortemente oscillatorio a monte della barra, questo è

probabilmente dovuto al fatto che le onde più frequenti in questa stagione hanno un'altezza d'onda mediamente più alta rispetto alle altre stagioni e derivano da mareggiate provenienti dall'azione della Bora (60°).

Si riporta ora la distribuzione del trasporto solido longitudinale nella stagione invernale (positivo verso Nord).

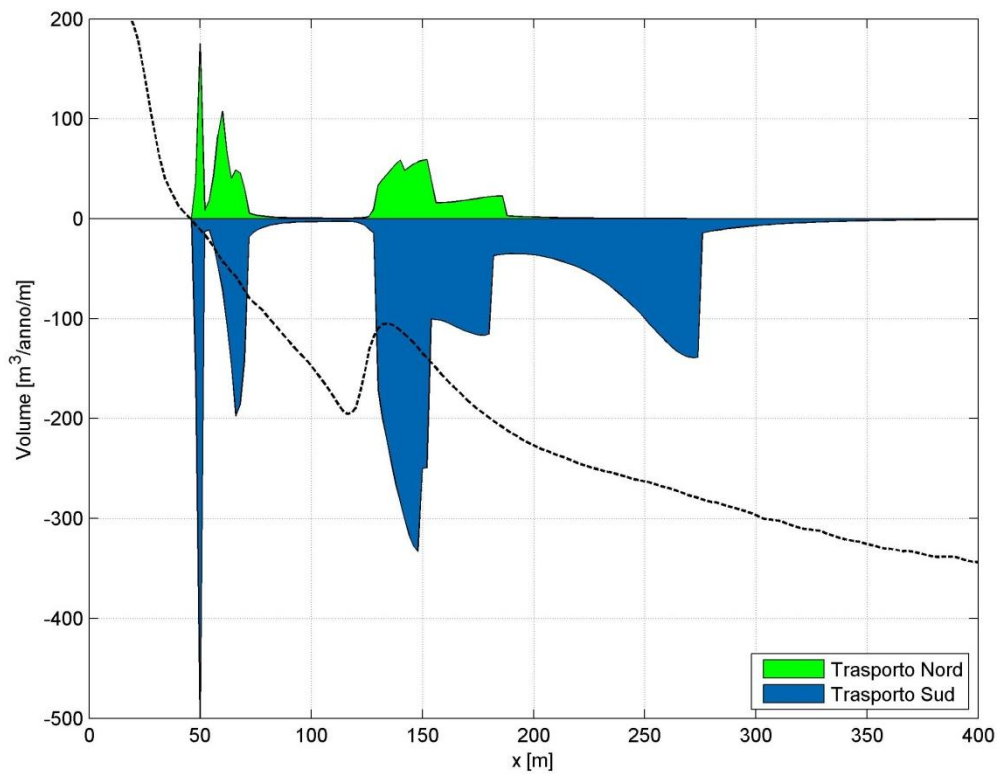


Figura 8.9 Distribuzione del trasporto longitudinale (Inverno)

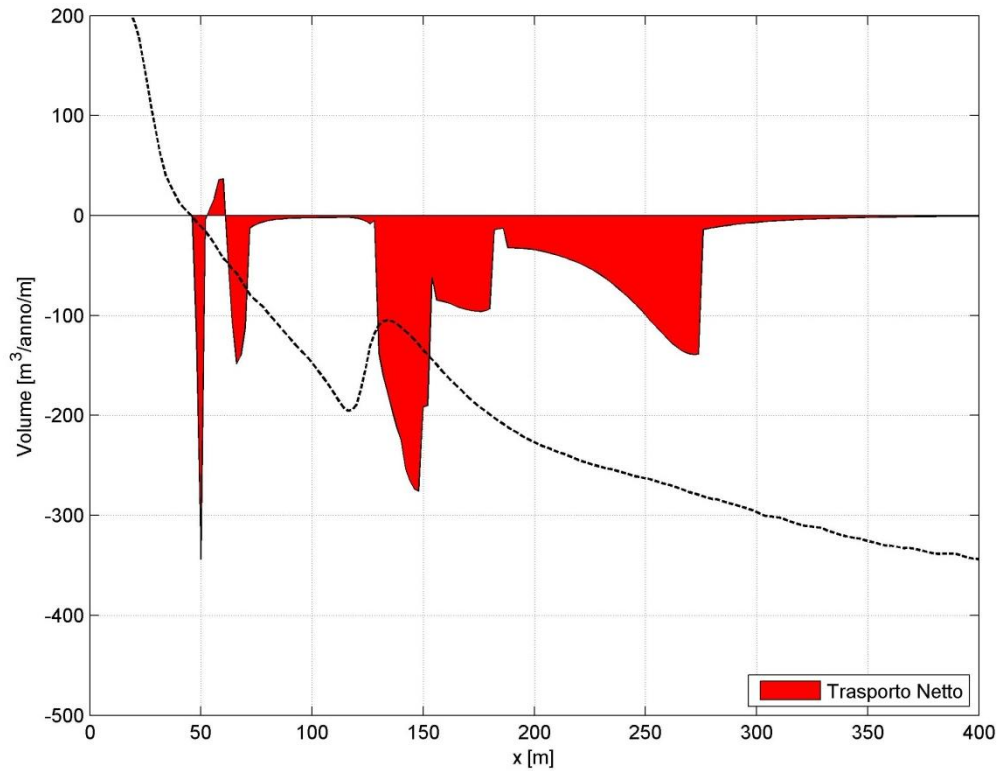


Figura 8.10 Distribuzione del trasporto longitudinale netto(Inverno)

8.4.3. Andamento del trasporto solido in Primavera

Si valuta inizialmente il rimodellamento del profilo nella stagione invernale, imponendo una griglia di calcolo pari a $\Delta x = 2\text{m}$ e $\Delta t = 20$ minuti. La simulazione ha una durata di circa 30 giorni dato che sono state escluse le onde con altezza significativa inferiore a 0,5 m. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

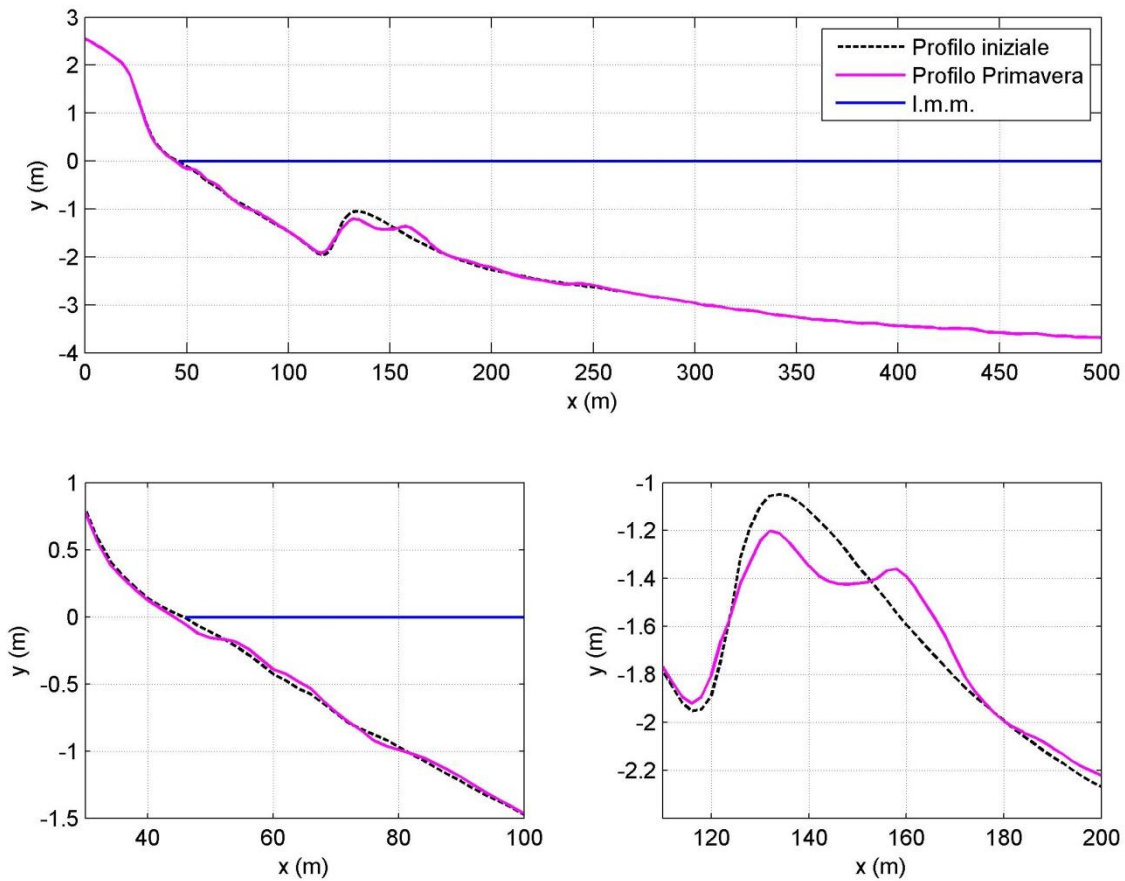


Figura 8.11 Modellamento profilo (Primavera)

Dal precedente grafico è possibile constatare che nella stagione primaverile avviene un arretramento modesto della linea di riva pari a circa 1,5 m, inoltre la barra presente nel profilo viene rimodellata in maniera meno evidente rispetto alle stagioni invernale ed autunnale.

Si riporta ora la distribuzione del trasporto solido longitudinale nella stagione primaverile (positivo verso Nord).

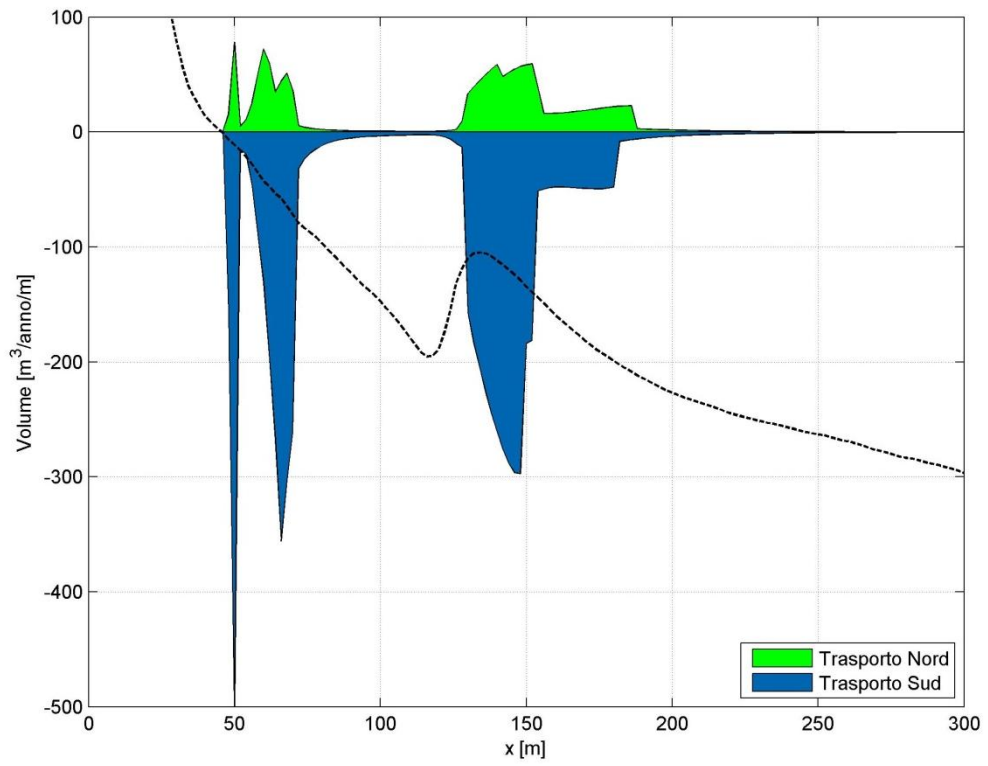


Figura 8.12 Distribuzione del trasporto longitudinale (Primavera)

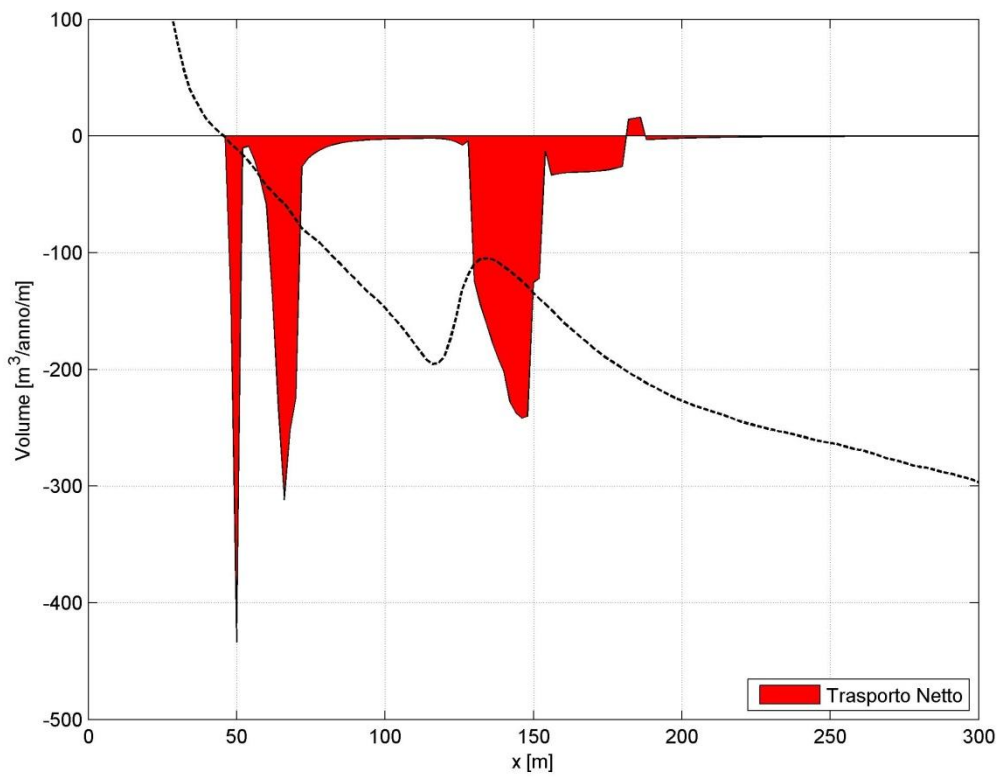


Figura 8.13 Distribuzione del trasporto longitudinale netto(Primavera)

8.4.4. Andamento del trasporto solido in Estate

Si valuta inizialmente il rimodellamento del profilo nella stagione estivo, imponendo una griglia di calcolo pari a $\Delta x = 2\text{m}$ e $\Delta t = 20$ minuti. La simulazione ha una durata di circa 30 giorni dato che sono state escluse le onde con altezza significativa inferiore a 0,5 m. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

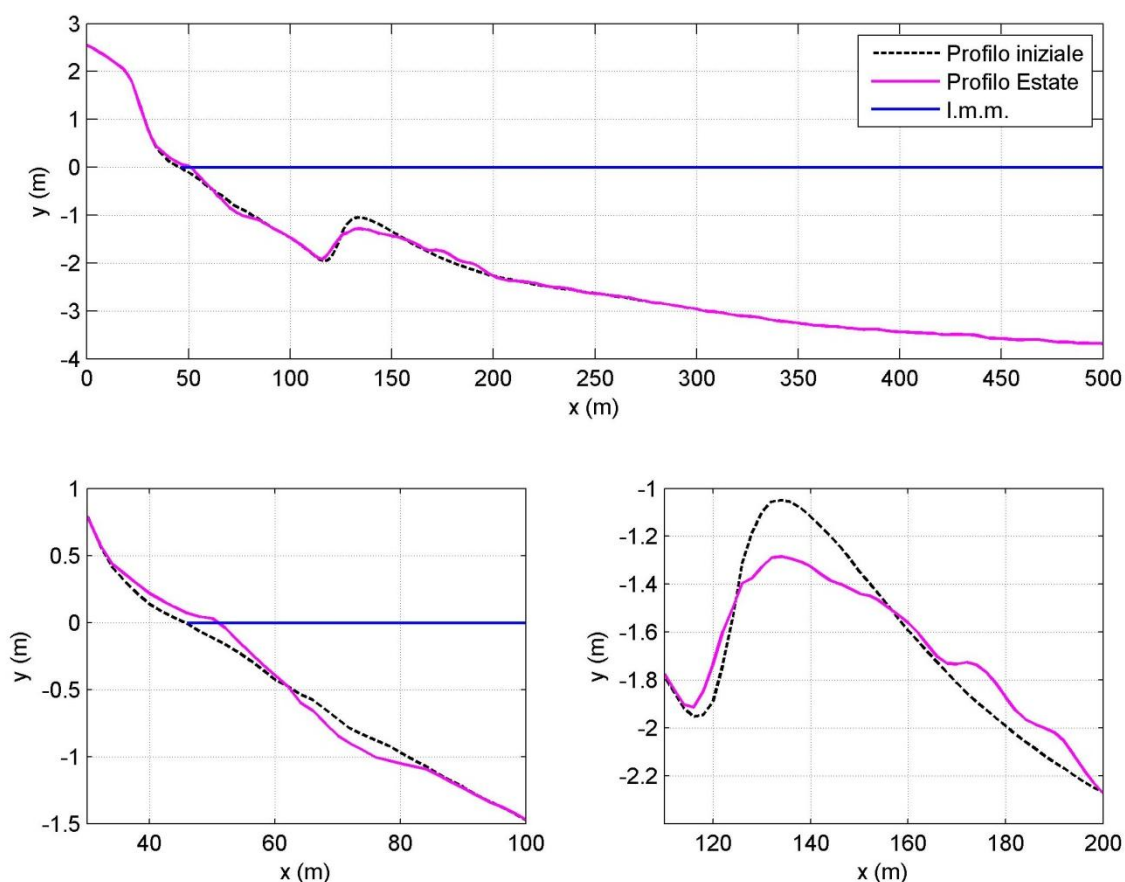


Figura 8.14 Modellamento profilo (Estate)

Dal precedente grafico è interessante osservare come il modello implementato riproduca per la stagione estiva la formazione di una piccola berma in prossimità della linea di riva, formando il tipico profilo estivo. L'avanzamento della linea di costa è pari a circa 5,4 m; la barra presente nel profilo anche in questa stagione viene leggermente spianata.

Si riporta la distribuzione del trasporto solido longitudinale nella stagione estiva (positivo verso Nord).

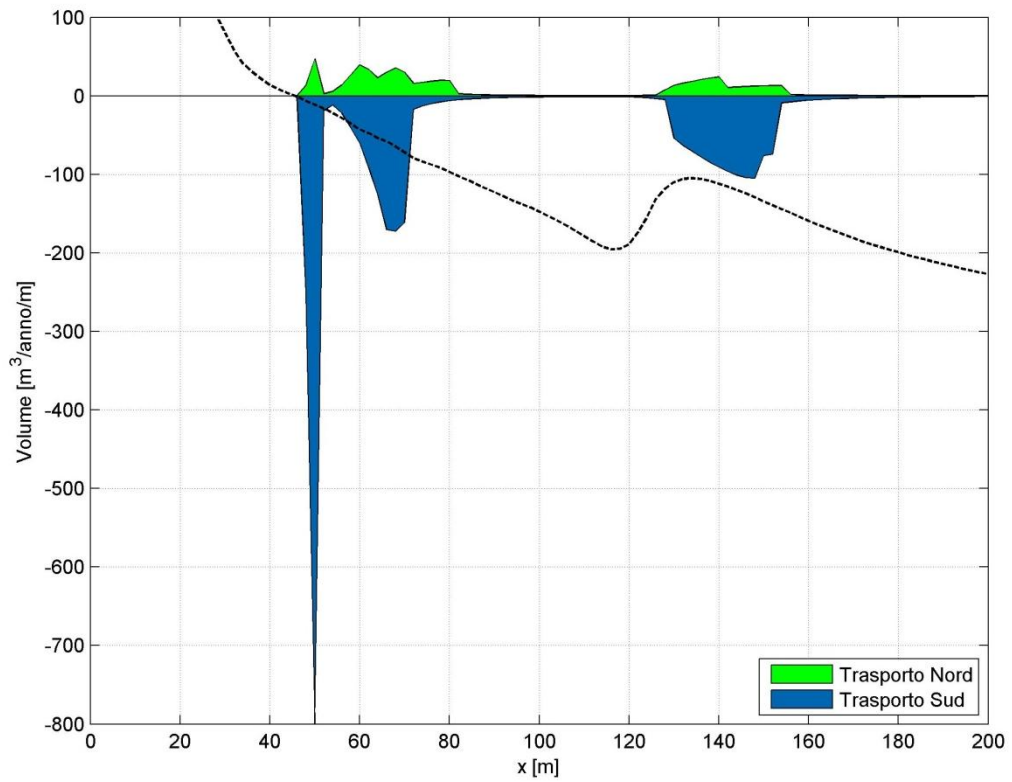


Figura 8.15 Distribuzione del trasporto longitudinale (Estate)

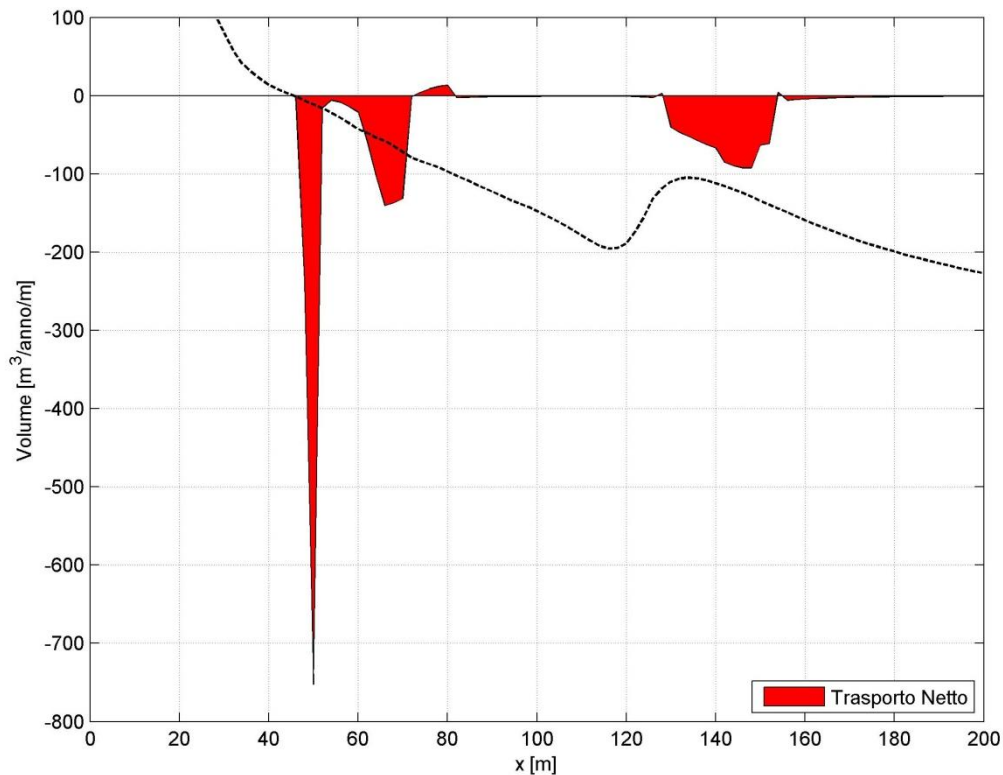


Figura 8.16 Distribuzione del trasporto longitudinale netto(Estate)

8.5. Trasporto solido annuale

In conclusione è interessante osservare, sia per quanto riguarda il trasporto solido trasversale sia per il trasporto solido longitudinale, ciò che si verifica nel corso di un anno.

Nell'analisi del trasporto ortogonale si è deciso di dividere il clima medio annuo in due parti: una relativa alle stagioni estiva e primaverile e un'altra relativa alle stagioni autunnale e invernale. Tale suddivisione è stata operata per poter valutare se il profilo tendeva a modellarsi in base ai profili estivo e invernale analizzati in teoria e nella validazione. Di seguito si riportano le variazioni del profilo nei due casi:

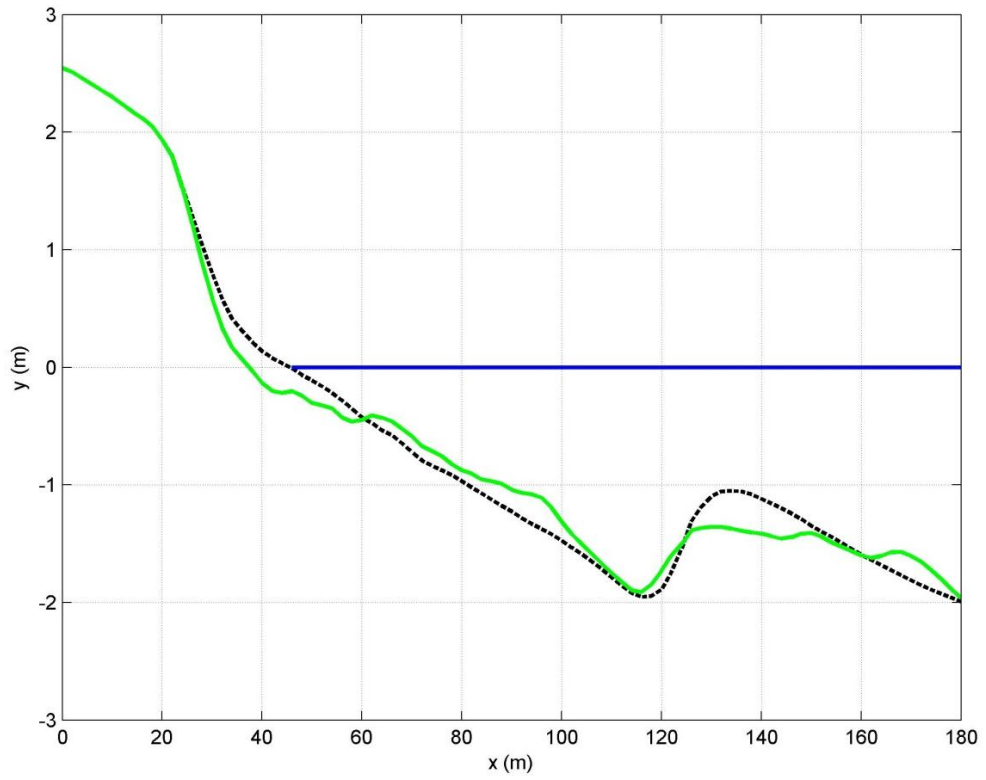


Figura 8.17 Variazione profilo (Autunno/Inverno)

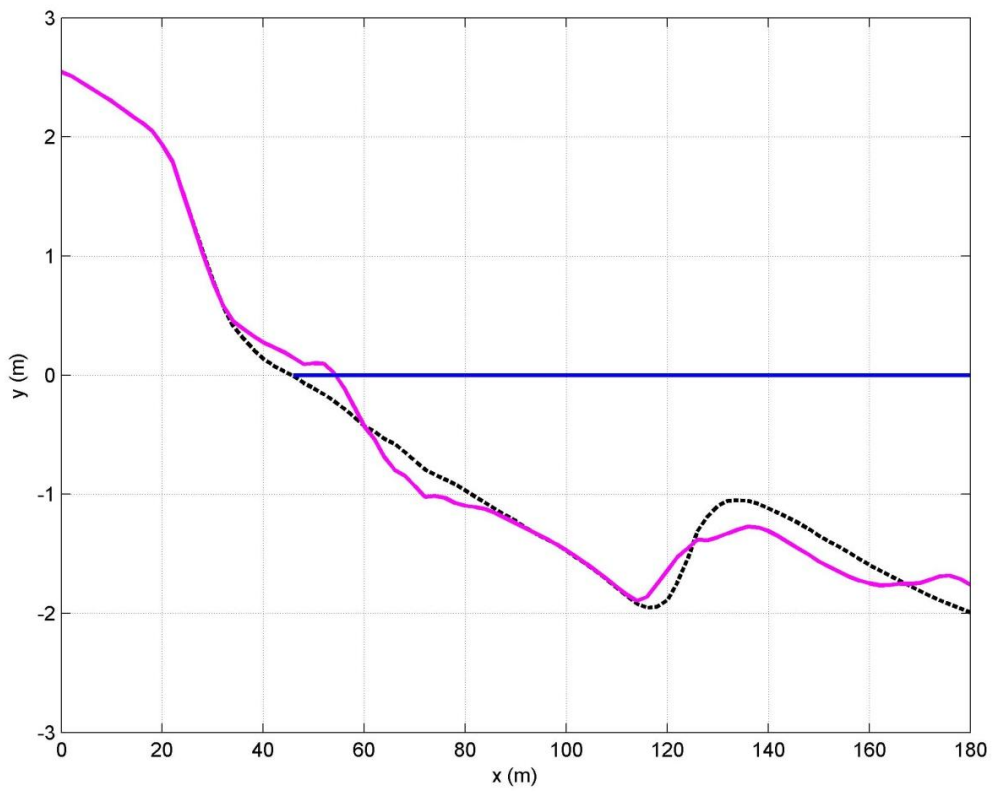


Figura 8.18 Variazione profilo (Primavera/Estate)

Si osserva che in Inverno la linea di riva ha un arretramento pari a circa 8 m e vi è la formazione di una barra; in Estate invece vi è la formazione di una berma in corrispondenza della linea di riva e dunque un suo avanzamento di circa 8,6 m.

Di seguito si riportano il trasporto solido longitudinale diretto verso Nord, il trasporto solido verso Sud e la loro differenza.

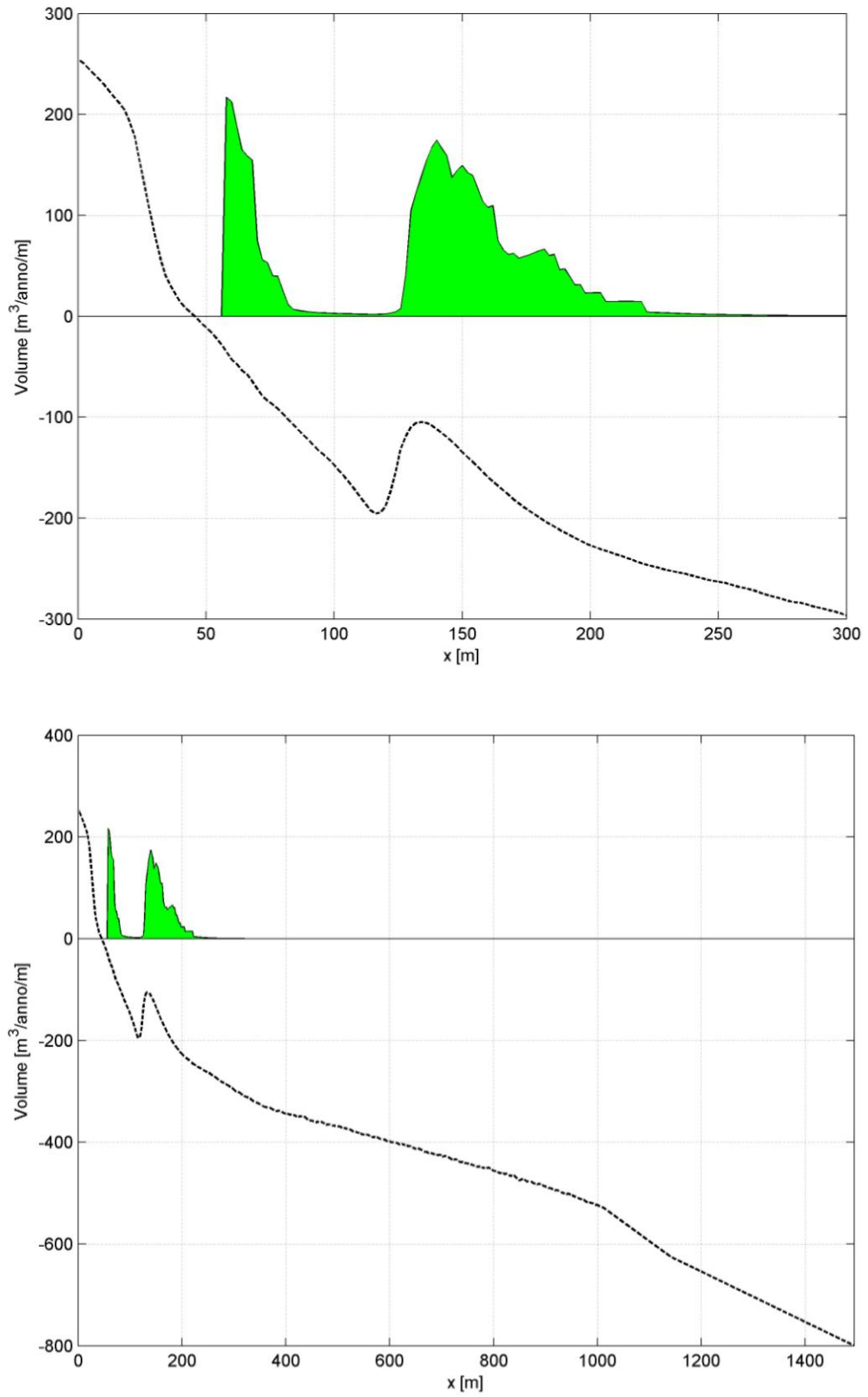


Figura 8.19 Distribuzione del trasporto longitudinale diretto verso Nord

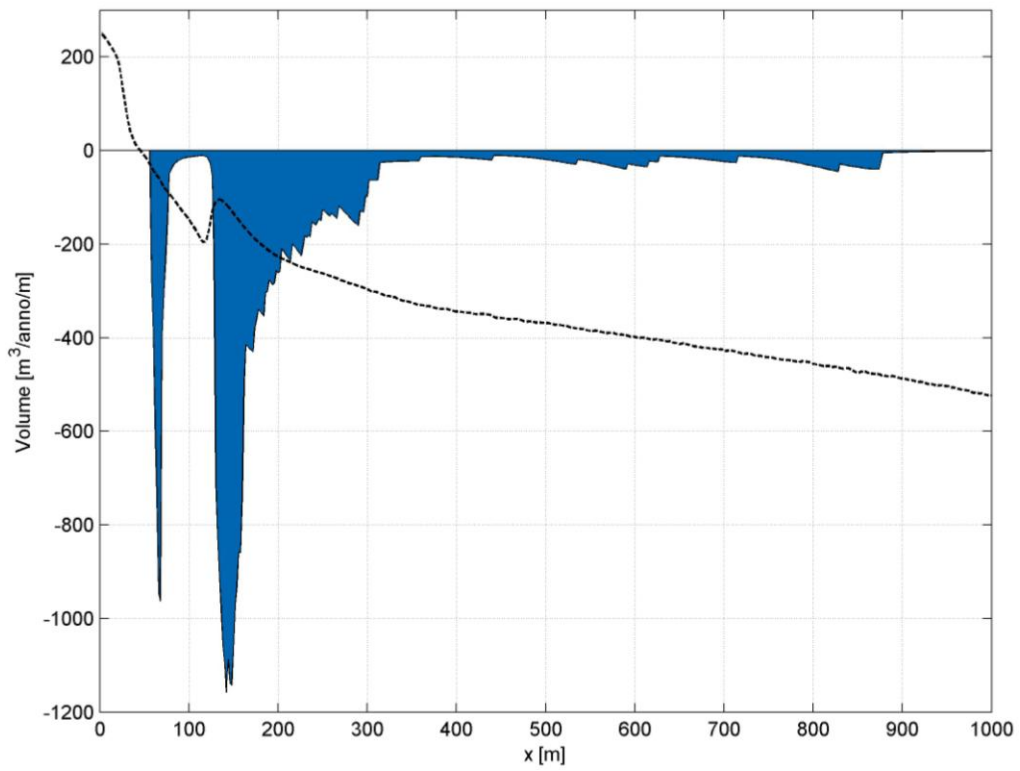
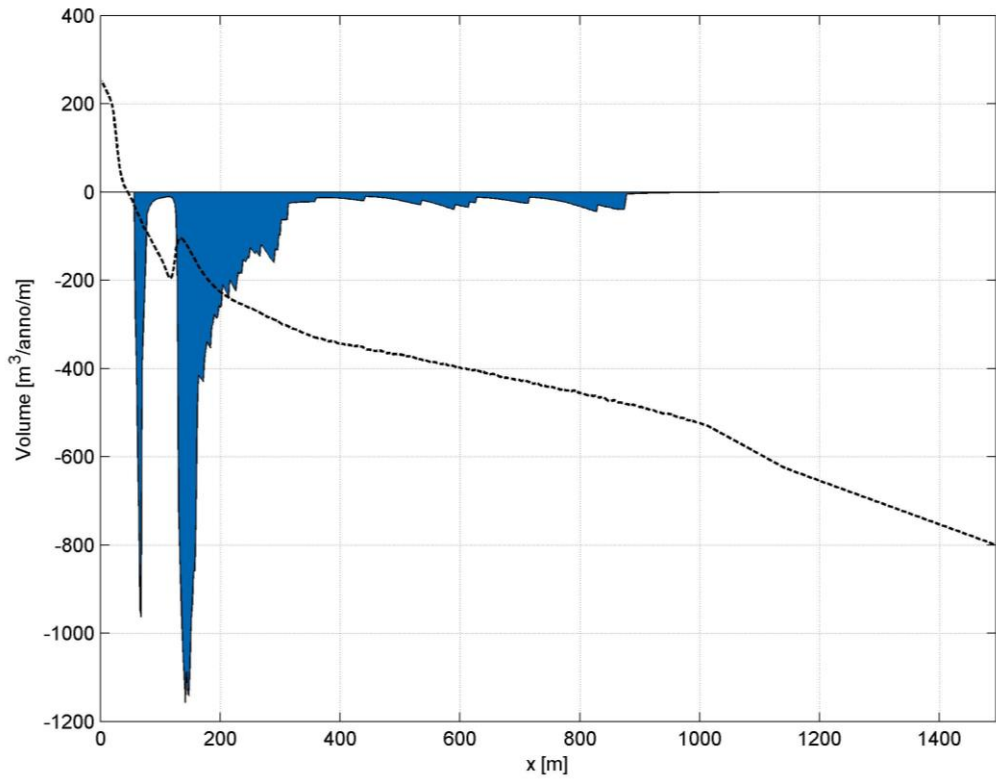


Figura 8.20 Distribuzione del trasporto longitudinale diretto verso Sud

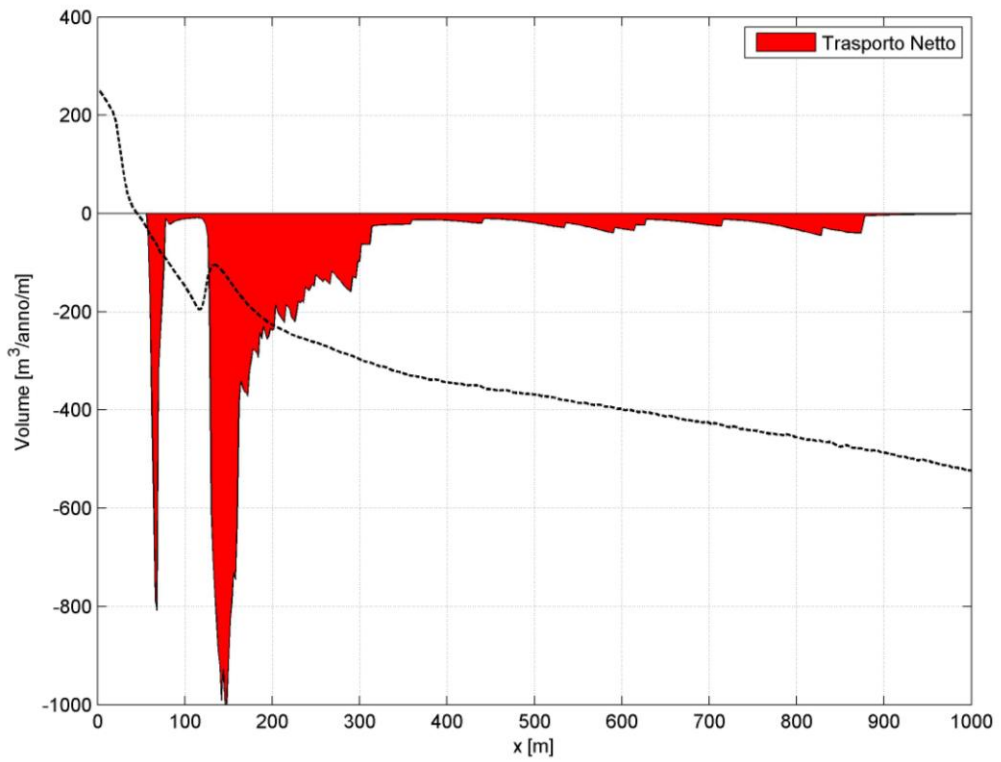
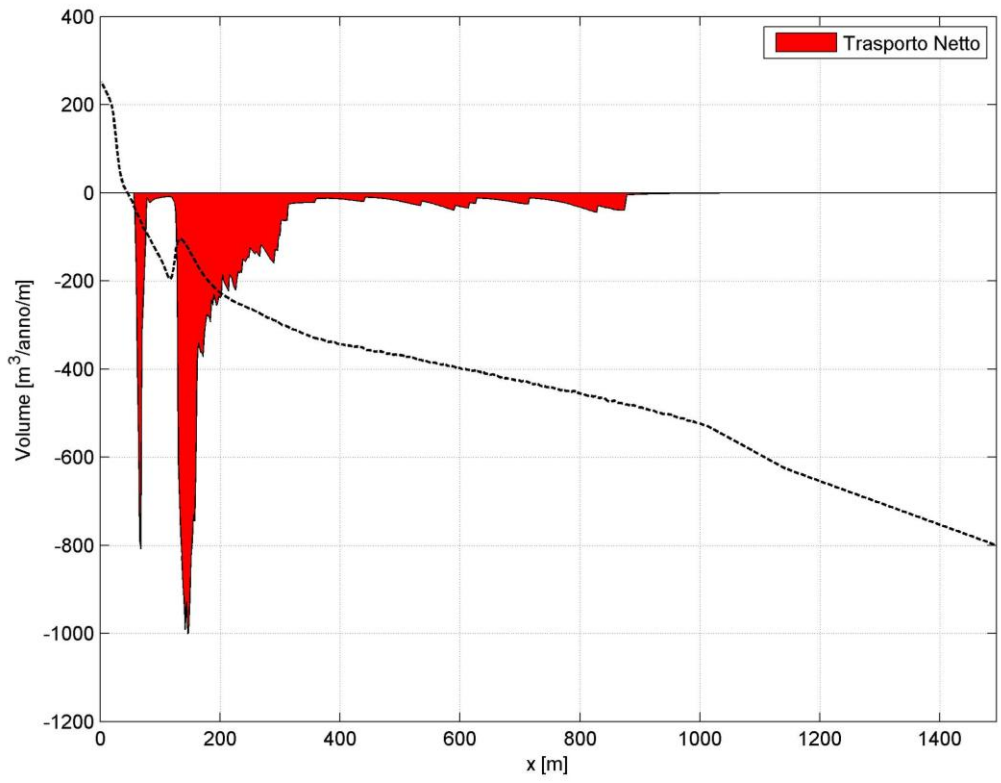


Figura 8.21 Distribuzione del trasporto longitudinale Netto

Si osserva dai grafici che il contributo maggiore del trasporto è diretto verso Sud, infatti le onde più numerose provengono da Bora e da Scirocco. In generale si osserva che la presenza di una barra lungo il profilo determina un forte frangimento e di conseguenza in tale zona si concentra il trasporto di materiale. Di seguito si riporta in tabella il riassunto dei volumi per ciascuna stagione.

	VOLUMI [m ³ /anno]		
	Volume Nord	Volume Sud	Volume Totale
Autunno	3835	-49655	-45820
Inverno	3503	-20268	-16764
Primavera	3065	-12345	-9280
Estate	1275	-6222	-4947
Totale	11678	-88490	-76811

L'apporto maggiore del trasporto si osserva nei mesi compresi tra Ottobre e Marzo, ovvero quando le onde sono mediamente più alte. Il trasporto medio annuo nella zona presa in esame risulta essere dunque pari a circa 80.000 m³/anno diretti verso Sud.

CONCLUSIONI

Nella tesi sono stati implementati due modelli, uno riguardante il trasporto solido longitudinale e uno per la valutazione del trasporto solido trasversale.

Il modello per il trasporto solido long – shore è in grado di prevedere, in base al clima ondoso, il trasporto e la sua distribuzione in direzione trasversale nel lungo periodo.

Attraverso il secondo modello è possibile valutare invece l'effetto di una singola mareggiata e in generale l'azione del moto ondoso a breve termine su una spiaggia; esso permette inoltre di stimare il rimodellamento del profilo per assegnate condizioni meteo marine. Esso appare adatto a studiare l'evoluzione di spiagge tipiche dell'Alto Adriatico poiché prevede anche l'accrescimento. Quest'ultimo modello risulta essere fortemente influenzato da diversi parametri caratteristici quali il diametro medio, la dissipazione d'equilibrio, l'indice di frangimento che quindi andrebbero valutati con più precisione per poter riprodurre al meglio sia la fase erosiva che quella accrescitiva.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri di questo lavoro si ritiene che i due modelli siano adeguati ad essere integrati in un modello di evoluzione morfologica della linea di riva del tipo a due linee, ovvero formato dall'equazione del trasporto e dall'equazione di continuità sia per la linea di riva che per una batimetrica di riferimento.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Danni provocati dalla mareggiata del 16/05/2013 nel litorale di Jesolo (Ve)	9
Figura 1.2 Tendenza evolutiva dei litorali italiani (Atlante delle spiagge italiane).....	10
Figura 2.1 Suddivisione della zona costiera	17
Figura 2.2 Suddivisione di una spiaggia.....	18
Figura 2.3 Esempio di dune litoranee.....	19
Figura 2.4 Evoluzione onda zona costiera.....	20
Figura 3.1 Orbite particelle.....	32
Figura 3.2 Andamento onda irregolare	33
Figura 3.3 Sovrapposizione effetti	34
Figura 3.4 Fenomeno della rifrazione.....	37
Figura 3.5 Tipi di frangimento	41
Figura 3.6 Schema Run - up.....	42
Figura 3.7 Posizioni Frangimento e Riformazione dell'onda.....	44
Figura 3.8 Rappresentazione Altezza d'onda e Set - up.....	46
Figura 3.9 Rappresentazione Altezza d'onda significativa, media e massima	47
Figura 4.1 Suddivisione zone costiere	50
Figura 4.2 Set up e Set Down	55
Figura 4.3 Funzione di forma	59
Figura 5.1 Modalità di trasporto dei sedimenti marini	73
Figura 5.2 Rappresentazione della generazione e del campo di moto di una corrente longshore	75
Figura 6.1 Profilo estivo - Profilo invernale.....	89

Figura 6.2 Risultati sperimentali Sunamura Horikawa Laboratorio	91
Figura 6.3 Risultati sperimentali Sunamura Horikawa in situ	91
Figura 6.4 Definizione schema delle quattro principali zone di trasporto solido.....	95
Figura 6.5 Schema di profilo con riformazione dell'onda.....	96
Figura 6.6 Andamento spaziale portata solida Zona I in fase di erosione.....	98
Figura 6.7 Andamento trasporto solido Zona I in accrescimento	99
Figura 6.8 Andamento portata solida zona IV.....	102
Figura 6.9 Schema processo di Avalanching	107
Figura 7.1 Andamento altezza d'onda e fondale	115
Figura 7.2 Andamento della velocità lungo riva	116
Figura 7.3 Distribuzione del Trasporto calcolato con la formula di Bijker	117
Figura 7.4 Andamento altezza d'onda (0 ore)	120
Figura 7.5 Andamento altezza d'onda (4 ore)	120
Figura 7.6 Andamento altezza d'onda (8 ore)	121
Figura 7.7 Andamento profilo $\gamma = 0,78$	123
Figura 7.8 Andamento profilo $\gamma = 0,9$	125
Figura 7.9 Andamento profilo $\gamma = 1$	127
Figura 7.10 Andamento profilo al variare di Deq	128
Figura 7.11 Profilo iniziale.....	129
Figura 7.12 Profilo Invernale	129
Figura 7.13 Arretramento linea di riva profilo Invernale	130
Figura 7.14 Profilo Estivo.....	131
Figura 7.15 Formazione berma profilo Estivo	131
Figura 7.16 Confronto profilo estivo e profilo invernale.....	132
Figura 8.1 Cortellazzo (Ve).....	135
Figura 8.2 Distribuzione dei punti MEDATLAS nel Mar Mediterraneo	136
Figura 8.3 Ubicazione punto MEDATLAS relativo al paraggio di Cortellazzo	137
Figura 8.4 Profilo iniziale	144
Figura 8.5 Modellamento profilo (Autunno).....	145

Figura 8.6 Distribuzione del trasporto longitudinale (Autunno).....	146
Figura 8.7 Distribuzione cumulata del trasporto longitudinale netto (Autunno).....	146
Figura 8.8 Modellamento profilo (Inverno)	147
Figura 8.9 Distribuzione del trasporto longitudinale (Inverno).....	148
Figura 8.10 Distribuzione del trasporto longitudinale netto (Inverno).....	149
Figura 8.11 Modellamento profilo (Primavera)	150
Figura 8.12 Distribuzione del trasporto longitudinale (Primavera).....	151
Figura 8.13 Distribuzione del trasporto longitudinale netto (Primavera).....	151
Figura 8.14 Modellamento profilo (Estate)	152
Figura 8.15 Distribuzione del trasporto longitudinale (Estate).....	153
Figura 8.16 Distribuzione del trasporto longitudinale netto (Estate).....	154
Figura 8.17 Variazione profilo (Autunno/Inverno)	155
Figura 8.18 Variazione profilo (Primavera/Estate)	155
Figura 8.19 Distribuzione cumulata del trasporto longitudinale diretto verso Nord	157
Figura 8.20 Distribuzione cumulata del trasporto longitudinale diretto verso Sud	158
Figura 8.21 Distribuzione cumulata del trasporto longitudinale totale	159

BIBLIOGRAFIA

- APAT-DIPARTIMENTO TUTELA ACQUE INTERNE E MARINE, “*Atlante delle coste*”, 2003.
- APAT-DIPARTIMENTO TUTELA ACQUE INTERNE E MARINE, “*Atlante delle opere di sistemazione costiera*”, 2007.
- BAYRAM A., LARSON M., MILLER H. C., KRAUS N. C., “Cross - shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements”, 2001.
- BATTJES J. A., JANSSEN J. P. F. M., “*Energy loss and set-up due to breaking of random waves*”, Proceedings of the 16th International Coastal Engineering Conference, pp 569-587., 1978.
- BIJKER E. W., “*Some considerations about scales for coastal models with movable bed*”, 1967
- C. E. R. C., “*Coastal Engineering manual*”, Part I, II, III, IV, V, (Sito web: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>).
- C. E. R. C., “*Shore protection manual*”, Vol. I e II, United States Government Printing Office, 1984.
- C. E. R. C., “*Prediction of eroded versus accreted beaches*”, Technical note, 1988.

- COSTA A., *“Ottimizzazione degli intervalli temporali fra ripascimenti programmati sulla base di un modello di trasporto solido trasversale”*, Università degli studi di Padova, 2011.
- FIERRO G., *“Stato della ricerca sui litorali italiani”*, Università degli studi di Genova, 2004.
- JUNKE GUO, PIERRE Y. JULIEN, *“Discussion of Efficient Algorithm for Computing Einstein Integrals”*, 2006.
- JUNKE GUO, PIERRE Y. JULIEN, *“Efficient Algorithm for Computing Einstein Integrals”*, 2006.
- KRAUS N., LARSON M., *“SBEACH: Numerical model for simulating Storm-Induced Beach Change-Empirical foundation and model development”*, CERC, 1989.
- KRAUS N., LARSON M., *“SBEACH: Numerical model for simulating Storm-Induced Beach Change-Numerical formulation and model test”*, CERC, 1990.
- KRAUS N., LARSON M., *“SBEACH: Numerical model for simulating Storm-Induced Beach Change-Representation of Nonerodible (Hard) Bottoms”*, CERC, 1998.
- GIORDANO L., *“Modellazione numerica dei fenomeni di trasporto solido costiero”*, 2005.
- MARTINELLI L., LAMBERTI A., *“Trasporto solido lungo costa in presenza di barriere”*, 1996.
- MATTEOTTI G., *“Lineamenti di Costruzioni Marittime, 3a edizione”*, Edizioni Progetto Padova, 2004.
- ROSATI J., WISE R. A., KRAUS N., LARSON M., *“SBEACH: Numerical model for simulating Storm-Induced Beach Change-User’s Manual”*, CERC, 1993.
- TONTI E., *“Introduzione elementare al metodo degli elementi finiti”*.

- SMITH E. R. , *“Longshore Sediment Transport Rate Calculated Incorporating Wave Orbital Velocity Fluctuations”*, US Army Corps of Engineers, 2006.
- SVENDSEN A., *“Introduction to nearshore hydrodynamics”*, World Scientific, 2006.
- WISE R. A., SMITH S. J., LARSON M., *“SBEACH: Numerical model for simulating Storm-Cross - shore transport under random waves and model validation with supertank and field data”*, CERC, 1996.