COMUNE di SANREMO

PROGETTAZIONE RELATIVA AGLI INTERVENTI DI DIFESA E RIPASCIMENTO DEL LITORALE COMPRESO TRA PIAN DI POMA ED IL LIDO FOCE ODCP N. 558/2018.

CIG: 827861620B



PROGETTO DEFINITIVO ED ESECUTIVO

PROGETTAZIONE MARITTIMA
Relazione morfodinamica

CODICE ELABORATO: | P | E | A | 1 | 3 | 1 | V | I | I | I | 2 | 0 | 0 | 0 | P | M | R | E | L | 0 | 4 | A |

SCALA -

CAPOGRUPPO

HYpro srl — ARTEC ASSOCIATI S.r.l. — DI LIETO & C. S.R.L. SERVIZI DI ARCHEOLOGIA ED APPLICAZIONI TECNOLOGICHE PER I BENI CULTURALI ED IL RILIEVO — BIOL. A. NICASTRO

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Vincenzo Secreti

GEOLOGO:
Dott. Geol. Giuseppe Cerchiaro

CSP:
Ing. Vincenzo Ferreri

COORDINAMENTO UNITA' DI PROGETTAZIONE

PROGETTAZIONE IDRAULICA - MARITTIMA	Ing. M. Brocato (AA)
PROGETTAZIONE IDRAULICA - FLUVIALE	Ing. V. Secreti (HY)
STRUTTURE	Ing. G. Civitate (HY)
AMBIENTE E PAESAGGIO	Ing. V. Bonifati (HY)
GEOLOGIA	Geol. G. Cerchiaro (HY)
MONITORAGGI GEOTECNICI	Geol. A. Grispino (HY)
MONITORAGGI AMBIENTALI	Geol. G. Pettinato (HY)
GEOTECNICA	Ing. F. Conte (HY)
CANTIERIZZAZIONE E GESTIONE TERRE	Ing. F. Cocchiero (HY)
STIME E CAPITOLATI	Ing. A.A. Barbagallo (AA)
RILIEVI E INDAGINI	Ing. R. Anastasi (AA)
ARCHEOLOGIA	Dott. M. Di Lieto (DL)
BIOLOGIA MARINA	Dott. A. Nicastro (AN)
PROGETTAZIONE BIM	Ing. R. Nucci (HY)

VISTO DELLA COMMITTENZA:

IL Responsabile Unico del Procedimento
Ing. Danilo Burastero

IL Dirigente del Settore Lavori Pubblici
Ing. Danilo Burastero

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	DIC. 2020	PRIMA EMISSIONE	O. CARUSO	G. CERCHIARO	V. SECRETI

SOMMARIO

1 PREMESSA ____ 2
2 ASPETTI GENERALI DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO ____ 2
3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENCADE ____ 3
3.1 CARATTERISTICHE DEL MODELLO GENCADE ____ 6
4 CARATTERISTICHE DEL MODELLO X-BEACH ____ 8
5 CLIMA ONDOSO DI INPUT ____ 9
6 CALIBRAZIONE DEL MODELLO GENCADE ____ 13
7 SIMULAZIONI DELL'EVOLUZIONE FUTURA DELLA LINEA DI RIVA ____ 15
7.1 SCENARIO A: EVOLUZIONE DELLO STATO ATTUALE ____ 16
7.2 SCENARIO B: EVOLUZIONE IN PRESENZA DI N.2 PENNELLI E RIPASCIMENTO PREVISTO DA PROGETTO 17
8 TARATURA DEL MODELLO X-BEACH ____ 19
9 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE CON IL MODELLO X-BEACH ____ 19
9.1 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 2 ____ 20
9.2 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 4 ____ 22
9.3 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 6 ____ 23
9.4 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 8 ____ 25
10 IL FRANGIMENTO ____ 26
11 DIMENSIONAMENTO DEL PIEDE SOMMERSO DELLA SPIAGGIA ____ 29

1 PREMESSA

Il presente studio riguarda la modellazione morfodinamica di un tratto litoraneo che ricade nel comune di Sanremo (IM). Verrà condotta una analisi a lungo termine, mediante l'analisi delle linee di riva con il software GENCADE, e un'analisi a breve termine, mediante l'analisi dei profili di spiaggia con il software X-Beach. Nella Figura 1.1 è evidenziata l'ortofoto dell'area in esame.



Figura 1.1 Ortofoto del tratto costiero in esame di Snremo

La determinazione dell'andamento temporale di un litorale, previa apposita taratura effettuata attraverso un modello numerico di morfodinamica costiera, rappresenta una base fondamentale nella conoscenza della sua dinamica evolutiva e nella eventuale progettazione di interventi di difesa costiera nei riguardi dell'erosione. Ai fini di una corretta modellazione della morfodinamica del litorale e dei possibili interventi di difesa dall'erosione dell'area in esame, risulta essenziale la definizione del clima meteomarino medio sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti e dell'evoluzione storica plano-altimetrica della fascia attiva di spiaggia. La determinazione di queste grandezze risulta l'input per la modellazione futura dell'evoluzione della linea di riva al fine di capirne i possibili interventi atti a contrastare possibili erosioni di spiaggia.

2 ASPETTI GENERALI DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO

L'aspetto preminente nella dinamica di un litorale è l'insieme dei fenomeni che determinano il movimento dei sedimenti nella parte attiva della spiaggia. Tali movimenti sono imputabili all'azione del vento e delle maree nella spiaggia emersa; la dinamica della spiaggia sommersa è legata, invece, all'azione del moto ondoso (prima e dopo il frangimento) e delle correnti generate dalla trasformazione del processo di moto da oscillatorio a traslatorio. Il moto ondoso determina l'inizio del movimento e la messa in sospensione delle particelle di sabbia, mentre le correnti ne costituiscono il veicolo di trasporto. Queste ultime sono principalmente quelle associate alle onde frangenti, mentre quelle di circolazione generale, di vento e di marea o di densità, hanno scarsa importanza nei riguardi del trasporto solido litoraneo, come visto precedentemente.

Il trasporto dei sedimenti avviene per movimento sia di fondo sia in sospensione e ha componenti trasversali e longitudinali alla linea di riva; si parla così, rispettivamente, di trasporto cross-shore e trasporto long-shore.

Queste due componenti, pur influenzandosi a vicenda, non possono essere studiate contemporaneamente perché si è in grado di caratterizzare il flusso d'energia, al quale sono legate, esclusivamente in maniera ortogonale al fronte d'onda.

Il trasporto long-shore è quello che si verifica in direzione parallela alla linea di riva. Il meccanismo delle correnti long-shore è influenzato direttamente dalla batimetria della spiaggia. Esse sono generate dalle componenti del moto ondoso che raggiungono obliquamente la costa e il valore della velocità con cui scorrono parallelamente alla linea di riva dipende principalmente dall'angolo che il fronte d'onda (al frangimento) forma con la linea di riva. L'entità del flusso della corrente così come l'entità del trasporto long-shore dipendono, poi, dall'altezza del frangente. Le alterazioni che la linea di riva subisce a causa di questo tipo di trasporto sono visibili esclusivamente nel lungo periodo.

Il trasporto cross-shore interferisce, invece, più rapidamente con i cambiamenti della linea di riva e del profilo di spiaggia. I movimenti trasversali della linea di riva sono all'origine delle caratteristiche tipiche delle spiagge nelle diverse stagioni.

La morfologia della costa è sempre il risultato di due azioni concomitanti: l'apporto di sedimenti dall'entroterra e la loro ridistribuzione a opera del moto ondoso.

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio consiste nella possibilità di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali. Il modello matematico utilizzato, per l'analisi a lungo termine, per questo studio è il GenCade, prodotto dall'US Corps of Engineers (U.S.A)., mentre per l'analisi a breve termine il modello utilizzato è X-Beach (eXtreme Beach) che è un programma open-source per lo studio dell'impatto di eventi estremi di moto ondoso su spiagge, che rientra nel Progetto Morphos-3D avviato dall'USACE-ERDC (Engineer Research and Development Center – U.S. Army Corps of Engineers).

3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENCADE

Il GenCade rappresenta un sistema di modellazione numerica sviluppato per simulare i cambiamenti a lungo termine della spiaggia e consente la simulazione dell'evoluzione della linea di riva e quindi della fascia costiera direttamente modellata dall'azione del moto ondoso.

L'area che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un km a una decina di km, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva possono variare da qualche giorno alle decine di anni. Nell'applicazione del modello GenCade, il tratto modellato viene riportato in un sistema di riferimento cartesiano, ruotato di 180° rispetto alla configurazione originale e suddiviso in una serie di celle tramite una griglia di calcolo di maglia pari a 5 m. I periodi delle presenti simulazione sono pari a 3 anni (per la taratura del modello, dal 2013 al 2016) e di 10 anni (per l'evoluzione del litorale con e senza opere, ovvero dal 2021 al 2030), con dati d'onda (stati di mare medio annui sottocosta, alla batimetrica -10 m) a intervalli temporali di 1 ora.

Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e la sua variazione nello spazio è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che la forma del profilo di spiaggia in direzione perpendicolare alla linea di riva si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra. Di seguito viene illustrato in Figura 3.1 una vista tridimensionale del volume di controllo considerato dal modello GenCade per svolgere tale analisi e nella Figura 3.2 quella planimetrica dall'alto; viene indicato con D_b i massimi livelli idrici sulla spiaggia emersa, con D_c la profondità di chiusura e con $\triangle y$ l'avanzamento, o arretramento, della linea di riva. Tale schematizzazione del volume di controllo si adotta per tutta la lunghezza del litorale di studio, discretizzato in celle di dimensione $\triangle x$.

In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia per unità di lunghezza può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso. Con

questa ipotesi, l'evoluzione del litorale può essere descritta attraverso un'unica linea, ossia la linea di riva.

Una seconda ipotesi geometrica assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale, ovvero la componente longitudinale del trasporto solido litoraneo rimane confinata entro una fascia costiera ("fascia attiva") ed è predominante a lungo termine rispetto alla componente trasversale.

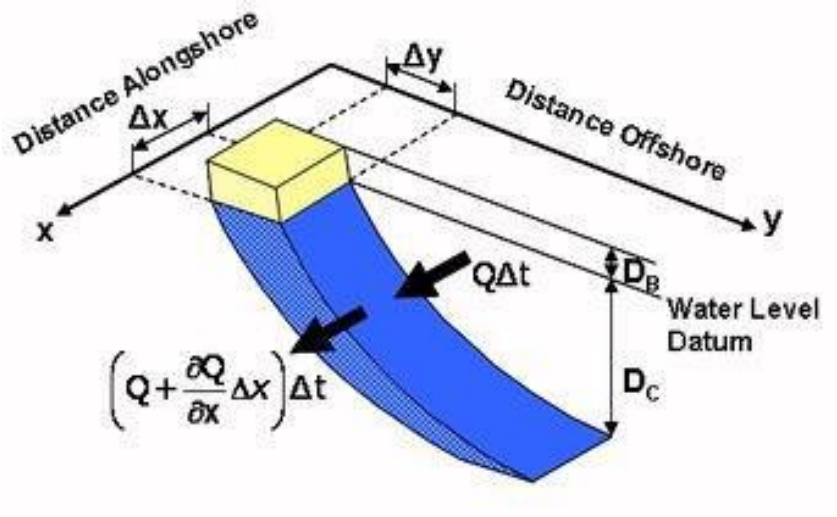


Figura 3.1 Vista tridimensionale del volume di controllo secondo GenCade

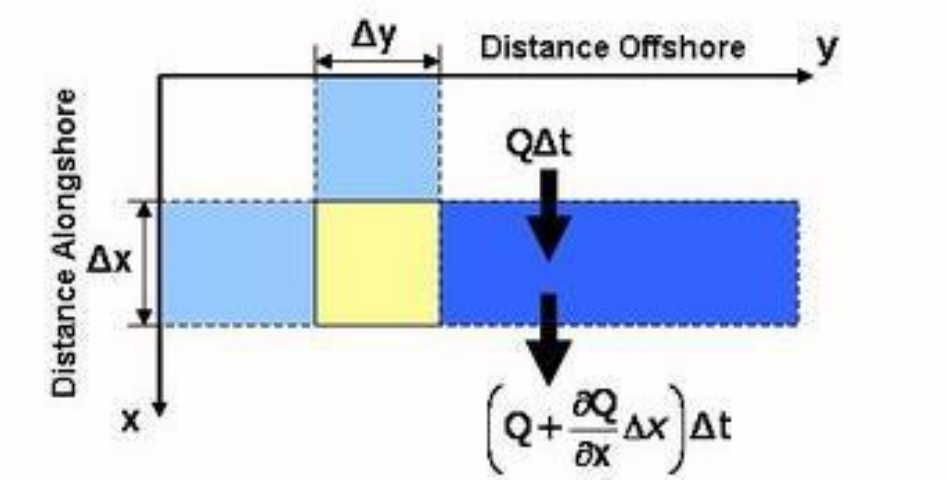


Figura 3.2 Vista planimetrica del volume di controllo secondo GenCade

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento ai simboli della Figura 3.3, può essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{1}{(D_b+D_c)}\left(\frac{\partial Q}{\partial x}-q\right)=0$$

dove Q rappresenta il trasporto solido longitudinale e q la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.

Il trasporto solido longitudinale viene determinato in funzione delle caratteristiche dell'onda al frangimento, della granulometria dei sedimenti e dell'eventuale presenza di opere. È per questo motivo che il modello può essere applicato ad aree costiere per le quali il trasporto solido litoraneo è indotto essenzialmente dall'azione delle

correnti connesse alle onde di superficie, mentre può ritenersi trascurabile l'effetto delle correnti di marea o di correnti collegate all'azione diretta del vento.

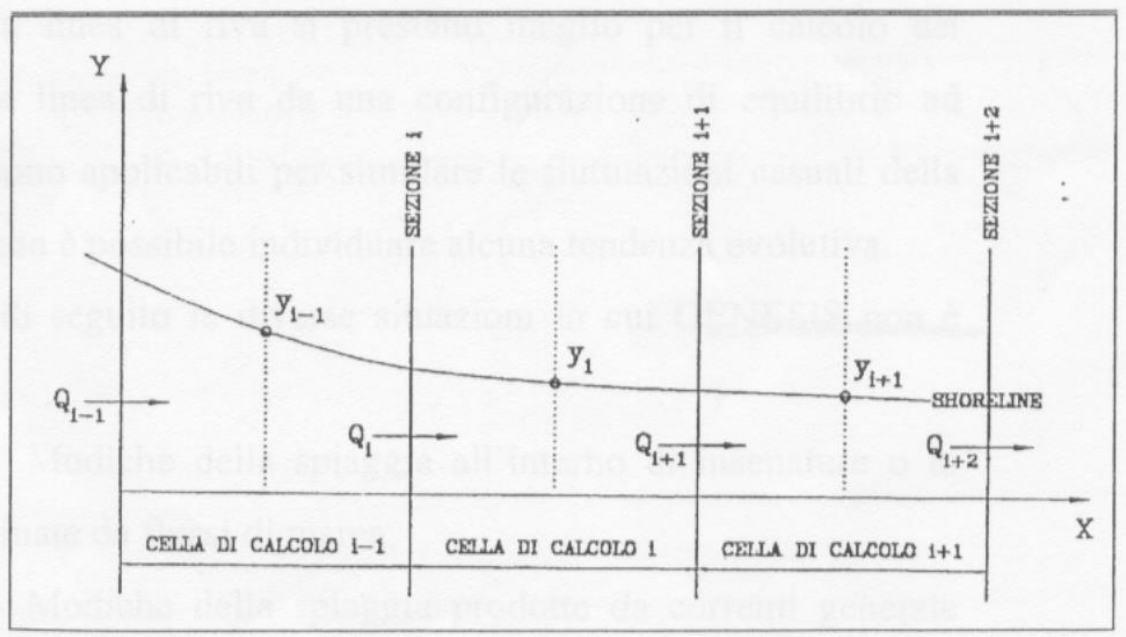


Figura 3.3 Discretizzazione della linea di riva e definizione delle celle di calcolo nel modello GenCade

La formula empirica per il calcolo del trasporto longitudinale nel GenCade è la seguente:

$$Q = \left(H^2{}_b \; c_{gb}\right)\left[a_1 sen(2\theta_{bs}) - a_2 \cos(\theta_{bs})\frac{\partial H_b}{\partial x}\right]$$

dove il pedice *b* è riferito alla condizione di frangimento, H_b è l'altezza significativa dell'onda incidente, θ_{bs} è l'angolo di incidenza rispetto alla normale al litorale nella sezione e c_{gb} la celerità di gruppo. I coefficienti a_1 e a_2 sono funzioni dei due coefficienti K_1 e K_2, che sono i coefficienti di calibrazione del modello e si determinano attraverso un procedimento di taratura dipendente dal particolare sito in esame.

Il primo termine della formula per il calcolo del trasporto longitudinale corrisponde alla nota formula CERC e tiene conto del trasporto di sabbia lungoriva indotto dalle onde frangenti incidenti obliquamente. Il secondo termine dell'equazione descrive, invece, l'effetto del gradiente lungoriva dell'altezza dell'onda al frangimento $\partial H_b/\partial x$. Il contributo del gradiente lungoriva dell'altezza dell'onda è solitamente trascurabile rispetto al contributo dovuto all'incidenza delle onde oblique in una situazione di costa aperta. Tuttavia, nella vicinanza di strutture, dove la diffrazione produce una sostanziale modifica nell'altezza d'onda al frangimento, l'aggiunta del secondo termine fornisce risultati migliori nella modellazione.

I coefficienti a_1 e a_2 hanno le seguenti espressioni:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(s-1)(1-n)(1.416)^{2.5}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{2(s-1)(1-n)(\tan\beta)(1.416)^{3.5}}$$

dove *s* indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia e il peso specifico dell'acqua marina, *n* la porosità del sedimento in sito e β la pendenza media del profilo di spiaggia dalla linea di riva alla profondità di chiusura.

L'angolo β viene calcolato per ciascuna mareggiata simulata nel modello ed è ottenuto dalla seguente relazione di Dean:

$$\tan\beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT0}}\right)$$

dove A è il parametro semiempirico di Dean, e D_{LT0} è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale calcolata come:

$$D_{LT0} = (2{,}3 - 10{,}9H_s)\frac{H_s}{L_0}$$

dove L_0 rappresenta la lunghezza d'onda e H_s l'altezza d'onda significativa in acque profonde.

La massima profondità del trasporto lungoriva D_{LT0} viene calcolata dal GenCade per ciascun passo temporale ed è assunta valida per l'intera estensione lungoriva del tratto modellato.

GenCade è anche dotato di un modello interno di trasformazione capace di produrre dalle onde al largo la serie di onde frangenti lungo riva da utilizzare nella valutazione del tasso del trasporto di sabbia. Tale modello è applicabile nel caso di un fondo marino costituito da contorni approssimativamente rettilinei e paralleli. Se nel tratto modellato sono localizzate strutture che producono fenomeni di diffrazione la strategia di risoluzione del modello è di ottenere una prima approssimazione senza tenere conto della diffrazione e poi modificare il risultato considerando i risultati subiti dal campo d'onda per ciascuna sorgente di diffrazione.

Le incognite, omettendo la diffrazione, rimangono tre: l'altezza, la direzione e la profondità dell'onda al frangimento. Le equazioni utilizzate dal modello per la risoluzione del problema sono tre.

L'equazione per il calcolo dell'onda frangente che tiene conto dello shoaling e della diffrazione è:

$$H_b = K_r \cdot K_s \cdot H_{rif}$$

in cui H_b è l'altezza d'onda in punto arbitrario, K_r è il coefficiente di rifrazione, K_s è il coefficiente di shoaling e H_{rif} è l'altezza al largo. I coefficienti sono dati dalla teoria lineare.

L'equazione per il frangimento dell'onda a profondità limitata è data da

$$H_b = \gamma \cdot D_b$$

in cui D_b è la profondità al frangimento e γ è una funzione della ripidità dell'onda in acque profonde e della pendenza media della spiaggia.

La terza equazione utilizzata dal modello è la legge di Snell, che specifica l'angolo di incidenza dell'onda ovvero:

$$(\sin\alpha_b) / L_b = (\sin\alpha) / L$$

in cui α_b e L_b sono l'angolo e la lunghezza d'onda al frangimento e α e L sono le corrispondenti quantità al largo.

Se non ci sono strutture che producono diffrazione, le caratteristiche delle onde non diffratte sono usate come input nelle equazioni del trasporto dei sedimenti. Se, invece, ci sono ostacoli, le altezze e gli angoli delle onde al frangimento sono calcolati nuovamente tenendo conto della diffrazione causata dalle strutture presenti.

3.1 *CARATTERISTICHE DEL MODELLO GENCADE*

I programmi di evoluzione morfologica a "una linea", come il GenCade, per interpretare correttamente i fenomeni di trasporto solido richiedono l'assegnazione di alcuni parametri rappresentativi del sito oggetto di studio. In particolare, le equazioni di corrispondenza fra flusso di energia "long shore" e corrispondente trasporto solido necessitano della definizione di due costanti, precedentemente denominate, K_1 e K_2, che racchiudono tutte le incertezze teoriche dovute alle approssimazioni introdotte nella schematizzazione della realtà con il modello matematico.

Infatti, i dati di letteratura consigliati dagli Autori sono da considerarsi poco attendibili per la realtà delle coste italiane, visto che la tipologia di costa, di mare, di onde e di fondali è estremamente diversa da quella americana, in cui è stato testato il modello.

La taratura è, quindi, un'operazione estremamente delicata e importante e necessita di attenzione nell'esecuzione e nella successiva interpretazione.

La bontà di una simulazione evolutiva della costa dipende essenzialmente dalla bontà della taratura, che non vuol dire necessariamente che la linea di riva calcolata dal programma debba ricalcare perfettamente la linea di riva rilevata (un caso del genere sarebbe più unico che raro), ma che complessivamente riesca a riprodurre qualitativamente le tendenze di evoluzione della battigia.

E' da precisare, infatti, che l'utilizzo dei modelli matematici è di supporto alla progettazione e mai può essere sostitutivo: i risultati vanno sempre e comunque interpretati sulla base dell'analisi dello stato di fatto e, ancora meglio, dell'evoluzione storica, ponderando adeguatamente gli accadimenti passati e i dati di ingresso, sovente affetti da errori. Infatti, gli errori nella modellazione matematica non sono soltanto dovuti a un difetto di interpretazione della realtà da parte delle equazioni matematiche, ma dipendono anche dalla qualità dei dati a disposizione, in particolare dell'andamento della linea di riva e dei valori sottocosta di altezza, periodo e direzione d'onda.

Per quanto riguarda i rilievi della linea di riva, c'è da considerare la fonte del dato, se cartografica (e in questo caso va valutata la scala del disegno), oppure da rilievo su campo. Nel caso della cartografia, bisogna verificare innanzitutto la scala della carta, perché se si considerano scale troppo piccole (1:25000 o 1:50000) c'è il rischio che l'errore grafico (1 mm sulla carta corrisponde a 25 o 50 m nella realtà) renda improponibile il confronto storico, soprattutto se le variazioni non sono eccessive. Nel caso in cui la cartografia sia di scala sufficientemente grande (1:5000 e meglio 1:2000), bisogna verificare precisamente se sia stata adeguatamente georeferenziata, ricercando singolarità che siano immutate nel corso degli anni (case, chiese, o meglio caposaldi I.G.M.I.) e verificandone le mutue distanze. Nel caso di rilievi planoaltimetrici, bisogna verificare sicuramente la posizione dei punti singolari a terra e poi il metodo di calcolo della linea di riva. La linea di riva, infatti, non è la linea di confine fra mare e terra nel momento in cui viene fatto il rilievo, bensì l'intersezione fra la terra e il piano geometrico passante per i punti che si trovano in corrispondenza dello zero geodetico, definito, per l'Italia, dal mareografo di Genova.

I rilievi della spiaggia sommersa sono importanti quanto quelli della linea di riva. Infatti, se si disponesse di una serie storica sarebbe possibile quantificare esattamente l'entità del trasporto solido e definire precisamente la profondità di chiusura della fascia attiva.

In mancanza di questi, si fa riferimento alle relazioni semi-empiriche di letteratura come quella di Dean, noto il solo diametro mediano del terreno costituente la spiaggia, e di Hellermeier per la definizione della profondità di chiusura.

I rilievi batimetrici al largo sono sicuramente le informazioni più difficili da trovare. Queste si possono ricavare essenzialmente dalle carte nautiche, che hanno un tempo di aggiornamento molto lungo. Per fortuna, gli errori introdotti dalle imperfezioni di queste informazioni sono sicuramente poco significativi rispetto agli altri e quindi, a meno di errori macroscopici o di eventi particolari che hanno sconvolto gli abissi, le carte nautiche fornite dall'Ufficio Idrografico e Mareografico dello Stato forniscono sufficienti approssimazioni.

Un set di dati molto difficile da ottenere con l'approssimazione necessaria è quello che si riferisce alla serie storica delle altezze, periodi e direzioni di provenienza delle onde. La difficoltà risiede sia nel ricercare i dati d'onda a largo, ossia onde che non hanno subito trasformazioni per effetto dell'interazione col fondale, sia nel propagare queste correttamente fino al frangimento, in quello spazio in cui subiscono modificazioni di altezza e direzione, per effetto dei fenomeni di shoaling e rifrazione. Un altro errore difficile da quantificare e quindi da correggere si riscontra quando si è in presenza di "anomalie batimetriche".

Una terza fonte di errore sulle onde, da considerare per gli effetti di trasporto solido, risiede nella propagazione delle onde da largo a sottocosta. Senza entrare nel dettaglio, che esula dai contenuti di questo studio, si può dire che la teoria che comunemente si adotta negli studi di idraulica marittima, nota come "teoria lineare", presuppone delle ipotesi di base di difficile realizzazione:

1. onda monocromatica;
2. costanza del periodo dell'onda nella sua propagazione;

3. fondale fisso;
4. attrito sul fondo nullo.

In realtà le onde si propagano in modo diverso, risentono dell'attrito del fondo e subiscono modificazioni per effetto del vento e del frangimento delle piccole onde per raggiunti limiti di ripidità, producendo alterazioni spettrali che vanno a modificare le altezze, i periodi e le direzioni in modo diverso da come previsto dalla teoria lineare.

Il GenCade richiede, come file di input delle onde, che venga definito un clima ondoso che rappresenti un anno "medio". Per anno medio si intende un anno che contenga una sequenza di eventi ondosi che restituiscano valori di energia scaricata sul litorale mediata negli anni di cui si posseggano dati di onde.

Consapevoli di queste imprecisioni che nascono dalla impossibilità di interpretare adeguatamente i fenomeni naturali, si è proceduto alla taratura del modello, verificando che, almeno qualitativamente, i risultati restituiti possano considerarsi soddisfacenti e perfettamente congruenti con i risultati dell'analisi storica.

4 CARATTERISTICHE DEL MODELLO X-BEACH

XBeach è un modello 2DH (depth averaged), in grado di simulare il comportamento di una spiaggia soggetta ad eventi intensi di mareggiata, includendo i fenomeni di erosione della duna, inondazione e formazione di brecce. Il campo di utilizzo di tale modello morfologico è circoscritto in particolare alla scala temporale degli eventi di mareggiata, che in pochi giorni possono causare ingenti fenomeni erosivi della spiaggia. Il suo utilizzo è quindi limitato a scale spaziali relativamente piccole e ad intervalli temporali di breve/medio periodo (giorni/mesi), come descritto da Giardino (2013). Il modello è in grado di risolvere coppie di equazioni orizzontali 2D legate ai fenomeni di propagazione dell'onda, di flusso, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili (spettrali) e di flusso. XBeach tiene conto della variazione temporale dell'altezza d'onda e quindi è in grado di risolvere il moto legato alle long-wave, generato da tale variazione. Il moto dell'azione ondosa per le onde corte viene modellato mediante l'equazione:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial c_x A}{\partial x}+\frac{\partial c_y A}{\partial y}+\frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta}=-\frac{D_w+D_f+D_v}{\sigma}$$

Dove A è l'azione ondosa, c_x , c_y e c_θ sono le velocità di propagazione nello spazio orizzontale e nello spazio direzionale, D_v è la dissipazione legata alla vegetazione e σ la frequenza dell'onda. La formulazione per il calcolo della dissipazione legata al frangimento dell'onda, D_w, può essere scelta tra 5 diverse formulazioni implementate all'interno del software, mentre la dissipazione legata al fondale D_f è calcolata mediante l'equazione:

$$D_f=\frac{2}{3}\rho f_w\left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01}\sinh kh}\right)$$

Dove ρ è la densità dell'acqua, f_w è il coefficiente di attrito al fondo e H_{rms} è l'altezza d'onda quadratica media. Nella formula, T_{m01} rappresenta il periodo medio dell'onda definito dai momenti di ordine zero e uno dello spettro, k è il numero d'onda e h è la profondità.

Xbeach considera l'energia delle onde come mediata sulla loro lunghezza e quindi non è in grado di simulare la forma dell'onda. Tuttavia, quando le onde si propagano dal largo verso riva la loro forma si modifica gradualmente a causa della combinazione dei processi di shoaling, frangimento e non-linearità. All'interno del modello l'effetto dell'asimmetria e della distorsione dell'onda viene considerato all'interno della equazione di avvezione-diffusione mediante il calcolo della velocità ua.

La formulazione per il trasporto sedimentario è quella definita da Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997; van Rijn, 1985) mentre la concentrazione di equilibrio è calcolata come segue:

$$C_{eq}=max\left(\min\left(C_{eq,b},\frac{1}{2}C_{max}\right)+\min\left(C_{eq,s},\frac{1}{2}C_{max}\right),0\right)$$

Il sistema di coordinate su cui si basa il modello è caratterizzato dall'asse delle ascisse con orientamento verso la costa e l'asse delle ordinate orientato lungo riva. Il modello utilizza una griglia di calcolo sfalsata, nella quale alcune variabili vengono definite al centro delle celle e altre sulle loro interfacce. XBeach permette di utilizzare una griglia con distanze tra i punti variabili in entrambe le direzioni. Il modello può essere utilizzato in modalità "idrostatica" e "non-idrostatica"; nel primo caso, la variazione dell'ampiezza delle onde corte viene risolta in maniera separata dalle onde lunghe, dalle correnti e dalle variazioni morfologiche mentre nel secondo caso, tali processi vengono risolti includendo l'azione delle onde corte, a discapito del maggiore costo computazionale. Inoltre, XBeach può essere utilizzato in modalità mono-dimensionale (1D) e bi-dimensionale (2D). Nel primo caso il dominio spaziale è limitato al singolo transetto perpendicolare a riva, mentre nel secondo è possibile eseguire simulazioni su aree costiere più estese. La scelta tra le due diverse modalità dipende, in particolare, dallo scopo dell'analisi, in riferimento ai fenomeni da studiare e al compromesso che si vuole raggiungere tra il costo computazionale del modello e la precisione richiesta nei risultati. Per maggiori dettagli sulle formulazioni del modello XBeach, si faccia riferimento a Roelvink et al., (2009).

5 CLIMA ONDOSO DI INPUT

Le forzanti ondametriche, da inserire in input nei modelli considerati sono state ricavate a partire dai risultati contenuti nella Relazione del clima meteomarino.

In particolare, il modello GenCade richiede come file di input per effettuare la simulazione della linea di riva i dati del clima meteomarino medio annuo sottocosta. Tali dati vengono definiti considerando le frequenze di apparizione del clima meteomarino medio sottocosta, classificate secondo classi di altezza d'onda significativa H_s pari a 0.5 m, escludendo le calme (H_s < 0.25 m), e classi di direzione di provenienza del moto ondoso, Dir, pari a 10°, all'interno del settore di traversia di Sanremo. Il clima meteomarino medio annuo sottocosta è pari al prodotto della frequenza di apparizione della classe di moto ondoso considerata per il numero di ore presenti in un anno medio, ossia 8760.

In seguito, per ogni singola classe avente un valore di H_s maggiore di 0.25 m si considera il valore medio di H_s e Dir. Inoltre, si calcola per ognuna di esse il periodo di picco T_p dalla legge di correlazione altezza-periodo H_s-T_p (vedi, per dettagli, la relazione dello studio meteomarino) e la direzione media della classe, ruotata considerando la convenzione angolare del modello GenCade. Per poter determinare tale direzione, in primo luogo bisogna ruotare la direzione media normale alla linea di riva di un'angolazione pari a 180°.

Infine, secondo la convenzione di un osservatore posto sulla costa che guarda verso il largo, la direzione di provenienza $\alpha_{GenCade}$ delle onde (positiva o negativa, e compresa fra -90° e +90° rispetto alla direzione d'osservazione) da dare al modello, così come schematizzato in Figura 5.1, si basa sulla direzione normale al litorale $\alpha_{normale}$, pari a 360°N nel caso in esame, e sulla direzione secondo il Nord Cartografico $\alpha\ (°N)$, in base alla relazione:

$$\alpha_{GenCade} = \alpha_{normale} - \alpha(°N)$$

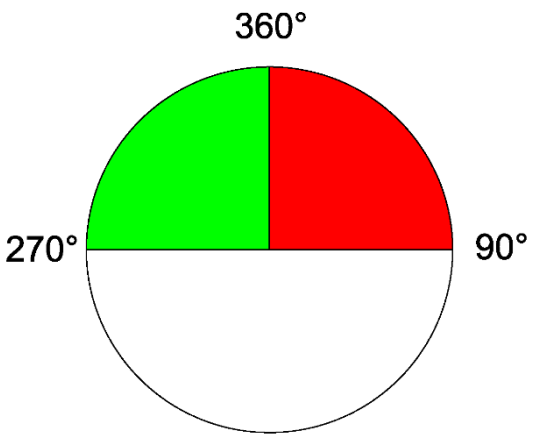


Figura 5.1 Convezione angolare della direzione del moto ondoso medio annuo secondo GenCade (lato sinistro in verde per i valori positivi, lato destro in rosso per i valori negativi)

Nella successiva Tabella 1 vengono mostrati i dati di input delle caratteristiche del clima meteomarino medio annuo sottocosta da inserire nel GenCade, In seguito, tali dati sono stati randomizzati grazie ad un codice di calcolo compilato in ambiente Matlab.

Tabella 1: Dati di input delle caratteristiche del clima meteomarino medio annuo sottocosta per il GenCade

numero di apparizioni	H_s (m)	T_p (s)	Dir GenCade (°)
9309	0.16	4.5	83.7
4701	0.33	5.58	73.37
1230	0.54	6.32	66.84
202	0.76	6.91	62.59
21	1.03	7.4	59.36
5	1.27	7.83	57.15
6702	0.24	4.5	82.11
3044	0.47	5.58	73.16
754	0.72	6.32	67.07
181	0.97	6.91	62.94
42	1.27	7.4	59.57
4	1.54	7.83	57.3
6440	0.32	4.5	78.96
2327	0.6	5.58	71.26
665	0.88	6.32	65.85
163	1.16	6.91	62.06
26	1.47	7.4	58.78
7	1.75	7.83	56.58
4584	0.38	4.5	74.33
1425	0.7	5.58	67.68
490	1	6.32	63.01
202	1.3	6.91	59.67
26	1.62	7.4	56.65
10	1.91	7.83	54.62
1	2.25	8.21	52.52
4431	0.43	4.5	68.04
1336	0.77	5.58	62.36
409	1.09	6.32	58.35
120	1.4	6.91	55.51
42	1.74	7.4	52.91
17	2.03	7.83	51.14
5	2.38	8.21	49.26
1	2.7	8.56	47.84
3718	0.45	4.5	60.51
824	0.82	5.58	55.77
223	1.16	6.32	52.43
90	1.48	6.91	50.08
38	1.83	7.4	47.94
5	2.13	7.83	46.51
2	2.48	8.21	44.97
1	2.81	8.56	43.82

2469	0.46	4.5	52.07
624	0.85	5.58	48.34
179	1.21	6.32	45.74
105	1.54	6.91	43.91
38	1.91	7.4	42.23
3	2.22	7.83	41.14
1	2.58	8.21	39.98
1830	0.47	4.5	43.13
443	0.88	5.58	40.46
116	1.25	6.32	38.58
53	1.6	6.91	37.28
16	1.98	7.4	36.12
4	2.3	7.83	35.36
3	2.68	8.21	34.55
1538	0.48	4.5	33.92
379	0.89	5.58	32.29
110	1.28	6.32	31.15
42	1.64	6.91	30.4
15	2.03	7.4	29.73
3	2.37	7.83	29.31
5	2.76	8.21	28.87
2	3.12	8.56	28.56
2108	0.48	4.5	24.59
498	0.9	5.58	23.99
154	1.3	6.32	23.63
51	1.67	6.91	23.42
22	2.07	7.4	23.26
15	2.41	7.83	23.18
7	2.81	8.21	23.11
3389	0.48	4.5	15.26
848	0.91	5.58	15.7
264	1.3	6.32	16.11
85	1.67	6.91	16.44
31	2.07	7.4	16.77
8	2.41	7.83	17
4	2.81	8.21	17.26
3803	0.48	4.5	6.08
1325	0.89	5.58	7.6
443	1.28	6.32	8.74
201	1.64	6.91	9.58
48	2.03	7.4	10.38
9	2.36	7.83	10.92
1	2.75	8.21	11.51
6420	0.47	4.5	-2.73
2418	0.86	5.58	-0.11
888	1.23	6.32	1.71
371	1.58	6.91	3.02

117	1.96	7.4	4.25
47	2.29	7.83	5.1
16	2.67	8.21	6.03
4	3.03	8.56	6.72
6	3.35	8.88	7.3
1	3.72	9.17	7.94
11867	0.45	4.5	-10.89
4094	0.81	5.58	-7.22
1437	1.15	6.32	-4.64
392	1.48	6.91	-2.8
112	1.85	7.4	-1.12
29	2.16	7.83	0.05
21	2.54	8.21	1.3
6	2.89	8.56	2.24
4	3.21	8.88	3.03
14649	0.41	4.5	-18.13
4044	0.73	5.58	-13.57
1191	1.03	6.32	-10.23
354	1.33	6.91	-7.78
88	1.68	7.4	-5.57
23	1.98	7.83	-4.03
1	2.68	8.56	-1.24
13454	0.36	4.5	-24.11
3514	0.62	5.58	-18.83
1038	0.88	6.32	-14.82
243	1.15	6.91	-11.75
64	1.45	7.4	-9.01
8	1.73	7.83	-7.08
2	2.06	8.21	-5.13
25004	0.28	4.5	-28.64
8996	0.5	5.58	-22.6
3409	0.72	6.32	-18.05
1202	0.94	6.91	-14.5
313	1.19	7.4	-11.35
74	1.43	7.83	-9.11
12	1.73	8.21	-6.91
20528	0.21	4.5	-31.63
12666	0.38	5.58	-24.61
6838	0.55	6.32	-19.61
3455	0.73	6.91	-15.81
1471	0.94	7.4	-12.49
446	1.15	7.83	-10.1
124	1.4	8.21	-7.82
12	1.64	8.56	-6.21
5	1.88	8.88	-4.88

Per l'analisi a breve termine si è considerata una mareggiata con le seguenti caratteristiche:

- Altezza d'onda al culmine della mareggiata pari a: 3.92 m;
- Periodo medio pari a: 6.88 s;
- Periodo di picco pari a: 9.56 s;

La direzione per andare a vantaggio di sicurezza sarà considerata sempre ortogonale al litorale.

Le caratteristiche considerate si riferiscono ad un'onda con tempo di ritorno pari a 50 anni. Infine, sono state considerate 3 diverse durate per la mareggiata, ovvero 6, 12e 24 ore.

6 CALIBRAZIONE DEL MODELLO GENCADE

La taratura è stata effettuata considerando le linee di riva negli ultimi 2 periodi temporali a disposizione, ovvero gli anni 2013 e 2016 (Figura 6.1).



Figura 6.1 Confronto fra la linea di riva del 2013 (in verde) e quella del 2016 (in rosso)

Nella fase di taratura, il modello numerico ha considerato i seguenti input:

- rilievo della battigia in due anni diversi. Per evitare che il modello non dia una simulazione idonea, l'analisi va effettuata su un arco massimo temporale di dieci anni, poiché oltre tale valore potrebbero verificarsi delle modifiche antropiche apportate al litorale;
- clima meteomarino medio annuo in condizione di pre-frangimento sottocosta, deducibili dagli stati di mare propagati sottocosta attraverso il modello SWAN;
- profondità alla quale sono state calcolate le onde sottocosta;
- diametro medio dei sedimenti D50 caratteristico del litorale;
- profondità di chiusura di spiaggia, dedotta dall'analisi del clima meteomarino;
- presenza di eventuali opere di difesa costiera quali pennelli o frangiflutti, conoscendo la distanza dalla riva, la lunghezza e la profondità alla quale si trovano le estremità di tali opere (in questo caso non sono presenti opere);
- conoscenza di eventuali ripascimenti naturali (apporto solido fluviale) o antropici (dragaggi), dove nel caso in esame è stato considero solo il primo tra i due;
- definizione delle celle di calcolo, avendo discretizzato la linea di riva con un passo ⍰x = 5 m.

I file di input per eseguire il modello GenCade sono stati:

- Console1.shi: linea di riva misurata al tempo iniziale t = t_1 (2013) (vedi Figura 6.2);
- Console1.wave: file contenente i dati randomizzati del clima meteomarino medio annuo propagati sottocosta, per tutto l'arco temporale di analisi. Tale file è composto da 5 colonne in cui la prima indica anno/mese/giorno, la seconda l'ora (dati orari), la terza colonna l'altezza d'onda significativa H_s, la quarta il periodo di picco T_p e la quinta la direzione di provenienza del moto ondoso secondo GenCade $\alpha_{GenCade}$.

```
*********************************************
 INITIAL SHORELINE DATA FOR GENCADE:
 110 Offsets - TITLE:Benchmark Case 1: Straight Shoreline No Structures
*********************************************
185.03  189.83  195.59  202.56  208.84  214.90  222.43  229.71  237.14  244.82
252.16  259.49  267.14  274.73  282.72  290.34  297.57  305.36  312.90  320.74
329.93  339.85  347.11  354.17  363.82  373.95  385.06  396.87  408.95  418.65
426.57  434.04  439.00  438.74  437.46  427.67  414.82  401.97  391.27  382.43
378.37  374.04  369.24  364.64  360.20  355.87  352.23  349.88  347.84  345.58
341.88  339.04  337.82  336.63  334.96  333.29  332.11  330.48  328.01  326.38
325.34  324.31  324.23  323.76  323.54  323.47  324.38  325.65  326.55  326.73
325.14  323.55  322.05  318.41  313.58  309.29  302.82  295.87  289.57  283.74
278.22  273.00  268.36  263.71  259.06  254.52  250.85  247.19  243.53  239.09
232.63  225.92  221.65  216.84  211.88  207.65  204.40  200.86  197.05  194.82
192.87  190.06  187.39  185.00  183.70  183.70  183.70  183.70  183.70  183.70
```

Figura 6.2 File Console1.shi relativo alla linea di riva di input del 2011

Osservando la matrice di dati in Figura 6.2, si nota che i dati della linea di riva discretizzata raggiungono la quinta colonna (da sinistra verso destra) nell'ultima riga; tuttavia, GenCade può solo ricevere in input una matrice quadrata di valori, quindi per completarla è stato necessario ricopiare l'ultimo valore nelle celle vuote.

Dopo aver definito i file di input per il modello numerico GenCade, viene effettuata l'analisi morfodinamica impostando nel file Config.gen i dati caratteristici del litorale in esame; in tale file vengono definiti tutti i parametri caratterizzanti del clima meteomarino medio annuo, la morfologia del litorale e l'eventuale presenza di strutture o foci fluviali. Esaminando il codice adottato nel nostro caso di studio, per effettuare la taratura del modello nella sezione FILES viene caricato in input il file Console1.shi contenente i dati geometrici che ricostruiscono la linea di riva del 2013.

Nella sezione successiva, denominata MODEL SETUP, viene impostato il modello di calcolo avente coordinate spaziali bidimensionali espresse in metri. Nelle stringhe di codice SIMDATS e SIMDATE vengono definite: la data di inizio e fine simulazione; essa viene svolta con un passo temporale DT pari a 1 (ogni mezz'ora), mentre K_1 e K_2 rappresentano i parametri di taratura del modello.

Nella sezione WAVES, invece, vengono definiti i fattori di amplificazione dell'altezza d'onda significativa HAMP, della direzione d'incidenza del moto ondoso THETAAMP e della variazione della direzione di incidenza del moto ondoso THETADEL, che sono stati posti pari ad 1 poiché il clima meteomarino medio annuo sottocosta è già stato definito in modo dettagliato nei file di input Console1.wave.

Dopo aver definito i parametri caratterizzanti il dominio di calcolo e la linea di riva, nella sezione BEACH si determinano i parametri necessari a ricostruire la spiaggia attiva, come il diametro medio caratteristico D_{50}, l'altezza della berma sulla spiaggia emersa BERMHT e la profondità di chiusura DCLOS; successivamente, in tale sezione, vengono elencati i parametri che definiscono in che modo la spiaggia può deformarsi sotto l'azione delle forzanti meteomarine, sia per il lato sinistro che destro della stessa (tali parametri sono stati posti pari a zero poiché si ipotizza di avere una *pinned beach*, ossia una spiaggia che non subisce modifiche lungo i tratti laterali del dominio di calcolo). In particolare, per la determinazione del diametro medio dei sedimenti D_{50} da inserire nel GenCade, sono stati effettuati appositi rilievi di campioni di sedimenti della spiaggia e. Dalle analisi delle curve

granulometriche dei sedimenti dedotte lungo la spiaggia del tratto litoraneo in esame, è stato determinato un valore medio del diametro medio dei sedimenti, D_{50}, pari a 17.50 mm.

L'ultima sezione presente nel file in input del GenCade è quella inerente ai possibili ripascimenti che possono avvenire in tale zona (BEACH FILL).

Lo scopo dell'operazione di taratura, come precedentemente anticipato, è stato quello di ottenere i valori dei parametri numerici significativi che permettano di particolarizzare il litorale oggetto di studio.

Nel caso in esame sono state 2 le costanti numeriche che sono state tarate:

- il coefficiente K_1, posto pari a 0.001;
- il coefficiente K_2, posto pari a 0.001;

Il risultato è stato raggiunto attraverso successivi tentativi, procedendo alle simulazioni in modo che, partendo dall'anno 2013, la linea di riva calcolata approssimi al meglio la linea di riva rilevata all'anno 2016. Come si può osservare dalla Figura 6.3 il risultato è risultato essere più che soddisfacente per il tratto litoraneo considerato, andando a riprodurre gli andamenti qualitativi della linea di riva rilevata al 2016. L'errore medio che è stato ottenuto confrontando la linea di riva al 2016 simulata e quella al 2016 rilevata è stato pari al 1.357%. Tale errore medio è risultato essere il più basso rispetto a tutte le altre simulazioni effettuate con differenti valori dei parametri di taratura K_1 e K_2.

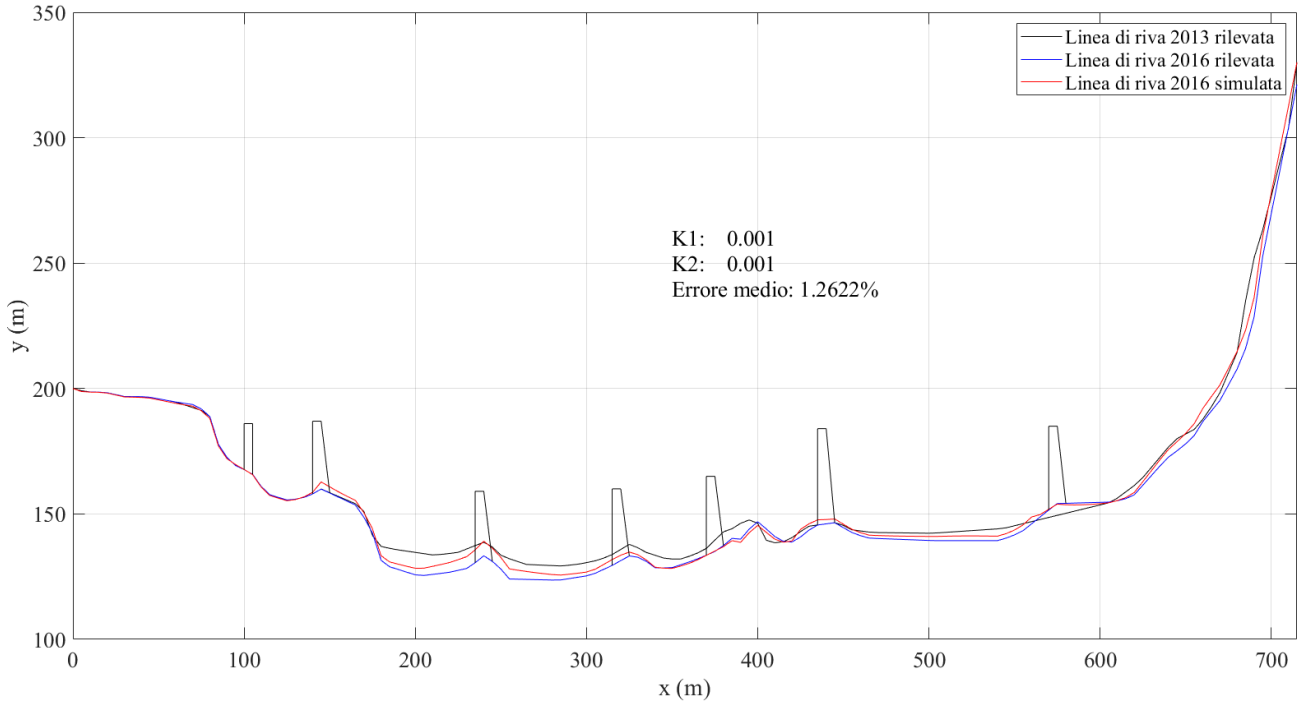


Figura 6.3 Taratura del modello GenCade, con il confronto fra la linea di riva rilevata al 2016 e quella simulata al 2016 dal modello

7 SIMULAZIONI DELL'EVOLUZIONE FUTURA DELLA LINEA DI RIVA

La seconda fase dell'applicazione del modello GenCade ha avuto per obiettivo la simulazione numerica dell'evoluzione futura della linea di riva in uno scenario di previsione a 10 anni (dal 2021 attuale al 2030).

A tal fine è stata considerata sia la configurazione attuale, sia quella relativa allo scenario di "intervento" costituito dalla realizzazione degli interventi di protezione del litorale costituiti da n.2 10 pennelli assieme ad un ripascimento artificiale di circa 30 m. Le simulazioni sono state condotte mantenendo i valori dei parametri di taratura K_1 e K_2 individuati nella fase di calibrazione.

Nel complesso, per le simulazioni numeriche sono stati considerati i seguenti scenari:

- Scenario A: evoluzione dello stato attuale;
- Scenario B: evoluzione in presenza delle opere previste da progetto.

Nel seguito vengono illustrati nel dettaglio i risultati delle simulazioni degli scenari A e B sopra riportati, condotti con il modello numerico GenCade.

7.1 *SCENARIO A: EVOLUZIONE DELLO STATO ATTUALE*

L'evoluzione futura della linea di riva è un'operazione che viene condotta sulla base dei risultati della taratura. Come si è visto in precedenza, infatti, l'operazione di taratura permette di assegnare dei valori nelle equazioni di corrispondenza fra il flusso di energia long-shore e il trasporto solido litoraneo che garantiscono la migliore interpretazione matematica della realtà fisica per il sito in esame e per i dati a disposizione.

L'evoluzione, quindi, permette di prevedere l'andamento futuro della linea di riva, in un orizzonte temporale non superiore ai 10 anni. Il limite temporale dipende sempre dalle imprecisioni numeriche e dalla presenza di errori che aumentano all'aumentare del tempo di simulazione e rischiano di "distruggere" completamente la soluzione.

In Figura 9 viene mostrata la variazione della linea di riva, y (m), dal 2020 al 2030. Osservando la Figura 7.1, le linee di riva nel tratto centrale tendono ad arretrare nel tempo a causa dell'erosione della spiaggia.

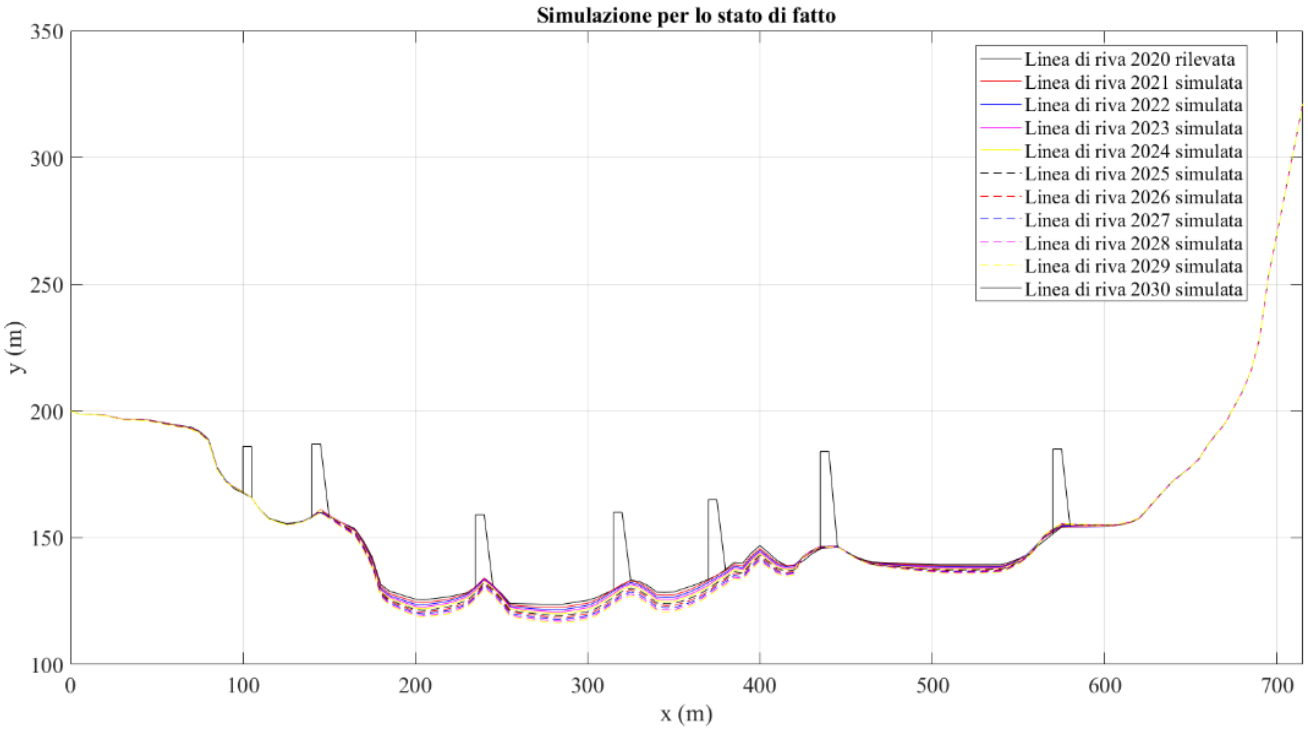


Figura 7.1 Scenario A: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in assenza di opere di difesa costiera (dal 2020 al 2030)

Tali variazioni della linea di riva sono meglio distinguibili dall'analisi delle variazioni relative della linea di riva, dy (m), così come mostrato nella Figura 7.2. I valori di dy negli anni futuri che vanno dal 2021 al 2030 sono calcolati rispetto all'anno di riferimento del 2020.

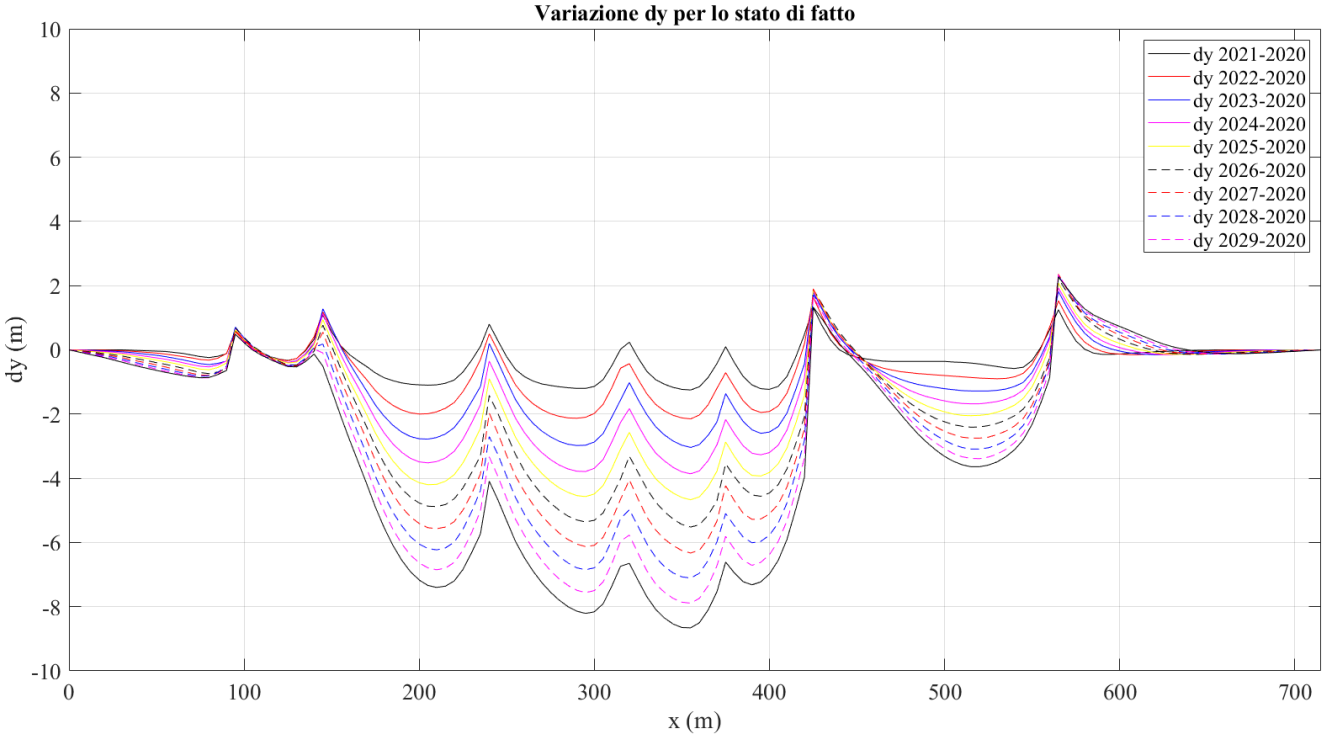


Figura 7.2 Scenario A: Evoluzione della variazione relativa della linea di riva tramite il modello GenCade in assenza di opere di difesa costiera (dal 2020 al 2030)

7.2 *SCENARIO B: EVOLUZIONE IN PRESENZA DI N.2 PENNELLI E RIPASCIMENTO PREVISTO DA PROGETTO*

Il presente scenario evolutivo fa riferimento alla progettazione proposta ed è caratterizzato dalla presenza di interventi di progetto antierosione costituiti dalla realizzazione di 2 pennelli e di un ripascimento artificiale. I pennelli sono opere di difesa costiera con andamento planimetrico ortogonale o leggermente obliquo alla linea di riva. Il principio di funzionamento di questa tipologia di intervento si basa sull'intercettazione del trasporto solido, in modo particolare della componente longitudinale. L'intervento di ripascimento artificiale di un litorale consiste invece nel versamento di un notevole volume di sedimenti di idonea granulometria allo scopo di spostare in avanti la linea di riva. Lo scopo di questa tipologia di intervento combinato è quello di costruire o salvaguardare aree fruibili a scopo turistico e ricreativo e di offrire protezione dall'attacco del moto ondoso.

In Figura 7.3 viene mostrata la linea di riva rilevata al 2020 e le linee di rive simulate col GenCade per gli anni 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029 e 2030 in presenza degli interventi proposti. E' possibile osservare un generale avanzamento della linea di riva in corrispondenza del tratto costiero soggetto all'intervento combinato di difesa dall'erosione.

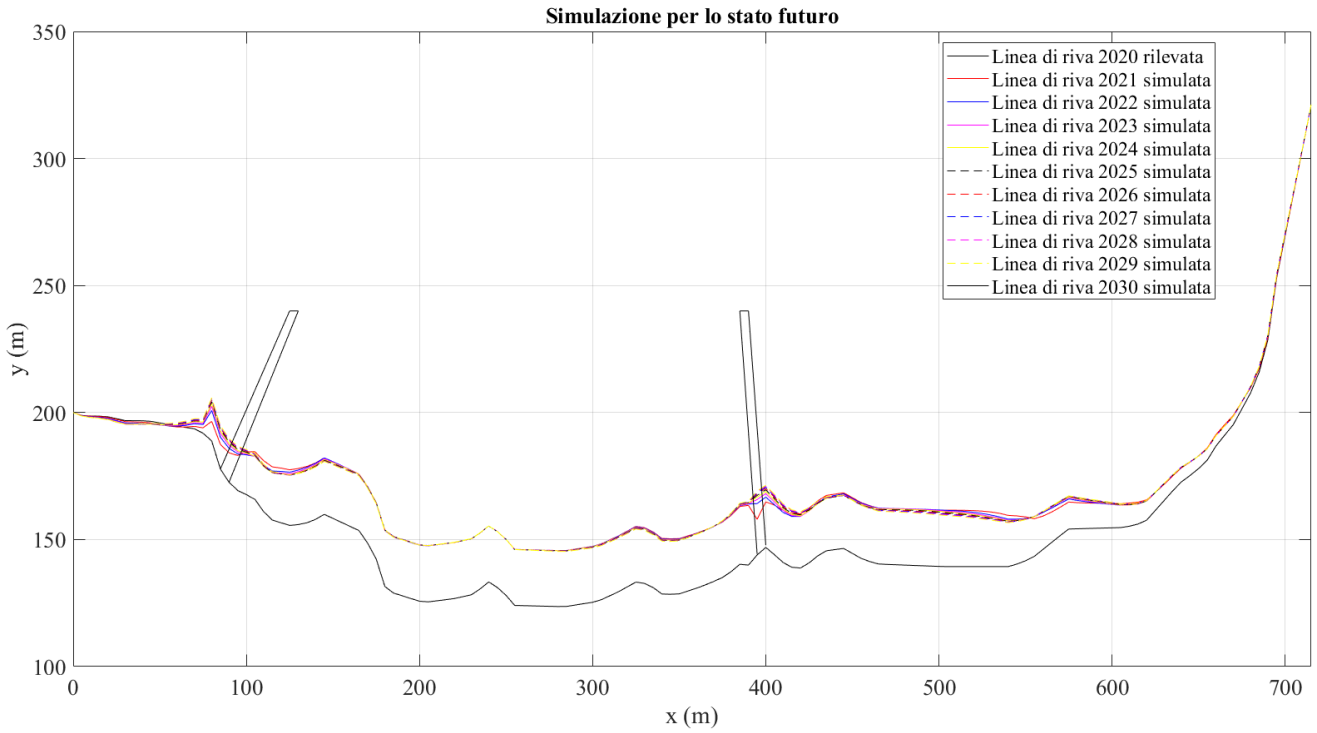


Figura 7.3 Scenario B: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 2 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2030)

La Figura 7.4 è relativa alla variazione relativa della linea di riva (dy), su tutto il litorale in esame, fra la linea di riva al 2020 e la linea di riva agli anni successivi (dal 2021 al 2030) con la presenza dei 2 pennelli e del ripascimento artificiale. L'analisi di tale Figura 7.4 permette una più chiara distinzione e quantificazione delle zone in arretramento e in avanzamento della linea di riva.

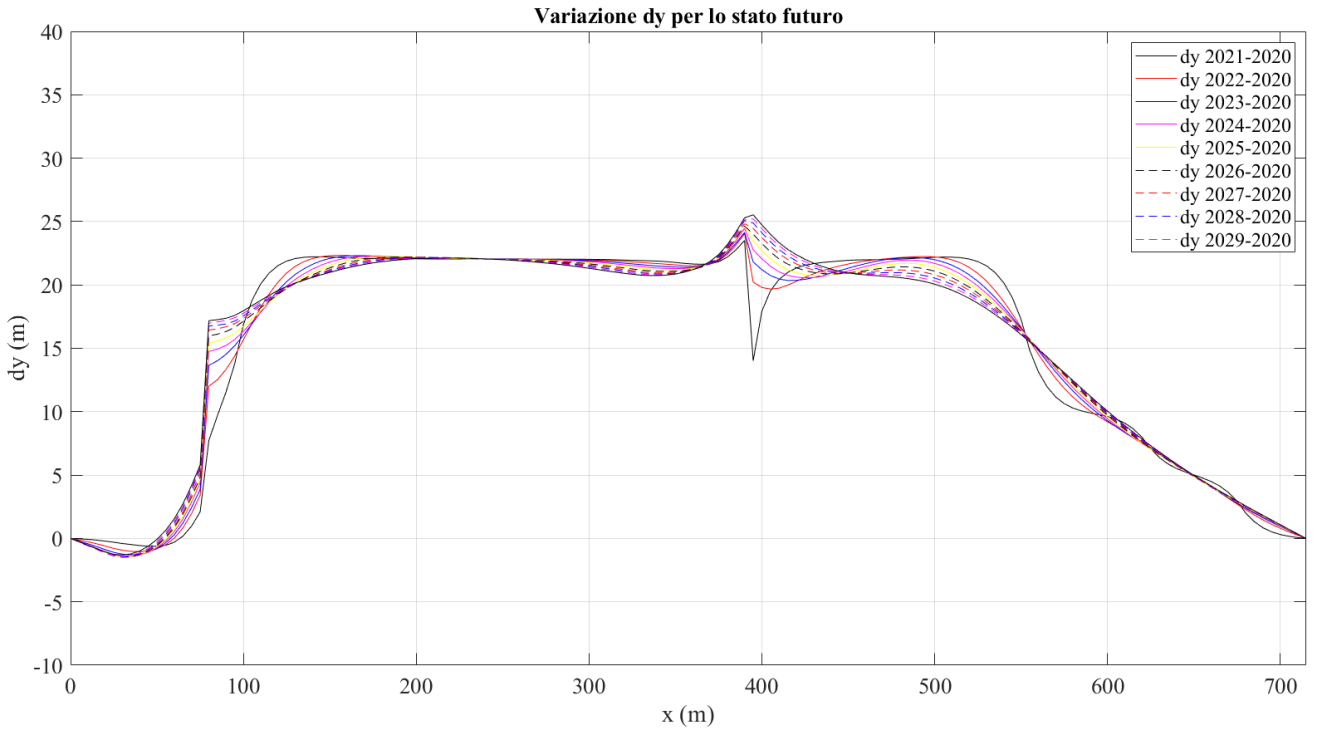


Figura 7.4 Scenario B: Evoluzione della variazione relativa della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 2 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2030)

8 TARATURA DEL MODELLO X-BEACH

Il modello morfodinamico XBeach è stato utilizzato in modalità bidimensionale per simulare il comportamento della spiaggia a livello trasversale, ossia la risposta della spiaggia a breve termine per effetti di fenomeni idrodinamici intensi e a limitata scala temporale quali le mareggiate. XBeach presenta numerosi parametri di input che possono essere variati all'interno del proprio range di valori; tali parametri governano le parametrizzazioni dei fenomeni idrodinamici delle onde corte, delle correnti, del trasporto di sedimenti e della variazione morfologica del fondale.

Per arrivare a una accettabile taratura del modello si è effettuata un'analisi di sensitività "one-at-a-time", ovvero facendo variare per ogni simulazione un solo parametro correlato con i fenomeni morfodinamici.

Pertanto, si sono ottenuti i seguenti risultati riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Parametri di taratura del modello X-Beach

Parametro	Descrizione	Intervallo dei valori	Valore tarato
bedfric	Coefficiente di attrito al fondo	20 - 100	55
cmax	Massima concentrazione dei sedimenti	0.0 - 1.0	0.1
delta	Frazione di altezza d'onda aggiunta alla profondità dell'acqua	0.0 - 1.0	0
eps	Soglia di profondità al di sopra della quale le celle sono considerate bagnate	0.001 - 0.1	0.005
facua	Fattore di calibrazione del flusso legato all'asimmetria e alla distorsione dell'onda	0.0 - 1.0	0.1
fw	Fattore di attrito legato alle onde corte	0.0 - 1.0	0
gamma	Parametro di frangimento	0.4 - 0.9	0.55
hmin	Sogia di profondità sopra la quale sono incluse le correnti di Stokes	0.001 - 1.0	0.2
smax	Massimo parametro di Shields per la concentrazione di equilibrio dei sedimenti	-1.0 - 3.0	-1
umin	Limite di velocità nell'equazione della concentrazione di equilibrio dei sedimenti	0.0 - 0.2	0
wetslp	Pendenza critica di valanga sotto il livello del mare	0.1 - 1.0	0.3
dryslp	Pendenza critica di valanga sopra il livello del mare	0.1 - 2.0	1

9 SIMULAZIONI A BREVE TERMINE CON IL MODELLO X-BEACH

Mediante l'utilizzo di rilievi batimetrici del tratto di spiaggia attiva sono state effettuate le simulazioni numeriche per la determinazione dell'evoluzione a breve termine.

XBeach (eXtreme Beach) è un programma open-source per lo studio dell'impatto di eventi estremi di moto ondoso su spiagge, che rientra nel Progetto Morphos-3D avviato dall'USACE-ERDC (Engineer Research and Development Center – U.S. Army Corps of Engineers) e testato in ambiente oceanico, quindi in condizioni meteomarine differenti da quelle mediterranee. Il modello include il frangimento dell'onda, i processi nelle zone dei frangenti e di battigia, i flussi di acqua e sedimenti sulla spiaggia e lo sbrecciamento (Roelvink, 2009).

Sono stati considerati 4 profili, nella configurazione prevista da progetto, da analizzare ovvero:

- Sezione 2;
- Sezione 4 (pennello);
- Sezione 6;
- Sezione 8 (pennello).

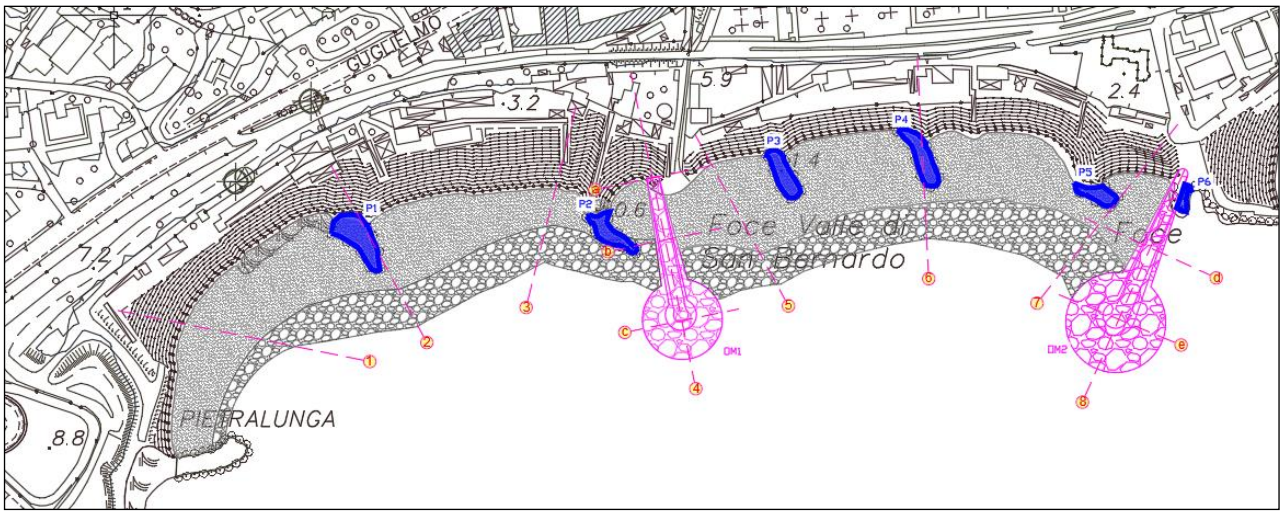


Figura 9.1 Ubicazione sezioni

9.1 *SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 2*

Le simulazioni effettuate per ogni evento di mareggiata considerata, ovvero per le 3 durate di 6, 12 e 24 ore vengono mostrate nelle seguenti figure dove H rappresenta l'altezza d'onda, zs il livello dell'acqua, z_B il profilo di spiaggia a fine simulazione e z_{B0} il profilo di spiaggia a inizio simulazione.

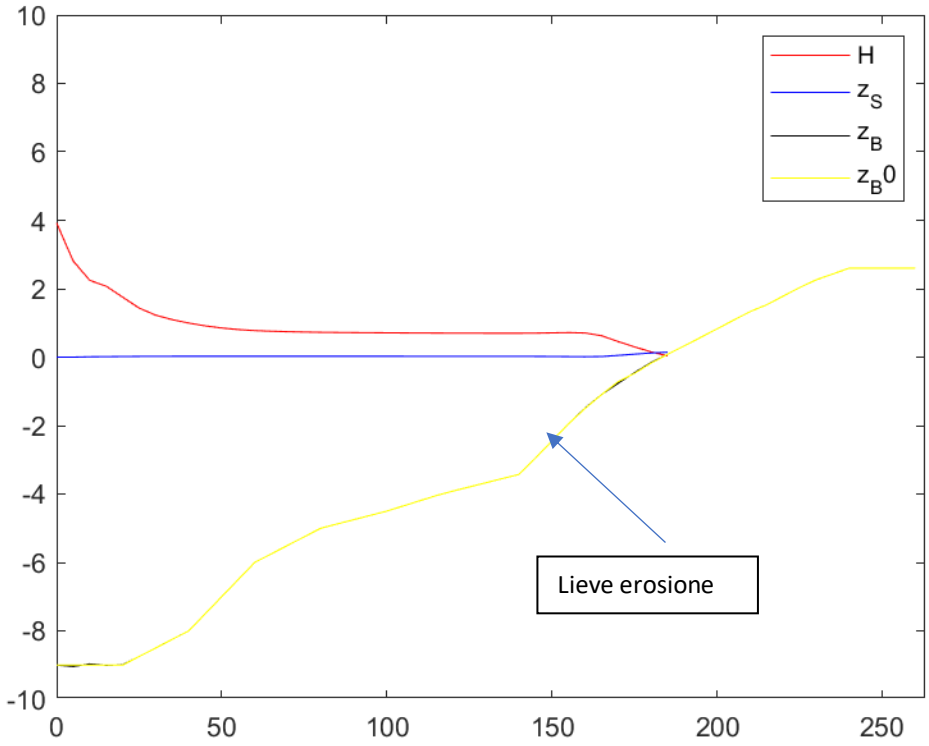


Figura 9.2 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 6 ore.

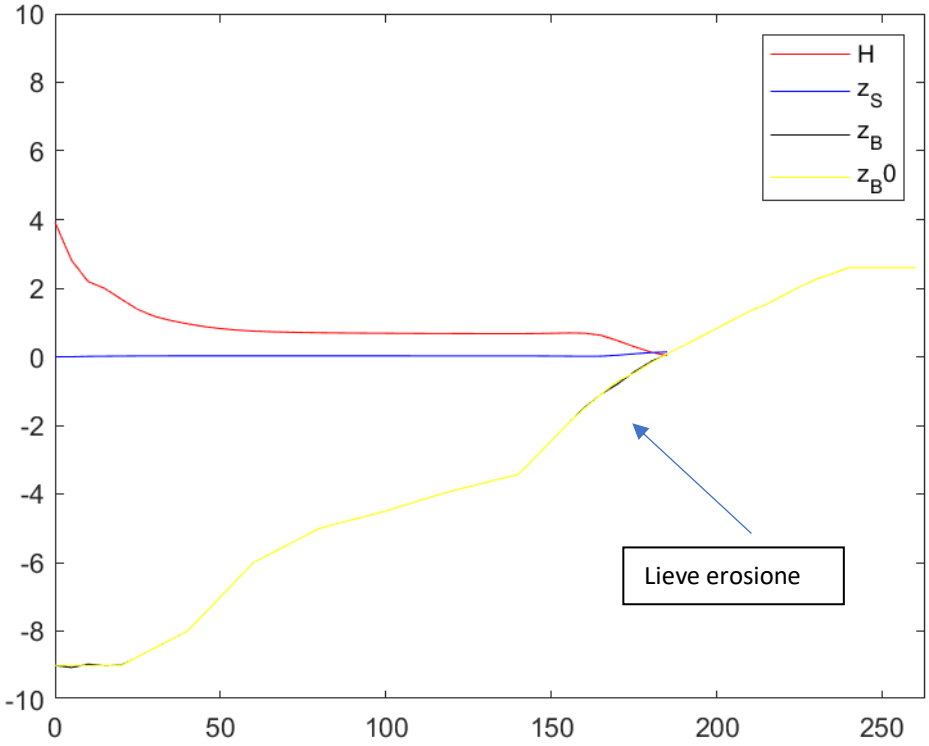


Figura 9.3 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 12 ore.

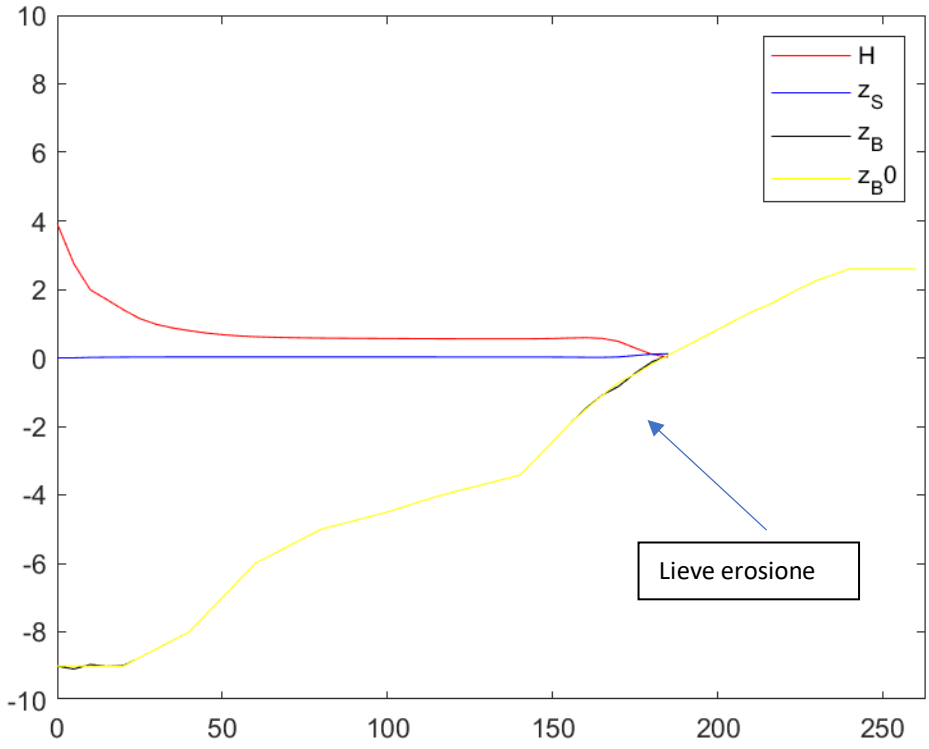


Figura 9.4 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 24 ore.

Dalle figure riportate si mostra come la sezione, anche in caso di mareggiate di 24 ore, non presenti erosioni eccessive. Pertanto, nel breve periodo l'intervento risulta essere stabile.

9.2 *SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 4*

Le simulazioni effettuate per ogni evento di mareggiata considerata, ovvero per le 3 durate di 6, 12 e 24 ore vengono mostrate nelle seguenti figure dove H rappresenta l'altezza d'onda, zs il livello dell'acqua, z_B il profilo di spiaggia a fine simulazione, z_{B0} il profilo di spiaggia a inizio simulazione e n_{ne} il pennello da realizzare.

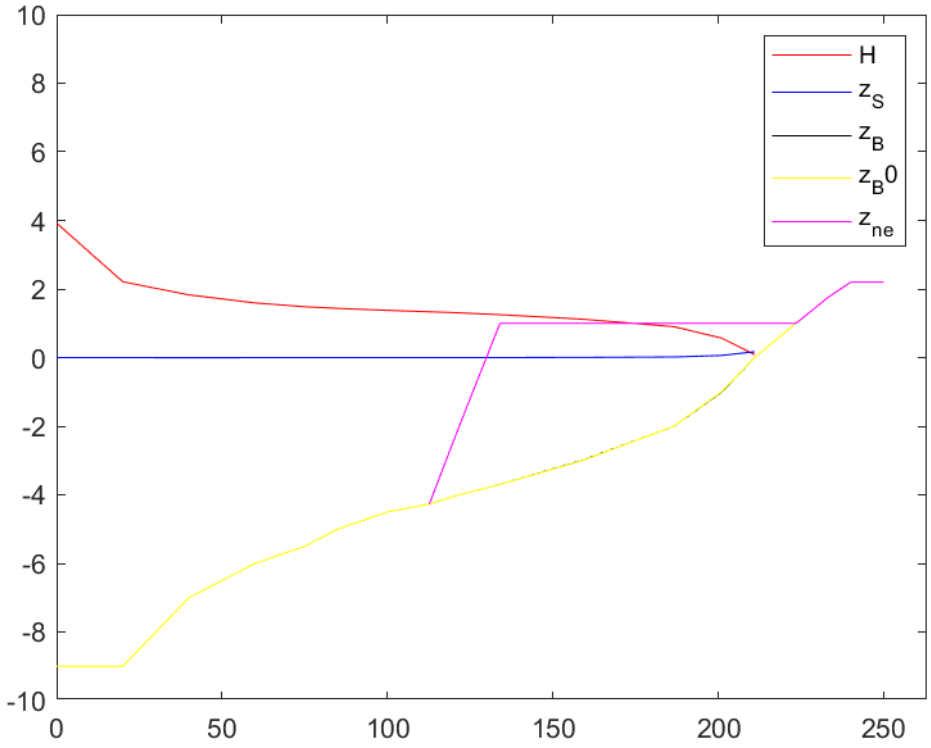


Figura 9.5 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 6 ore

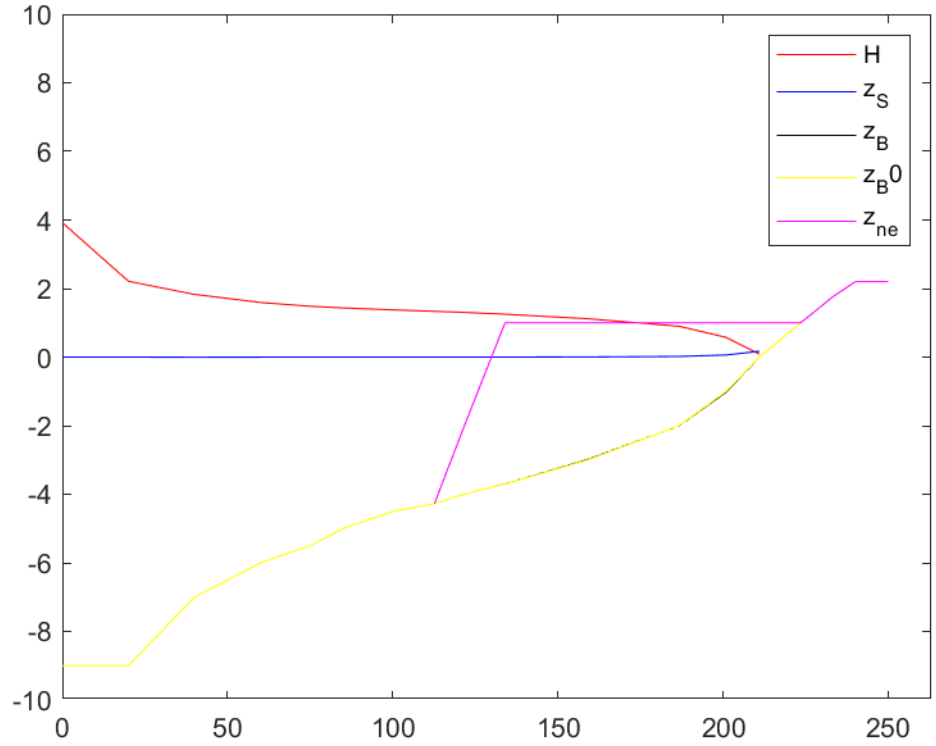


Figura 9.6 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 12 ore.

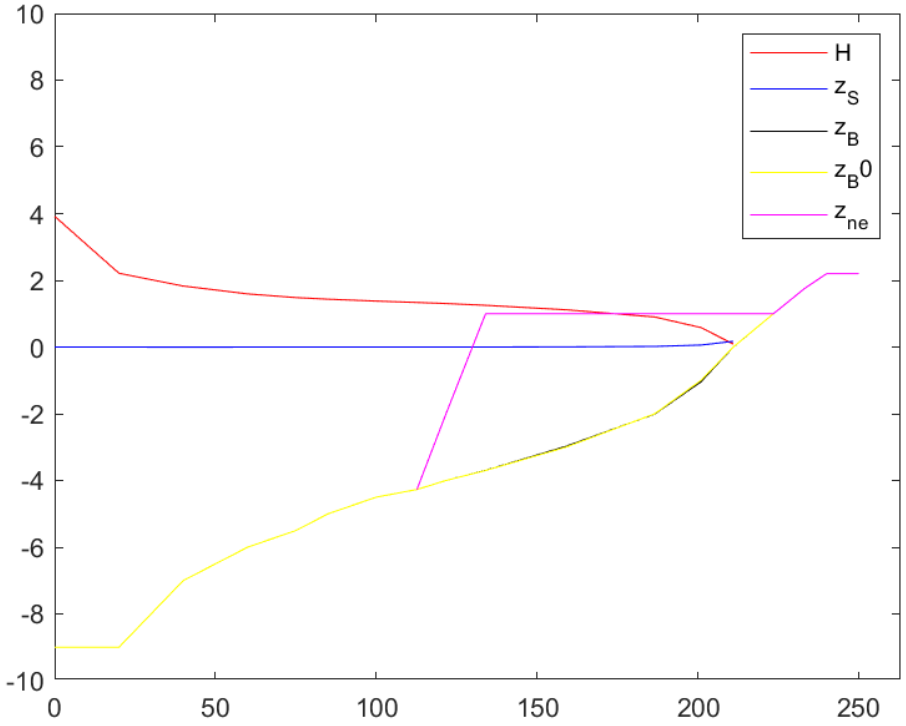


Figura 9.7 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 24 ore.

Dalle figure riportate si mostra come la sezione, anche in caso di mareggiate di 24 ore, non presenti erosioni eccessive, ma semplicemente una ridistribuzione dei sedimenti nella spiaggia attiva. Pertanto, nel breve periodo l'intervento risulta essere stabile.

9.3 *SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 6*

Le simulazioni effettuate per ogni evento di mareggiata considerata, ovvero per le 3 durate di 6, 12 e 24 ore vengono mostrate nelle seguenti figure dove H rappresenta l'altezza d'onda, zs il livello dell'acqua, z_B il profilo di spiaggia a fine simulazione e z_{B0} il profilo di spiaggia a inizio simulazione.

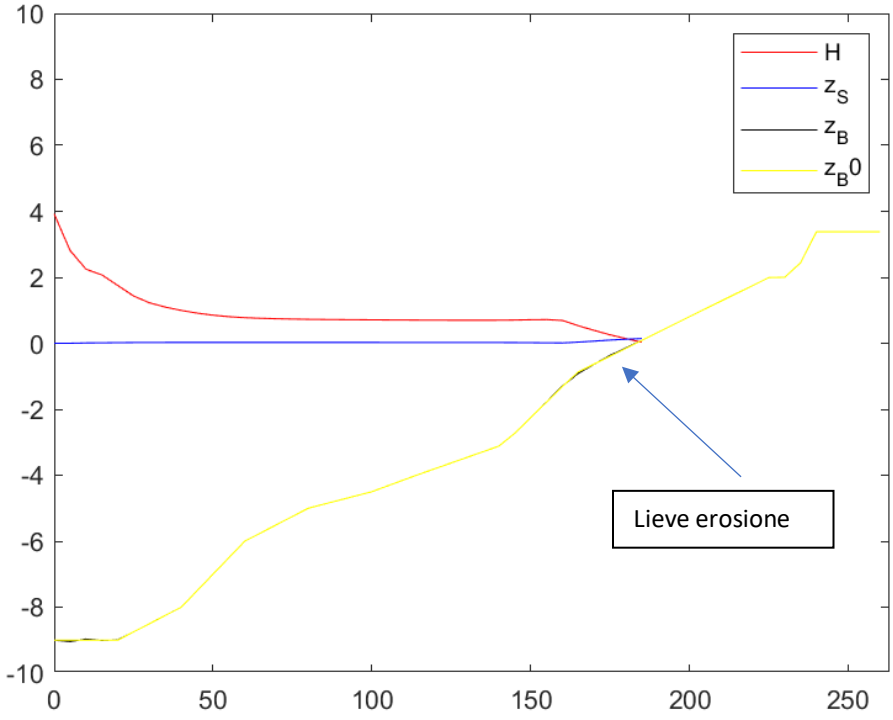


Figura 9.8 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 6 ore.

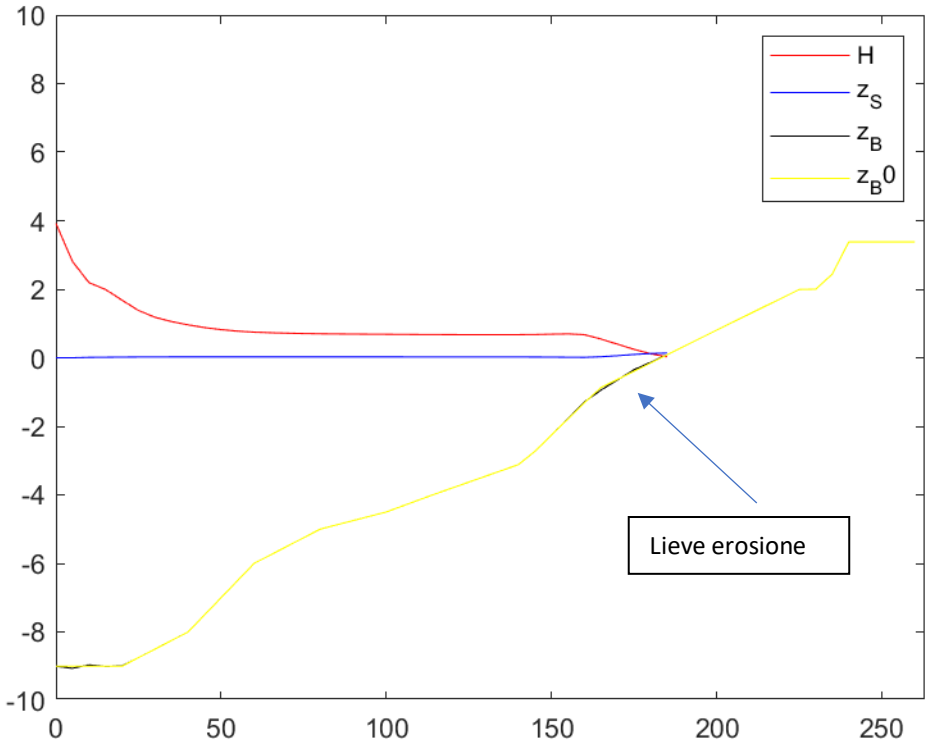


Figura 9.9 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 12 ore.

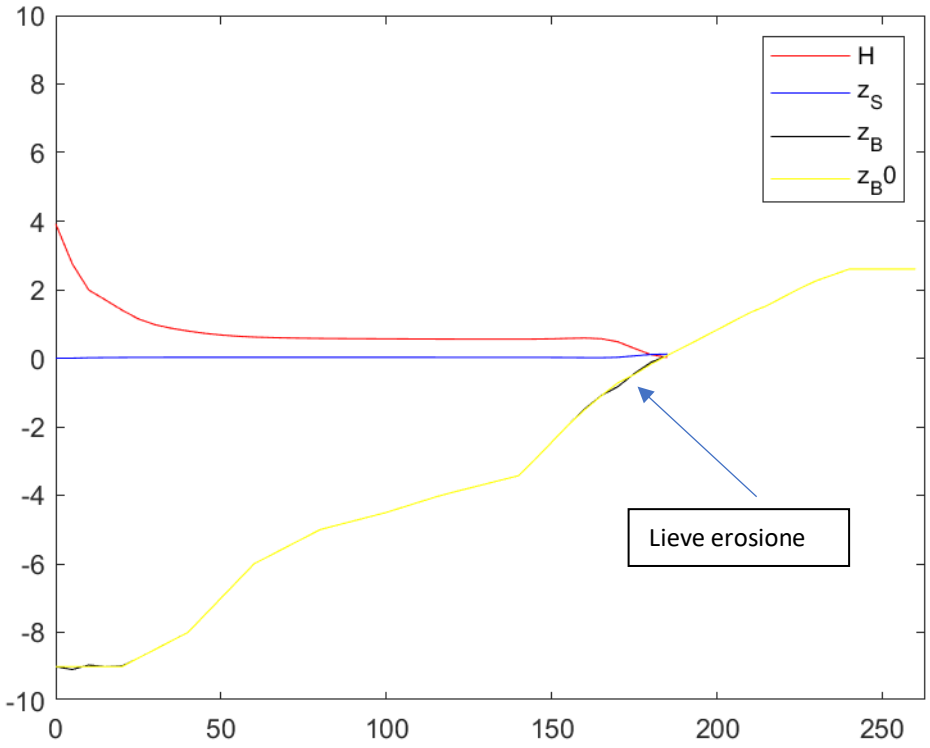


Figura 9.10 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 24 ore.

Dalle figure riportate si mostra come la sezione, anche in caso di mareggiate di 24 ore, non presenti erosioni eccessive. Pertanto, nel breve periodo l'intervento risulta essere stabile.

9.4 *SIMULAZIONI A BREVE TERMINE SEZIONE 8*

Le simulazioni effettuate per ogni evento di mareggiata considerata, ovvero per le 3 durate di 6, 12 e 24 ore vengono mostrate nelle seguenti figure dove H rappresenta l'altezza d'onda, zs il livello dell'acqua, z_B il profilo di spiaggia a fine simulazione, z_{B0} il profilo di spiaggia a inizio simulazione e n_{ne} il pennello da realizzare.

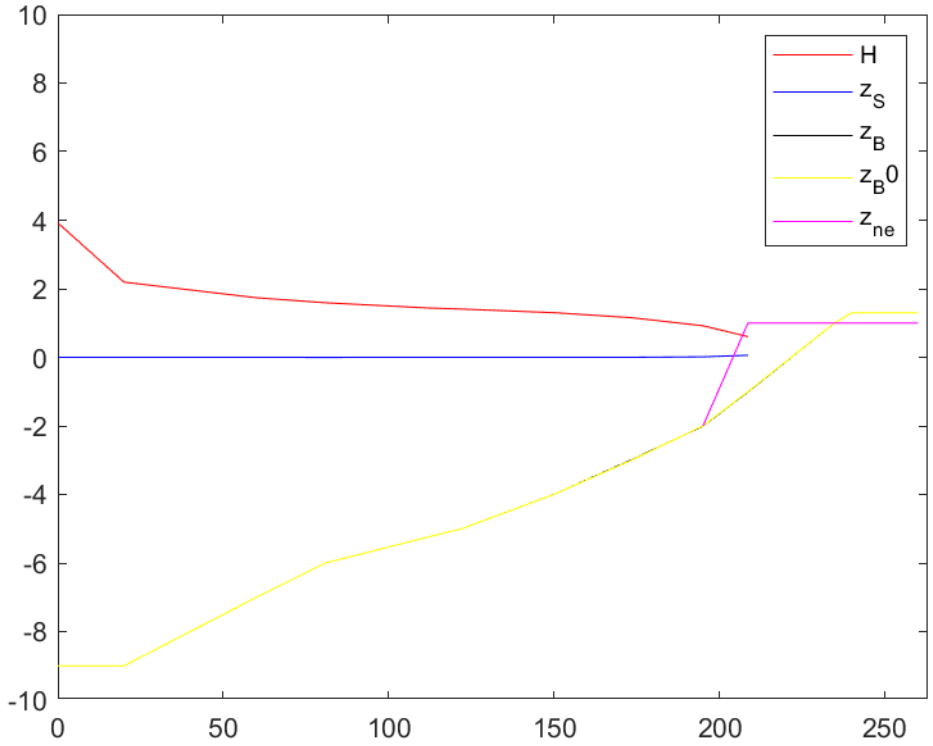


Figura 9.11 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 6 ore.

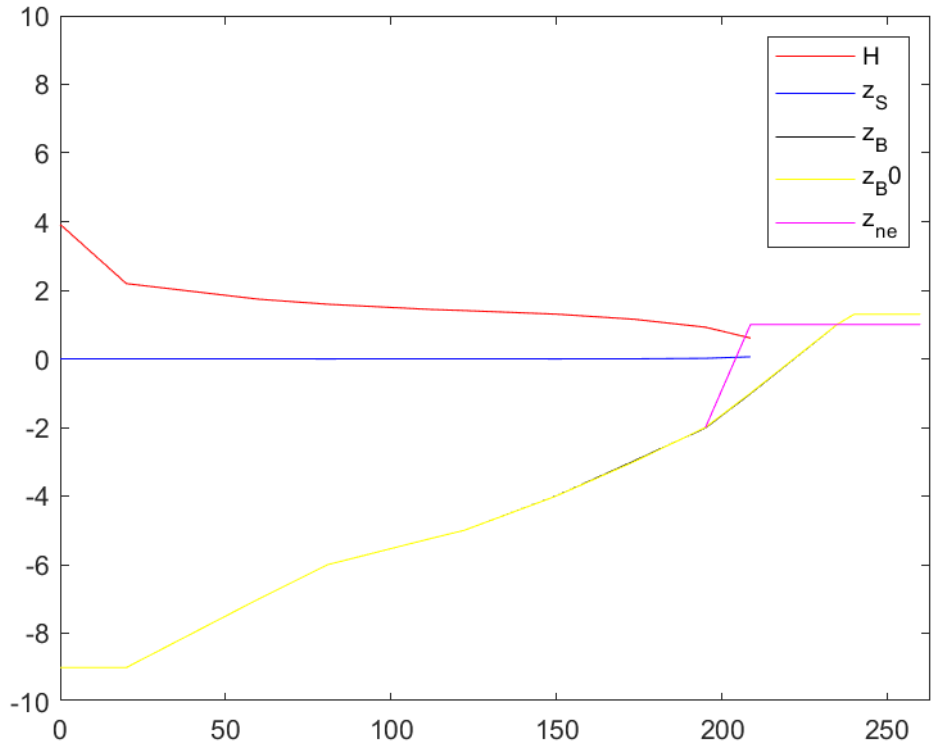


Figura 9.12 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 12 ore.

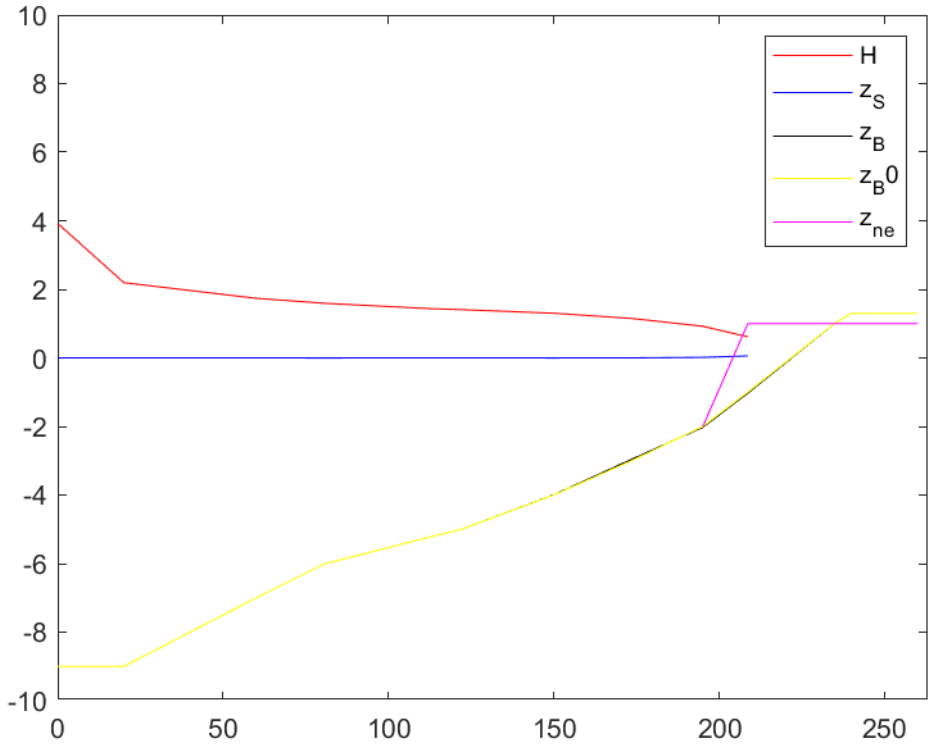


Figura 9.13 Risultati in forma grafica della simulazione per la mareggiata di durata 24 ore.

Dalle figure riportate si mostra come la sezione, anche in caso di mareggiate di 24 ore, non presenti erosioni eccessive, ma semplicemente una ridistribuzione dei sedimenti nella spiaggia attiva. Pertanto, nel breve periodo l'intervento risulta essere stabile.

10 IL FRANGIMENTO

Quando l'altezza dell'onda raggiunge un certo valore limite, in relazione alla lunghezza dell'onda stessa o alla profondità dell'acqua, le onde subiscono il fenomeno del frangimento, accompagnato da una forte turbolenza, formazione di schiuma e perdita di energia. Esistono in natura due tipologie di frangimento. Una che avviene al largo (Fig. 10.1), solitamente in acque profonde e per effetto di un raggiunto limite di ripidità delle onde (spesso per l'azione del vento che insiste sulla superficie libera del mare, e una che avviene sottocosta (Fig. 10.2), nella condizione di acque basse, in cui l'onda frange per raggiunto limite di profondità.

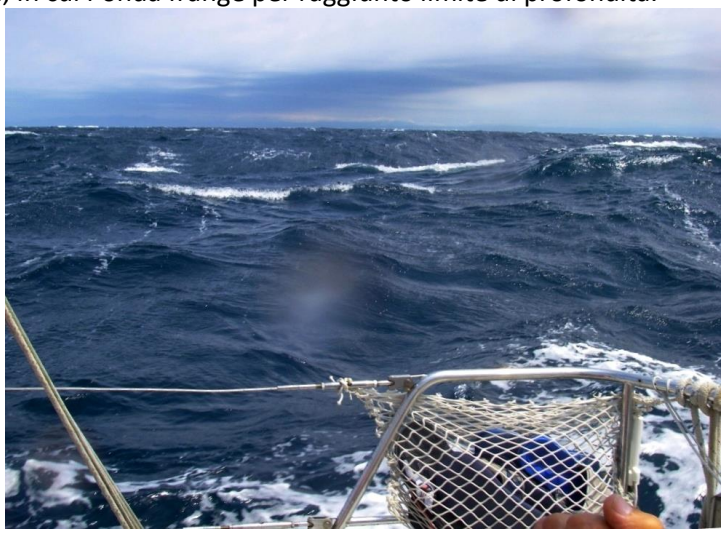


Figura 10.1 Frangimento al largo



Figura 10.2 Frangimento sottocosta

In generale, un'onda regolare di lunghezza L (o periodo T) che si propaga su di una profondità d del fondo è instabile e frange quando la sua altezza H raggiunge e supera un valore H_b (altezza limite di stabilità o altezza di frangimento) che dipende da d e da L (ovvero da T). Il criterio di frangimento più utilizzato è quello di Stokes (1880), in base al quale le onde frangono quando la componente orizzontala della velocità, u, in corrispondenza della cresta, uguaglia la celerità dell'onda c = L/T, cioè quando:

$$u_b = c_b \quad \text{per} \quad \eta = \eta_b$$

avendo indicato con il pedice b le grandezze corrispondenti alla situazione di frangimento.

In tali condizioni il profilo d'onda, rappresentato dall'elevazione d'onda, presenta un angolo di 120° in corrispondenza di $\eta = \eta_b$, come mostrato nella successiva Fig. 10.3, che evidenzia inoltre che la cresta si mantiene simmetrica rispetto ad un asse verticale.

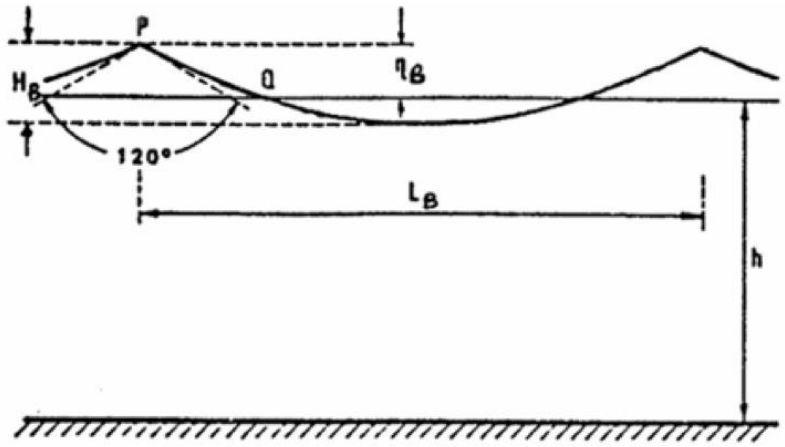


Figura 10.3 Profilo d'onda limite secondo il criterio di frangimento di Stokes (h = d)

Il **frangimento sottocosta** avviene per raggiunto limite di profondità del fondale.

Nel caso di *onde regolari*, tale criterio limite è dato dalla seguente relazione:

$$H_b/d_b = 0.78$$

dove H_b è l'altezza d'onda al frangimento e d_b è la profondità al frangimento. Se avviene che $H_b/d_b > 0.78$, l'onda frange perché il fondale è troppo basso.

Nel caso di *onde irregolari*, il criterio limite di frangimento per raggiunto limite di profondità del fondale può essere definito dalla relazione:

$$H_{sb} = 0.56e^{3.5\tan(\alpha)}$$

dove H_{sb} è l'altezza d'onda significativa al frangimento e α è la pendenza del fondale rispetto ad un orizzontale di riferimento.

Iribarren e Nogales (1949) e Battjes (1974) introducono il parametro di frangimento, ξ, il cui valore caratterizza il tipo di frangimento sottocosta dell'onda su di una spiaggia con pendenza media a:

$$\xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$

ove L_0 è la lunghezza d'onda in acque profonde. A seconda del valore assunto dal parametro di frangimento, si hanno quindi diversi tipo di frangimento.

Se $\xi < 0.5$, il frangimento di tipo *spilling* (a *defluimento*). Esso è caratterizzato da una cresta simmetrica rispetto all'asse verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, presenta schiuma sul lato della cresta dalla parte del verso di propagazione del moto ondoso e risulta associato a fondali orizzontali o a modesta pendenza e ad onde con elevata ripidità H_0/L_0 al largo.

Se $0.5 < \xi < 3.3$, il frangimento di tipo *plunging* (a *cascata*). Esso è caratterizzato da una cresta non simmetrica rispetto alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, con la presenza di un getto e di una successiva caduta dalla parte del verso della propagazione del moto ondoso, ed è associato a fondali a media pendenza e ad onde con media ripidità al largo.

Se $\xi > 3.3$, il frangimento di tipo *surging* (a *ondeggiamento*). Esso è caratterizzato da una cresta non simmetrica rispetto alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, senza la presenza di un getto ma con schiuma dalla parte del verso di propagazione del moto ondoso. Esso è associato a fondali a forte pendenza (elevata riflessione) e ad onde con modesta ripidità al largo.
Per le onde mostrate in Tab. 3 vengono riportati i valori di H_{sb} e d_b e del numero di Iribarren.

Di seguito vengono riportate per le onde di progetto del settore 180°-210°N i valore di H_{sb} e d_b:

Tabella 3. Valori dell'altezza d'onda al frangimento, della profondità di frangimento e del numero di Iribarren.

T (anni)	Settore	DIR (°N)	H_s (m)	T_p (s)	L_0 (m)	H_{sb} (m)	d_b (m)
10	180°-210°N	195	3.27	8.92	124.23	3.45	4.43
25	180°-210°N	195	3.63	9.21	132.46	3.79	4.86
50	180°-210°N	195	3.92	9.42	138.49	4.06	5.20
100	180°-210°N	195	4.16	9.62	144.35	4.28	5.49

Pertanto, in tutti i casi il frangimento è di tipo *spilling* (a *defluimento*).
Di seguito, invece, viene riportata la linea dei frangenti.



Figura 10.4 Tracciamento della linea dei frangenti

11 DIMENSIONAMENTO DEL PIEDE SOMMERSO DELLA SPIAGGIA

Dalle simulazioni effettuate con X-Beach si determina un profilo stabile della spiaggia a seguito del ripascimento. Tuttavia, al fine di stabilizzare ulteriormente l'opera si è deciso di utilizzare per il piede sommerso una granulometria maggiore avente la funzione di sostenere l'opera e di proteggere il terreno sottostante dall'azione diretta del moto ondoso. Il dimensionamento dei massi al piede è determinato principalmente dal "tirante idrico" al di sopra dello stesso definita in funzione dell'altezza d'onda incidente. Infatti, all'aumentare della profondità si riduce l'azione idrodinamica e di conseguenza il peso dei massi necessario, per garantirne la stabilità sotto l'azione del moto ondoso.

La verifica di stabilita del piede può essere effettuata con la moderna formula di Gerding (1993), valida per soli massi naturali con peso specifico di 2.68 t/m^3.

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = \left(0.24\frac{h_t}{D_{n50}} + 1.6\right) N_{od}^{0.15}$$

Dove:

Hs è l'altezza d'onda significativa in acque profonde, assunta pari a 3.92m come precedentemente evidenziato;

Δ è la massa relativa del masso pari a $(\gamma_m/\gamma_a)-1$;

γ_a è il peso specifico dell'acqua marina (1.03 t/m^3);

γ_m è il peso specifico del masso (assunto 2.68 t/m^3 per i massi naturali);

D_{n50} è il diametro nominale del masso, $D_{n50}= (W_{50}/\gamma_m)^{1/3}$ (m);

W_{50}è il valore del peso corrispondente al 50% nella curva di distribuzione (kg);

h_t è la profondità della cresta;

N_{od} è il numero di danneggiamento (≤ 0.5 nessun danno, $0.5 < N_{od} \leq 2$ leggero spianamento, ≥ 4 "collasso").

Assumendo un coefficiente di danneggiamento pari 0.95, si ottiene un peso medio di circa 300 Kg.

Per gli elementi costituenti il piede sommerso si è prevista una sommergenza di 1 m e una pendenza del 10%.

Per lo spessore si può far riferimento alla relazione proposta da Van Der Meer il dimensionamento delle opere a gettata di tipo sommerso si è soliti fare riferimento alla seguente relazione proposta da Van Der Meer:

$$\frac{h_c^{'}}{d} = (2.1 + 0.1S)e^{-0.14N_s}$$

ove: -

h'$_c$ è lo "spessore";

h è la profondità minima al piede dell'opera;

S è il livello di danneggiamento;

Ns è il "numero di stabilità spettrale" definito in funzione di parametri caratteristici dell'onda di progetto e della struttura dell'opera.

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right) D_{n50}} \left(\frac{H_s}{L_p}\right)^{-1/3}$$

Essendo γ_m il peso specifico dei massi, γ_a il peso specifico dell'acqua salata, L_p la lunghezza d'onda corrispondente al periodo di picco T_p, ed H_s l'altezza d'onda significativa in corrispondenza della struttura. Assumendo un livello di danneggiamento compreso tra 0.5 e 2, che indica condizioni di grande stabilità, lo spessore del piede sommerso risulta pari a circa 1 m.

Per questa tipologia di barriera, l'ampiezza della cresta (berma in sommità), B, può essere determinata in funzione del D_{n50}.

Per ulteriori dettagli si rimanda agli elaborati planimetrici e alle sezioni di progetto (PE_A_131_VII_I20_00_PM_PLA_03_A, PE_A_131_VII_I20_00_PM_SEZ_01_A).