COMUNE DI GENOVA

COMUNE DI GENOVA

PROVINCIA DI GENOVA

INTERVENTI DI RIASSETTO, RIORGANIZZAZIONE, INCREMENTO RESILIENZA E RIGENERAZIONE DEL LITORALE DI STURLA SITUATO ALL'INTERNO DEL COMUNE DI GENOVA

CUP : B35E23013900004 – MOGE: 21253 – CIG: A042F6FD9A

PFTE

Relazione modellistica Fase 2 Simulazioni su pennello di levante e reef artificiale

ANALISI IDRO-MORFODINAMICA DELLA SPIAGGIA DI STURLA (GE) ASEGUITO DI INTERVENTI DI RIFIORITURA DELLE OPERE A COSTA: FASE 2

REDATTO NEL MESE DI Luglio 2024 DA
-- Ing. Guido FERRI
-- Collaboratore Ing. Delfino Christian
-- Geoscape (Spin off dell'Università di Genova)

PFTE-R-GEN-04.B

R.U.P
Arch. Roberto Varcalda

CONSULENTE: DICCA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA

Firmato digitalmente da: MUCERINO LUIGI

ANALISI IDRO-MORFODINAMICA DELLA SPIAGGIA DI STURLA (GE) A SEGUITO DI INTERVENTI DI RIFIORITURA DELLE OPERE A COSTA E POSIZIONAMENTO DI REEF ARTIFICIALE: FASE 2

Prof. Ing. Giovanni Besio

Ing. Francesco De Leo

Dr. Federico Baronetti

Genova, 13/06/2024

Sommario

1. AREA DI STUDIO....5
2. INTERVENTI PROGETTUALI PROPOSTI....7
3. DATI UTILIZZATI....11
4. STUDIO MODELLISTICO....16
5. RISULTATI....21
6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE....29

Figura 1. Area di studio; la città di Genova è indicata dal cerchio bordato in rosso nel pannello (A). Il pannello (B) mostra un ingrandimento sull'area di levante della citta, evidenziando la spiaggia di Sturla tramite il riquadro rosso. Il pannello (C) mostra un inciso sul tratto di ponente della spiaggia; il simbolo della macchina fotografica indica la posizione da dove è stata scattata la foto di Figura 2....5
Figura 2. Lato di ponente della spiaggia di Sturla. Foto scattata dal belvedere Lina Volonghi, posto sul tetto della piscina della Società Sportiva Sturla....6
Figura 3. Planimetria del pennello trasversale (in rosso) all'interno della spiaggia di Sturla....8
Figura 4. Estratto del ripascimento proposto da RockSoil S.p.A. per la Spiaggia di Sturla....9
Figura 5. Planimetria del reef artificiale di Mount Maunganui. I colori da blu a rosso sono associati a profondità decrescenti, indicando una tipica sezione conoidale....10
Figura 6. Batimetrie del fondale nella spiaggia di Sturla. I punti in rosso indicano i campionamenti di materiale effettuati da Geoscape lungo il profilo emerso di spiaggia....12
Figura 7. Esempio di curva granulometrica per uno dei campioni mostrati in Figura 6....13
Figura 8. Batimetria dell'area di studio per la configurazione di progetto; il cuneo ad Ovest del pannello indica la piattaforma sommersa o ASR....15
Figura 9. Schema del funzionamento del modello X-Beach. Ciascun modulo è rappresentato da un colore diverso; le interazioni tra i diversi moduli sono indicate dalle frecce....17
Figura 10. Estensione del dominio computazionale del modello X-Beach. I rettangoli concentrici indicano diverse risoluzioni della maglia computazionale....18
Figura 11. Serie temporali dell'altezza d'onda (in alto) e delle direzioni di incidenza (in basso) relative alla mareggiata di Novembre 2014....19
Figura 12. Serie temporali dell'altezza d'onda (in alto) e della direzioni di incidenza (in basso) relative alla mareggiata di Novembre 2023....19
Figura 13. Risultati analisi morfodinamica; pannello superiore: caso A14; pannello inferiore: caso P14....22
Figura 14. Risultati analisi morfodinamica; pannello superiore: caso A23; pannello inferiore: caso P23....24
Figura 15. Localizzazione del frangimento delle onde (cerchi neri, mareggiata del 2023; analisi non idrostatica)....26
Figura 16. Correnti litoranee indotte al picco della mareggiata; pannello superiore: caso A14; pannello inferiore: caso P14....27
Figura 17. Correnti litoranee indotte al picco della mareggiata; pannello superiore: caso A23; pannello inferiore: caso P23....28

Tabella 1. Percentuale di materiale trattenuto in funzione del setaccio (per la serie completa si rimanda all'Allegato A3).....13
Tabella 2. Diametri caratteristici considerati per descrivere il sedimento della spiaggia di Sturla.....14
Tabella 3. Sintesi delle simulazioni effettuate e relativo codice identificativo.....21

PREMESSA

In data 13/05/2024, il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (nel seguito DICCA; https://meteocean.science/) veniva incaricato da Geoscape Società Cooperativa (nel seguito Geoscape o Committente) di caratterizzare il comportamento idro e morfodinamico della spiaggia di Sturla, all'interno della città metropolitana di Genova. Nello specifico, si richiedeva di valutare potenziali fenomeni di allagamento della spiaggia emersa unitamente al rischio di erosione della stessa, per due diverse configurazioni: la prima relativa allo stato attuale della spiaggia; la seconda caratterizzata da interventi di ripascimento, ripristino di un pennello perpendicolare a costa, ed installazione di una piattaforma sommersa sul fondale prospiciente la spiaggia (nel seguito anche indicata come *Artificial Surf Reef* o ASR). Scopo del presente elaborato è quello di favorire un'analisi comparativa tra i due stati, al fine di valutare l'efficacia degli interventi proposti.

Il presente documento riporta le analisi svolte ed i risultati ottenuti; questi ultimi sono altresì forniti alla Committenza su apposito formato elettronico.

1. AREA DI STUDIO

Lo studio interessa la spiaggia di Sturla, sita all'interno della Città Metropolitana di Genova all'interno dell'omonimo quartiere. Figura 1 mostra l'area di studio tramite progressivi ingrandimenti, da un inquadramento generale dell'area (pannello A) sino alla scala locale (pannello C). In Figura 2 si può apprezzare una foto della spiaggia scattata in loco.



Figura 1. Area di studio; la città di Genova è indicata dal cerchio bordato in rosso nel pannello (A). Il pannello (B) mostra un ingrandimento sull'area di levante della citta, evidenziando la spiaggia di Sturla tramite il riquadro rosso. Il pannello (C) mostra un inciso sul tratto di ponente della spiaggia; il simbolo della macchina fotografica indica la posizione da dove è stata scattata la foto di Figura 2.

La spiaggia risulta essere particolarmente esposta rispetto ai settori di traversia principali che interessano la maggior parte dell'arco ligure, ovvero ad onde da Libeccio che si propaghino lungo la direzione SW-NE, così come riportato nell'Atlante dei venti e delle onde nel Mar Mediterraneo[1]; e, secondariamente, ad onde provenienti da Scirocco e Mezzogiorno, ovvero che si propaghino verso N e NW.

Infatti, allo stato attuale, non vi sono strutture in grado di schermare l'azione delle mareggiate, ad eccezione di una massicciata ubicata sul tratto di ponente della spiaggia, parte di un pennello posto a protezione della prospiciente spiaggia di Vernazzola, che scherma parzialmente l'estremità ad Ovest della spiaggia di Sturla

[1] Cavaleri, L. (2005). The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea-the calibration phase. *Advances in Geosciences*, *2*, 255-257.

rispetto alle mareggiate di Libeccio (apprezzabile sulla sinistra del pannello C in Figura 1).



Figura 2. Lato di ponente della spiaggia di Sturla. Foto scattata dal belvedere Lina Volonghi, posto sul tetto della piscina della Società Sportiva Sturla.

Tuttavia, il resto della spiaggia è esposto ad elevate criticità, sia per quanto riguarda l'allagamento delle quote emerse, che in riferimento all'asportazione di materiale solido ad opere delle onde, con conseguente innesco di processi erosivi. Sono infatti numerosi i fenomeni che, di recente, hanno causato ingenti danni alle infrastrutture ivi presenti, come ampliamente testimoniato dalla organi della stampa locale (https://www.genova24.it/2023/01/la-mareggiata-sfonda-la-sede-della-sportiva-sturla-il-segretario-da-anni-chiediamo-una-protezione-330692/).

A tal proposito, è stata avanzata una proposta per la difesa del litorale dal Comune di Genova, che preveda due possibili interventi progettuali, ripartiti in altrettanti lotti: il Lotto 1, che prevede un ripascimento strutturale della spiaggia ed il ripristino di un pennello trasversale nella parte centrale della spiaggia; il Lotto 2, che prevede i medesimi interventi unitamente alla posa di una piattaforma sommersa (o Artificial Surfing Reef ASR) al largo della spiaggia. Questo studio si propone di analizzare gli interventi del secondo lotto, valutando l'efficacia degli stessi nel mitigare il potenziale erosivo e di inondazione delle mareggiate, così come descritto nel prosieguo del documento.

2. INTERVENTI PROGETTUALI PROPOSTI

Il progetto del Lotto 2 interessa tre diversi interventi:

- Un ripascimento strutturale della spiaggia, ottenuto tramite l'aggiunta di materiale sciolto avente granulometria compatibile con quella presente in loco e garantendo assegnate pendenze alle scarpate;

- Il ripristino di un pennello trasversale in corrispondenza del punto avente coordinate LON/LAT pari a 8.986515/44.391567 (SR: WGS84);

- L'installazione di un ASR al largo sul fondale prospiciente la spiaggia. Questa tipologia di opere, sebbene di comprovata efficacia, non ha ancora trovato ampia diffusione in Italia; se ne propone pertanto una descrizione di carattere generale nel Paragrafo 2.1.

L'intervento di ripascimento era stato predisposto a suo tempo nello studio *SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA – RIPASCIMENO SPIAGGE GENERALE*, redatto da RockSoil S.p.A. ed esteso a tutto il litorale della Città Metropolitana, del quale si riporta nel seguito un estratto della planimetria relativa alla spiaggia di Sturla (i documenti completi sono allegati in coda al presente documento).

In Figura 4, è possibile apprezzare il ripascimento della spiaggia, previsto all'interno del buffer indicato con le barbette (linee nere alternate di diversa lunghezza) in corrispondenza della zona di battigia. Le linee di diversi colori indicano lo stato attuale della linea di riva e le proiezioni della stessa, ottenute tramite modelli parametrici a ridotta complessità, approccio differente da quello impiegato in questo studio (vedi Paragrafo 4), e che non sono dunque considerate ai fini delle successive analisi.

Per quanto attiene al secondo intervento, è stato preso a riferimento il prospetto planimetrico fornito dalla Committenza, mostrato nella figura sottostante.



Figura 3. Planimetria del pennello trasversale (in rosso) all'interno della spiaggia di Sturla.

2.1 REEF ARTIFICIALI

Con il termine reef artificiale per il surf o Artificial Surfing Reef (ASR) si intende una particolare conformazione del fondale, tipicamente di natura rocciosa o corallina, in corrispondenza della quale si osserva l'alterazione del moto ondoso incidente. In particolare, l'innalzamento diffuso e progressivo della quota del fondale induce un aumento nella ripidità dei profili d'onda, comportandone il frangimento prima che queste giungano a riva e dissipandone pertanto il contenuto energetico, unitamente al potenziale erosivo e di inondazione della costa.

Negli ultimi anni, la progettazione di strutture soffolte in grado di riprodurre la funzione dei surf reef naturali ha riscontrato un crescente interesse, poiché le stesse permettono di assolvere una duplice funzione:

1) La protezione delle spiagge situate nelle loro prossimità, legata allo spostamento dei frangimenti d'onda, principale innesco di fenomeni di trasporto solido litoranee ed allagamento indotto da Run-Up, verso il largo;

2) L'impicchimento dei fronti d'onda in sezioni controllate, favorendo lo sviluppo di profili adatti alla pratica del surf da onda.

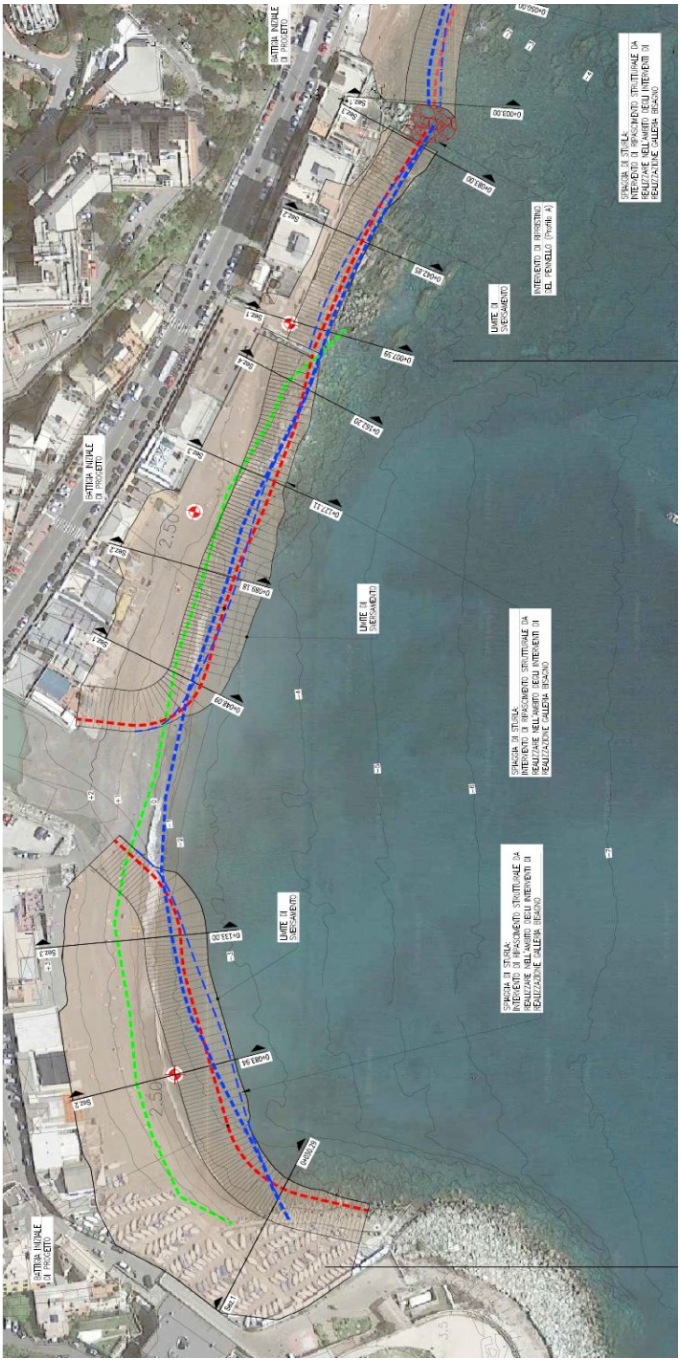


Figura 4. Estratto del ripascimento proposto da RockSoil S.p.A. per la Spiaggia di Sturla.

La possibilità di conciliare aspetti propri della protezione civile con altri legati alla fruizione del mare a scopo ricreativo, ha favorito lo sviluppo di numerosi studi ed

installazioni nei paesi dove la pratica del surf è maggiormente sedimentata, quali Australia e Nuova Zelanda[2]. Ad ogni modo, è bene ricordare come la pratica del surf stia riscontrando crescente interesse anche in Italia; in effetti, uno dei siti più attrattivi per il surf si trova a Varazze (SV), dovutamente ad un ASR generato, casualmente, dallo scarico del materiale di risulta degli scavi a supporto delle reti ferroviarie ed autostradali nel corso del secolo passato. Analogamente, è in programma l'installazione di un ASR all'interno del Comune di Ventimiglia (https://www.4actionsport.it/reef-artificiale-a-ventimiglia-un-sogno-che-si-avvera/).

Un ASR consta essenzialmente di materiale sciolto (quale ad esempio massi naturali) disposto in modo tale da formare un cuneo sommerso. A titolo esplicativo, In Figura 5 è mostrata la planimetria dell'installazione *Mount Maunganui Multi-level Reef* (Nuova Zelanda). Questa forma favorisce l'incremento dei profili d'onda tramite l'innesco dei fenomeni di shoaling e rifrazione, i quali tendono inoltre a far convergere i fronti delle onde in transito sulla piattaforma sino ad indurne il frangimento (ovvero, la formazione di schiuma e conseguente dissipazione).

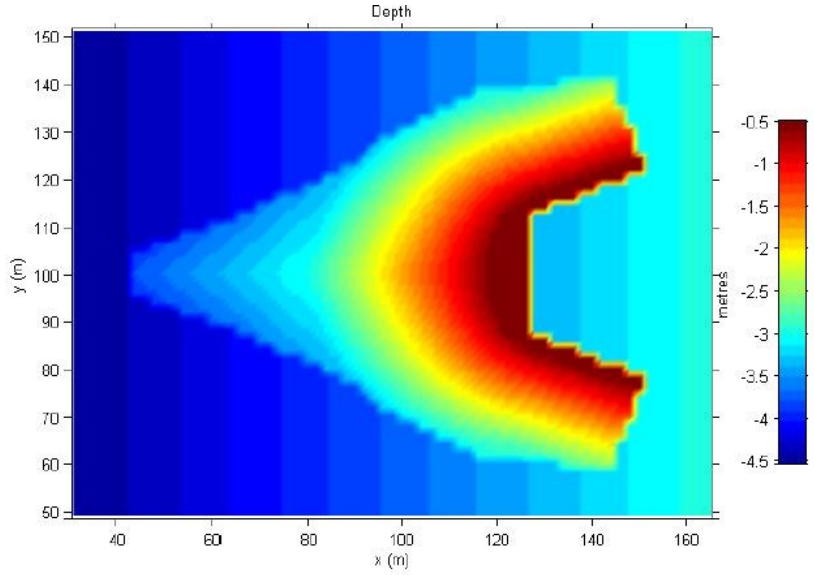


Figura 5. Planimetria del reef artificiale di Mount Maunganui. I colori da blu a rosso sono associati a profondità decrescenti, indicando una tipica sezione conoidale.

3. DATI UTILIZZATI

I dati necessari allo svolgimento dello studio interessano la climatologia locale del moto ondoso, che rappresenta infatti il principale innesco di correnti litoranee e

[2] Si vedano a titolo di esempio le seguenti pubblicazioni scientifiche:
Black, K., & Mead, S. (2001). Design of the Gold Coast reef for surfing, public amenity and coastal protection: surfing aspects. Journal of Coastal Research, 115-130.
Hutt, J. A., Black, K. P., & Mead, S. T. (2001). Classification of surf breaks in relation to surfing skill. Journal of coastal research, 66-81.

fenomeni di erosione ed allagamento costiero, e la morfologia locale della spiaggia, ovvero le quote emerse e del fondale ad essa prospiciente, unitamente alla distribuzione granulometrica del materiale presente in loco.

Per quanto attiene ai dati del moto ondoso, ci si è avvalsi delle ricostruzioni numeriche del DICCA[3], poiché non vi sono misurazioni dirette nell'area (si osservi che la boa MEDA installata al largo della spiaggia non è stata operativa negli anni recenti). I dati ricostruiti forniscono serie estese di parametri meteo-marini di comprovata affidabilità, utilizzati allo stato dell'arte sia in ambito industriale che per ricerca scientifica, come testimonia la copiosa produzione bibliografica al riguardo (un elenco di alcune pubblicazioni può essere reperito al sitohttps://meteocean.science/research/#publications). Tali serie sono state ricostruite sulla base di dati di re-analisi atmosferica Climate Forecast System Reanalysis, CFSR, per il periodo compreso tra il primo gennaio 1979 e il 31 dicembre 2010, e sul dataset CFSv2 per il periodo successivo al primo gennaio 2011. Le forzanti atmosferiche sono state quindi risolte su una maglia di calcolo con risoluzione pari a circa 0.1 km sia in longitudine che in latitudine con il modello meteorologico WRF-ARW versione 3.3.1[4], mentre le simulazioni della generazione e propagazione del moto ondoso sono state realizzate con il modello d'onda WavewatchIII v6.07[5], implementato su una maglia a risoluzione variabile dalle alte alle basse profondità. Le uscite del modello della dinamica del moto ondoso sono salvate su tutti i punti della maglia di calcolo a cadenza oraria, per tutto il periodo della simulazione. Per il presente studio, sono stati utilizzati i dati salvati nel punto maglia 000231, avente coordinate LON/LAT pari a 8.998 e 44.31 (SR: WGS84), sito sul limitare della maglia computazionale del modello numerico (vedi Figura 10).

Per quanto riguarda la batimetria del fondale, sono stati utilizzate diverse sorgenti di dati: dati reperiti da Geoscape tramite rilievo single-beam, confrontati e integrati, ove necessario, da campionamenti svolti dal DICCA tramite strumento portabile SONAR (https://v1.deepersonar.com/it/it_it/prodotti/smart-sonar-chirp-plus-2). Le quote emerse sono invece state definite sulla base dei dati DEM (Digital Elevation Model), reperibili tramite il Geoportale della Regione Liguria (https://geoportal.regione.liguria.it/). Le quote batimetriche dell'area sono mostrate in Figura 6, dove si può apprezzare come il fondale nell'area Ovest presenti un profilo regolare con isobate quasi rettilinee; al contrario, l'area Est presenta un fondale più irregolare e frastagliato (i.e., la zona a destra della Società Sportiva Sturla, indicata con il simbolo della macchina fotografica nel pannello C di Figura 1), anche, in parte, dovutamente ai massi del precedente pennello dilavati nel tempo dall'azione delle mareggiate e sparsi nell'area a questi prospiciente.

---

[3] Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, *90*, 82-94.

Lira-Loarca, A., Caceres-Euse, A., De-Leo, F., & Besio, G. (2022). Wave modeling with unstructured mesh for hindcast, forecast and wave hazard applications in the Mediterranean Sea. Applied Ocean Research, 122, 103118.

[4] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, 475, 113.

[5] WAVEWATCH III, R. Development Group (WW3DG). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III R Version 6.07; Tech. Note 333.

Infine, ci si è avvalsi sia dei dati utilizzati da RockSoil S.p.A. per il progetto di ripascimento, che delle curve granulometriche riprodotte da Geoscape sulla base della setacciatura di campioni di sedimento prelevati sia lungo il profilo emerso che lungo il profilo sommerso della spiaggia (i punti evidenziati in rosso in Figura 6). A partire da tali curve, è possibile derivare valori statistici rappresentativi della distribuzione granulometrica dei sedimenti presenti in loco, quali i diametri di sedimenti associati a diversi percentili, di cui si riporta un esempio in Figura 7 e Tabella 1.

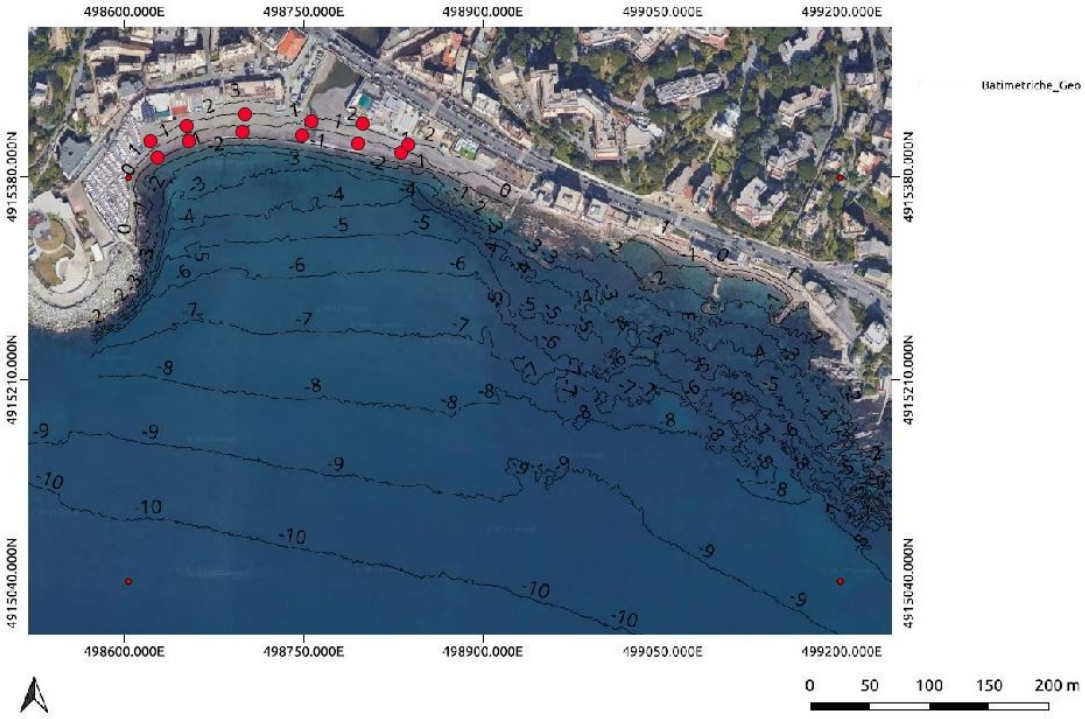


Figura 6. Batimetrie del fondale nella spiaggia di Sturla. I punti in rosso indicano i campionamenti di materiale effettuati da Geoscape lungo il profilo emerso di spiaggia.

Standard AGI/S :

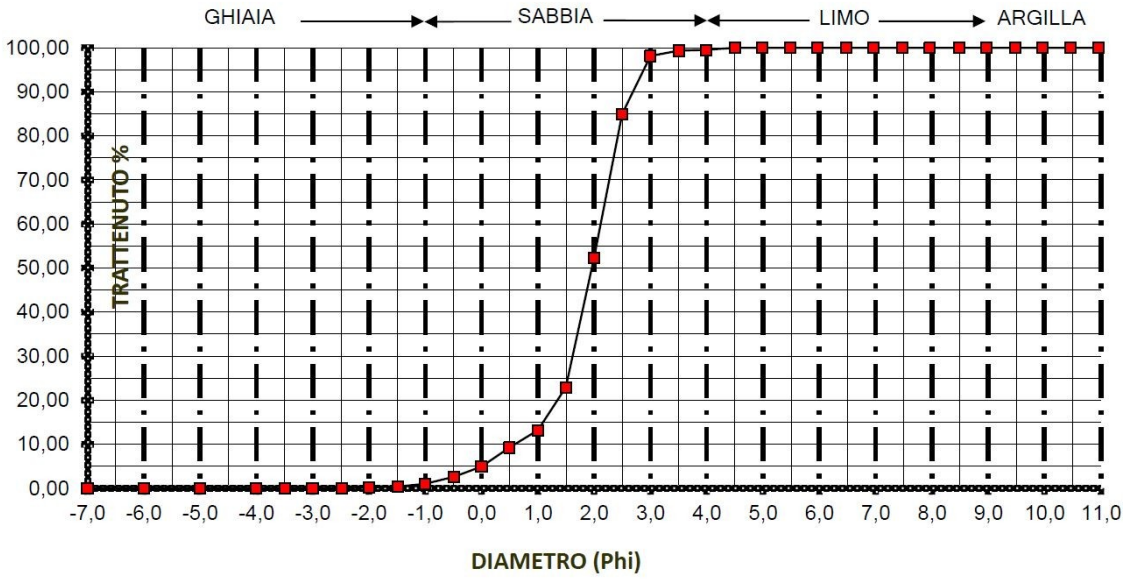


Figura 7. Esempio di curva granulometrica per uno dei campioni mostrati in Figura 6.

Tabella 1. Percentuale di materiale trattenuto in funzione del setaccio (per la serie completa si rimanda all'Allegato A3).

Trattenuto [%]	***d* [mm]**	***d* [Φ]**
5	0,9972	0,0040
10	0,6712	0,5752
16	0,4586	1,1248
35	0,3120	1,6804
50	0,2585	1,9518
65	0,2218	2,1730
84	0,1792	2,4802
90	0,1572	2,6694
95	0,1374	2,8633

I valori caratteristici del materiale si definiscono sulla base della frazione del campione passante per ciascun setaccio. A titolo di esempio, il diametro associato al decimo percentile, definito come d_{10}, è associato al 10% di passante, ovvero il 90% di trattenuto (0,15 mm nell'esempio sopra riportato); analogamente, il d_{90} è associato al 10% di trattenuto (0,6712 mm nell'esempio), etc. La misura convenzionalmente indicata con Φ permette una più facile rappresentazione grafica dei risultati, e si definisce come:

$$\Phi = -\log_2(d) \quad (1)$$

È necessario precisare come la distribuzione granulometrica lungo la spiaggia presenti una fisiologica variabilità, sia lungo il profilo planimetrico, che lungo le sezioni trasversali (ovvero, i campioni associati ai punti rossi in Figura 6 non restituiscono le medesime serie per *d* e *Φ)*, così come emerge dai campionamenti condotti dalla Committenza. Tuttavia, nel presente studio sono stati presi a riferimento due diametri ritenuti rappresentativi per l'intera spiaggia coerentemente al progetto proposto da RockSoil; tali valori ricadono comunque all'interno della variabilità rilevata tramite le analisi granulometriche, e sono riportati nella tabella sottostante:

Tabella 2. Diametri caratteristici considerati per descrivere il sedimento della spiaggia di Sturla.

d_{50} [mm]	**d_{90} [mm]**
6	15

Tale scelta permette di lavorare in modo coerente alle potenzialità del modello di calcolo successivamente utilizzato, e, poiché non sono considerate solamente le frazioni più grossolane riscontrate, permette altresì di operare in favor di sicurezza, valutando l'efficacia degli interventi proposti rispetto ad un'elevata mobilitazione attesa dei sedimenti.

Per quanto riguarda la conformazione del ASR, è stato preso a riferimento un profilo simile a quello riscontrato nella piattaforma di Varazze, seppur adattato alla geometria locale della costa ed alla conformazione del fondale. A tal proposito, giova ricordare come non vi siano indicazioni normative sulla progettazione di tali piattaforme, e come la stessa debba essere valutata ad hoc per ciascun sito di installazione, attraverso analisi di sensitività atte ad esaminare diverse possibili configurazioni e che tuttavia esulano dagli scopi del presente lavoro. Il layout utilizzato nel presente studio può essere apprezzato in Figura 8.

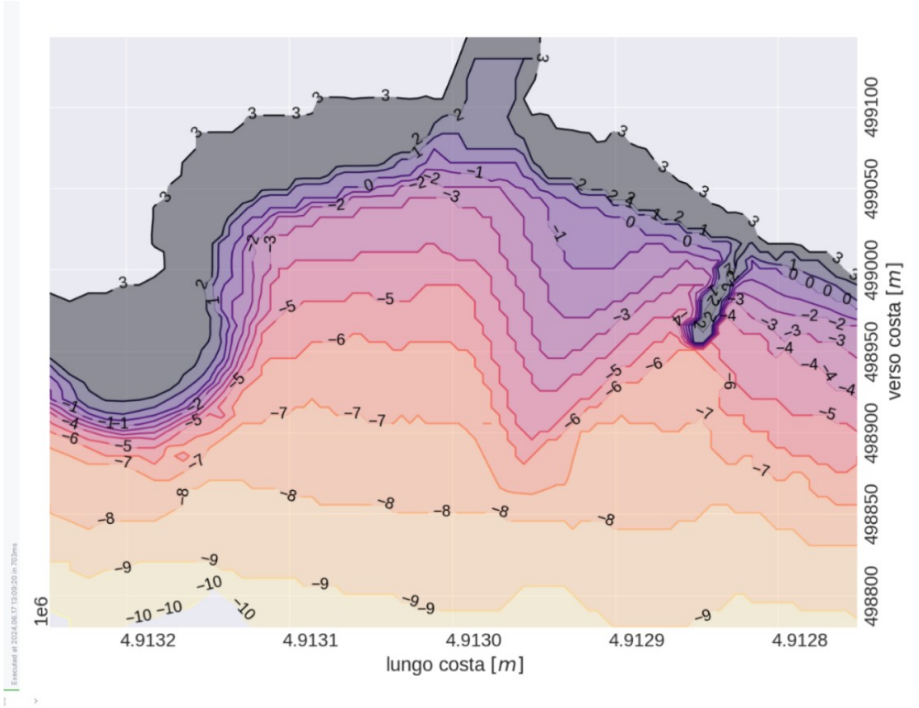


Figura 8. Batimetria dell'area di studio per la configurazione di progetto; il cuneo ad Ovest del pannello indica la piattaforma sommersa o ASR.

4. STUDIO MODELLISTICO

Per le analisi sul rischio di allagamento ed erosione della spiaggia di Sturla è stato impiegato il modello di calcolo X-Beach[6], ampiamente validato con una serie di casi analitici, di laboratorio e di test sul campo da parte dell'Università di Delft e del gruppo olandese Deltares (https://oss.deltares.nl/web/xbeach/). Si tratta di un modello in grado di risolvere la propagazione delle onde di mare (periodi nell'ordine dei secondi), onde lunghe dette di *infra-gravità* (periodi nell'ordine dei minuti), e delle correnti indotte e relativo trasporto dei sedimenti, con conseguenti variazioni morfologiche sotto-costa di spiagge soggette all'azione di mareggiate aventi assegnate caratteristiche.

Il modello è strutturato in diversi moduli che risolvono specifiche componenti, interagendo e scambiandosi informazioni ad ogni iterazione lungo il periodo della simulazione. In particolare, sono inclusi i processi di trasformazione delle onde corte (rifrazione, shoaling e frangimento) e trasformazione delle onde di infra-gravità (generazione, propagazione e dissipazione); processi morfodinamici, i quali comprendono il trasporto di sedimenti dal fondo per trascinamento e sospensione (per quanto concerne le frazioni più fini), la formazione di barre sommerse e la erosione dei fronti dunali. È inoltre possibile includere gli effetti legati alla presenza di vegetazione sommersa e delle strutture rigide. Lo schema di calcolo di X-Beach è schematizzato in Figura 9.

Il modello può essere implementato in tre modalità di funzionamento distinte:

- *Stazionario*: indicato per valutare le variazioni morfodinamiche attese nel lungo periodo (ovvero, decorrenti su scale temporali di mesi) in risposta a stati di mare di bassa/media intensità; non permette di risolvere l'idrodinamica costiera;

- *Surf-beat*: permette la risoluzione dell'idrodinamica costiera per onde lunghe e le evoluzioni morfodinamiche a scala di mareggiata (ore/giorni);

- *Non-idrostatico*: permette la risoluzione dell'idrodinamica costiera per tutte le onde di uno stato di mare (onde lunghe ed onde corte); non ancora pienamente operativo per le analisi di trasporto solido (comunicazione personale con il Dott. McCall del gruppo di sviluppo del modello).

[6] Roelvink, D., Reniers, A. J. H. M., Van Dongeren, A. P., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach model description and manual. *Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Tecnhology. Report June*, *21*, 2010.

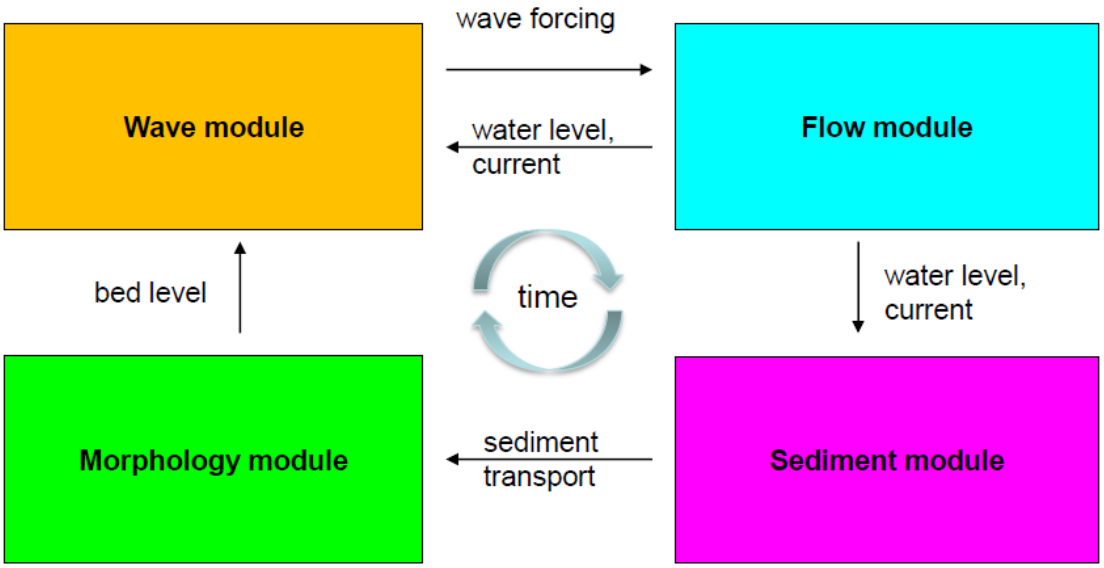


Figura 9. Schema del funzionamento del modello X-Beach. Ciascun modulo è rappresentato da un colore diverso; le interazioni tra i diversi moduli sono indicate dalle frecce.

Nel presente lavoro, ci si è avvalsi della modalità Surf-beat per lo studio dell'evoluzione morfodinamica della spiaggia in risposta alle mareggiate di progetto, e loro correnti litoranee indotte in prossimità della spiaggia. Successivamente, sono state riprodotte delle simulazioni in modalità non idrostatica al fine di valutare le sezioni di frangimento mediamente attese sulla base delle onde singole riprodotte per i diversi stati di mare.

È stata sviluppata una maglia computazionale per la propagazione di mareggiate selezionate a costa, interpolando sui rispettivi nodi computazionali i valori di profondità associati ai dati batimetrici di cui a Figura 6. La maglia computazionale presenta risoluzione variabile tra 20 m e 5 m in direzione largo-riva, e degradante da 20 m e 5 m in direzione lungo-costa, raggiungendo la massima risoluzione in prossimità dell'area di progetto (Figura 10).

Il modello è stato dunque forzato per le due diverse configurazioni di spiaggia considerate (cfr. Paragrafo 2), in riferimento a due mareggiate emblematiche per il sito oggetto di studio. Per la sola configurazione di progetto, è stata imposta una condizione di non erodibilità in corrispondenza dei nodi di calcolo che ricadessero all'interno del pennello trasversale e dell'ASR. Per il calcolo dell'evoluzione morfodinamica della costa, e per valutare l'interazione del pennello con i pattern di trasporto solido litoraneo per la configurazione di progetto, sono stati forniti al modello i dati inerenti al materiale presente sul fondale, descritti attraverso i valori di d_{50} e d_{90} riportati in Tabella 2.

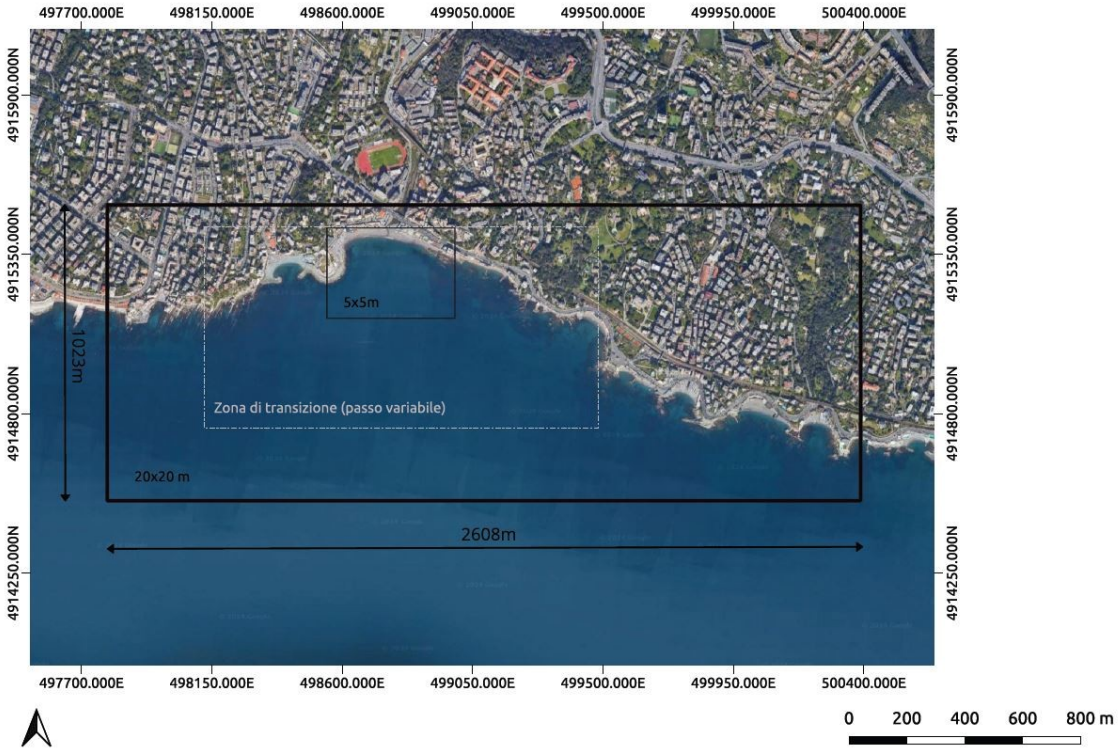


Figura 10. Estensione del dominio computazionale del modello X-Beach. I rettangoli concentrici indicano diverse risoluzioni della maglia computazionale.

La scelta delle mareggiate è ricaduta sugli eventi verificatisi nelle date 04-05/11/2014 e 05/11/2023, riprodotte attraverso i dati hindcast menzionati nel Paragrafo 3 e di cui si mostrano i profili in Figura 11 e Figura 12, per un periodo di osservazione totale pari a ca. 60 ore. Questo ha permesso di valutare la risposta della spiaggia a forzanti associate ad eventi particolarmente gravosi per l'area e tuttavia ordinari, fornendo dunque una panoramica sui rischi a cui la spiaggia è frequentemente assoggettata, anziché considerare eventi eccezionali estrapolati statisticamente.

Inoltre, le mareggiate considerate presentavano intensità e direzioni variabili, spaziando un'ampia gamma di possibili condizioni ambientali e favorendo un'analisi esaustiva delle possibili dinamiche attese a costa.

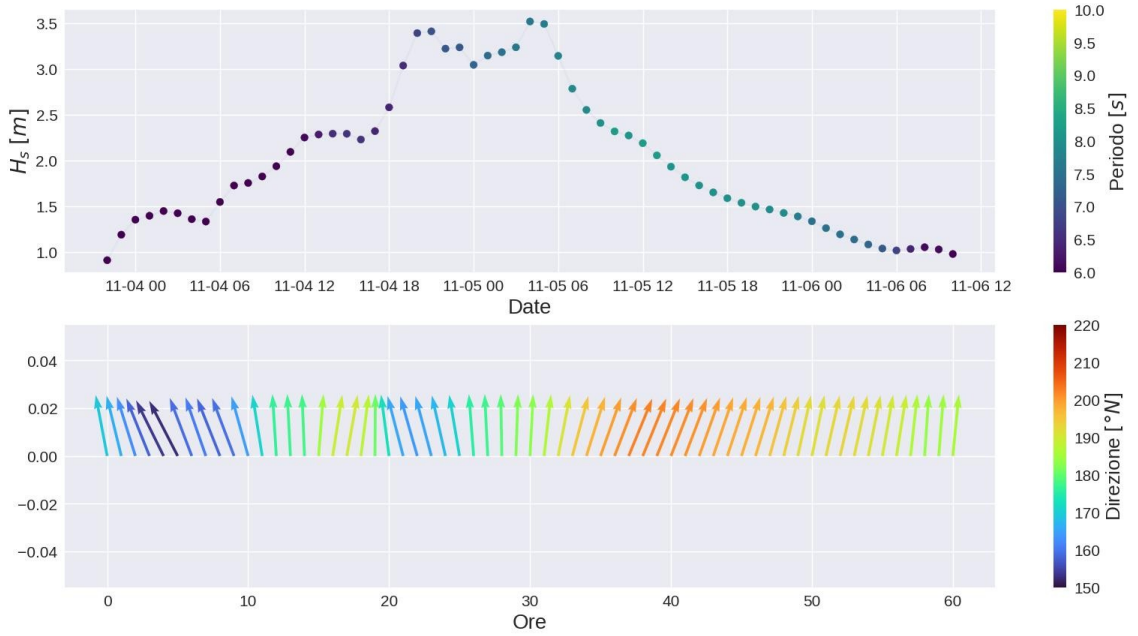


Figura 11. Serie temporali dell'altezza d'onda (in alto) e delle direzioni di incidenza (in basso) relative alla mareggiata di Novembre 2014.

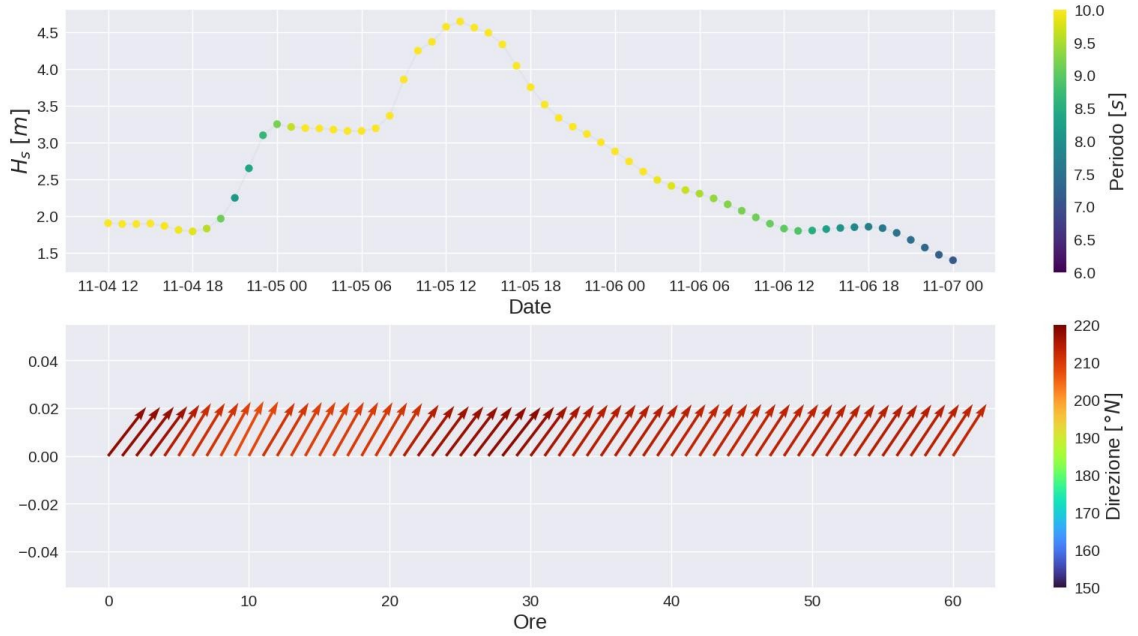


Figura 12. Serie temporali dell'altezza d'onda (in alto) e della direzioni di incidenza (in basso) relative alla mareggiata di Novembre 2023.

Confrontando l'andamento dell'altezza d'onda dei due eventi, si osserva come la mareggiata relativa a Novembre 2014 (Figura 11) presentasse due picchi di altezza

pari a ca. 3,5 m, con onde inizialmente afferenti al settore di Scirocco e Mezzogiorno (propagazione da S/SE verso N/NW) e infine ruotate verso il settore di Libeccio (propagazione da SW verso NE) in corrispondenza di un calo progressivo di intensità dell'altezza d'onda. La mareggiata di Novembre 2023 (Figura 12) presentava al contrario un massimo di altezza d'onda nell'ordine dei 4,5 m, con direzionalità omogeneamente distribuite nell'intervallo [205°N,220°N], dunque all'interno del settore di Libeccio (si usa la convenzione Nautica, per cui la direzione indica la provenienza delle onde, espressa a partire dal Nord in senso orario).

Le due mareggiate sono inoltre caratterizzate da differenti valori del periodo, con onde mediamente più lunghe in corrispondenza dell'evento di Novembre 2023 (si vedano a tal proposito i colori dei pannelli superiori, i quali indicano per l'appunto i periodi associati alle altezze d'onda).

Infine, si precisa come non sia stata considerata alcuna escursione mareale all'interno delle modellazioni summenzionate, poiché la stessa è irrilevante ai fini delle analisi proposte, essendo il regime locale caratterizzato da onde micro-tidali con ampiezze nell'ordine di pochi centimetri.

5. RISULTATI

Si riportano nel seguito i risultati delle analisi svolte per le due mareggiate considerate e le due diverse configurazioni di spiaggia. Al fine di facilitarne la lettura, si utilizzano le lettere *A* e *P* per indicare lo stato attuale e lo stato modificato come previsto dal Lotto 2; ed i codici 14 e 23 per indicare l'evento del 2014 e quello del 2023, rispettivamente; si ottengono dunque quattro diverse combinazioni, sintetizzate nella tabella sottostante:

Tabella 3. Sintesi delle simulazioni effettuate e relativo codice identificativo.

	Stato	
Evento	**attuale**	**Progetto**
2014	A14	P14
2023	A23	P23

5.1 ANALISI MORFODINAMICA

Il presente paragrafo mostra i risultati di erosione e deposito dei sedimenti alla fine delle mareggiate considerate. I casi A14 e P14 sono mostrati in Figura 13; i casi A23 e P23 sono mostrati invece in Figura 14.

In tutti i casi considerati, è possibile apprezzare il tipico pattern erosivo associato all'azione delle mareggiate sulle coste in materiale sciolto. Nello specifico, si osserva la rimozione di sedimento dalla parte sommitale di spiaggia, ovvero quella corrispondente alla berma (indicata dai colori rossi nelle figure), ed un corrispondente deposito nella parte sommersa della spiaggia (evidenziato dal colore blu)[7].

Prendendo a riferimento il caso relativo alla mareggiata del 2014, è possibile osservare come le entità di scavi e depositi dei profili di spiaggia siano generalmente contenuti nell'intervallo $\pm$ 1,8 m. Tali quantità sono peraltro del tutto coerenti a precedenti studi di settore[8], a riprova della bontà delle simulazioni svolte. Tuttavia, è possibile riscontrare marcate differenze nella distribuzione delle aree erose: analizzando il pannello inferiore in Figura 13, è possibile apprezzare come la parte sottoflutto rispetto al ASR sia interessata da limitata rimozione di materiale solido (ordine del mezzo metro), dovutamente all'azione combinata dei due manufatti (i.e., pennello trasversale e piattaforma sommersa). Al contrario, la zona di ponente prospiciente alla spiaggia di Vernazzola, la quale non è schermata da alcuna opera di protezione, presenta erosioni più marcate (cfr. pannelli superiore e inferiore in Figura 13).

[7] Komar, P. D. (1977). Beach processes and sedimentation.

[8] Si veda a titolo di esempio: Armaroli, C., Grottoli, E., Harley, M. D., & Ciavola, P. (2013). Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. Geomorphology, 199, 22-35.

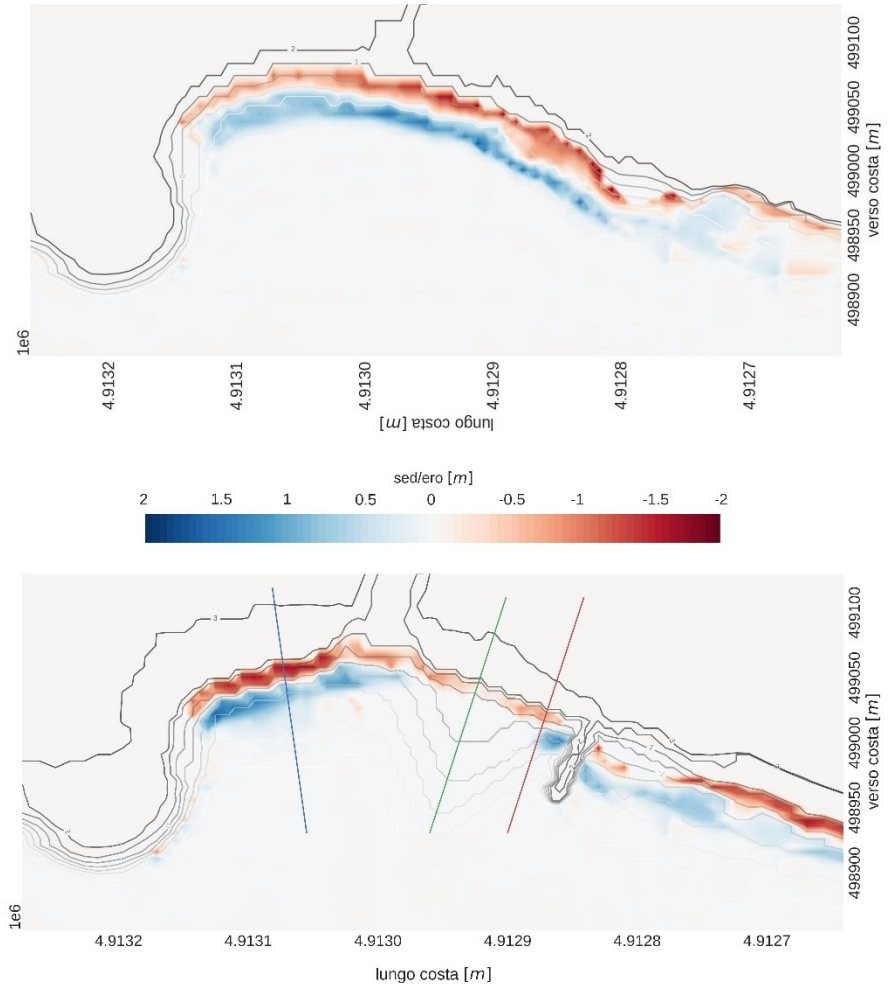


Figura 13. Risultati analisi morfodinamica; pannello superiore: caso A14; pannello inferiore: caso P14.

Tale comportamento è imputabile principalmente a due fattori: innanzitutto, il ripascimento fornisce un ulteriore "serbatoio" di sedimento erodibile, rispetto a quello presente nello stato inalterato della spiaggia. Secondariamente, qualsiasi ripascimento, nel periodo a questi immediatamente successivo, costituisce una massa alloctona che devia le sezioni della spiaggia dai cosiddetti profili di equilibrio. Infatti, ogni costa tende ad un naturale profilo, che ne traduce la stabilità in funzione di pendenza media e granulometria del materiale presente in loco[9]. Un intervento di ripascimento altera naturalmente tale condizione, pertanto la spiaggia necessita di una fase transitoria di assestamento, lungo la quale tende nuovamente al profilo di equilibrio, redistribuendo il materiale aggiunto sia lungo il profilo

[9] Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. Journal of coastal research, 53-84.

emerso che lungo il profilo sommerso. Pertanto, nello stato di progetto, il profilo si trova in posizione comunque sopravanzata rispetto allo stato attuale.

L'azione di mitigazione dei fenomeni erosivi è ancor più evidente se si analizza la mareggiata del 2023. Come mostrato in Figura 14 (pannello superiore), l'erosione dello stato sommitale per la configurazione attuale si presenta su areali estesi con maggior intensità (≈2 m). Al contrario, lo smorzamento del moto ondoso incidente operato dal ASR comporta scavi e depositi (rappresentati rispettivamente in rosso ed in blu in figura) di limitata estensione. Tale considerazione trova riscontro anche in riferimento nella zona ad Est del pennello, sebbene non direttamente interessata dall'azione del ASR; ciò è imputabile a due motivi: la direzione della mareggiata, che induce correnti orientate da Ovest verso Est, e dunque scherma la zona di levante che si trova ad essere sottoflutto rispetto al pennello. In secondo luogo, la maggior intensità della mareggiata induce correnti amplificate rispetto al caso del 2014, il che scatena un maggior innesco dell'azione della barriera costituita dal pennello, così come dettagliato nel paragrafo successivo.

Al fine di agevolare ulteriormente il confronto tra stato attuale e stato di progetto, i risultati dell'analisi morfodinamica sono stati estratti in corrispondenza di tre transetti di riferimento, così come evidenziato nel pannello inferiore di Figura 14 attraverso i colori blu, verde e rosso. I risultati sono riportati in Allegato, e confermano l'efficacia degli interventi proposti in riferimento alla ridotta movimentazione di materiale solido litoraneo presente a riva.

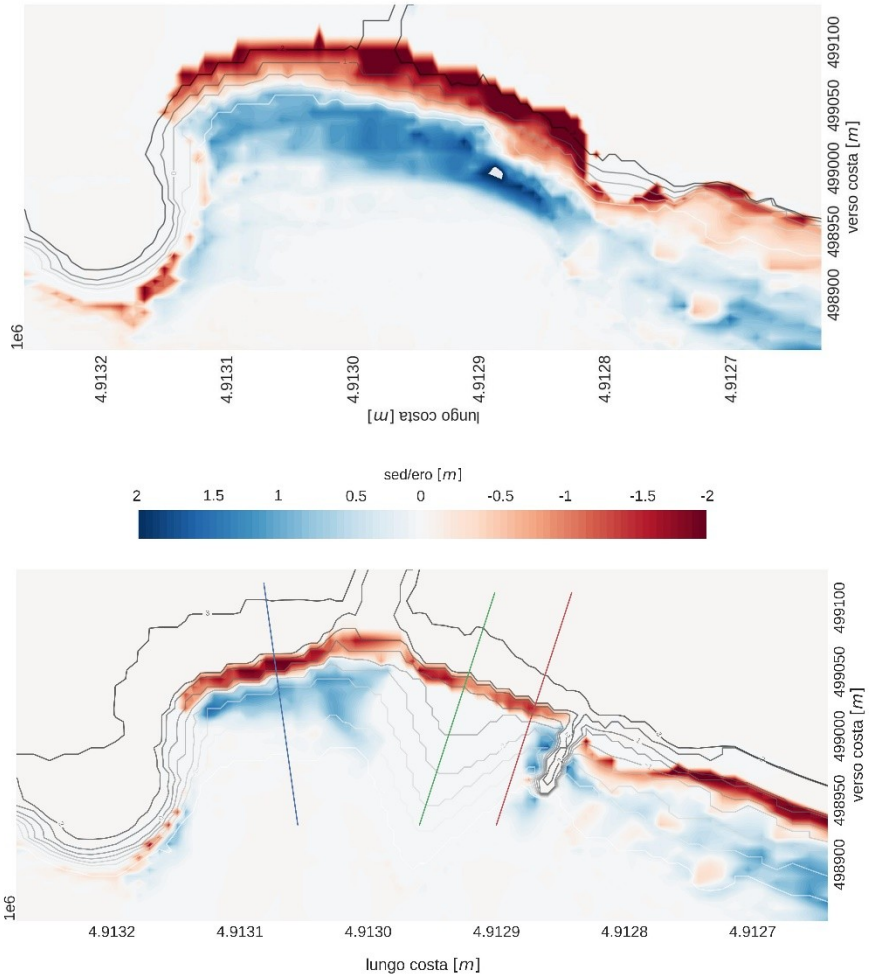


Figura 14. Risultati analisi morfodinamica; pannello superiore: caso A23; pannello inferiore: caso P23.

5.2 ANALISI IDRODINAMICA

La modellazione in modalità Surf-beat ha permesso inoltre il calcolo delle correnti litoranee innescate dalla propagazione del moto ondoso. I risultati per la configurazione attuale (pannelli superiori in Figura 16 e Figura 17) mostrano come, in risposta ad ambedue le mareggiate, le correnti più forti siano innescate in prossimità della riva. Tale risultato non deve sorprendere: infatti, le correnti litoranee sono associate al frangimento delle onde, il quale avviene a causa dei bassi fondali. Per tale ragione, è possibile al contrario apprezzare correnti di maggior intensità più al largo nel caso dello stato di progetto (pannelli inferiori in Figura 16 e Figura 17), dovutamente all'innalzamento del fondale che induce un frangimento anticipato delle onde incidenti, così come rilevato attraverso l'analisi non idrostatica mostrata in Figura 15.

Per quanto attiene alle direzioni, è possibile osservare come queste siano condizionate a riva dalle cosiddette "correnti di ritorno", orientate dalla battigia verso il mare aperto. Al largo, invece, le direzioni risentono delle direzioni prevalenti delle mareggiate, ovvero da Est verso Ovest per la mareggiata del 2014 (onde al picco tra Scirocco e Mezzogiorno); da Ovest verso Est per la mareggiata del 2023 (onde da Libeccio), il che rende palese l'effetto di schermatura operato dal pennello trasversale rispetto alla direzione prevalente dei flussi di corrente.

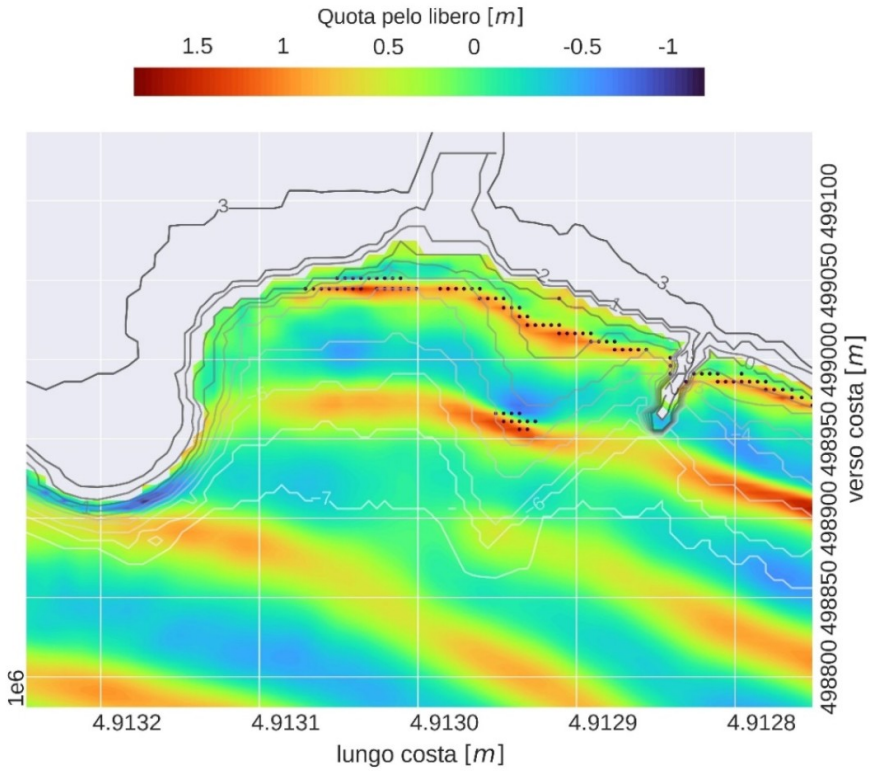


Figura 15. Localizzazione del frangimento delle onde (cerchi neri, mareggiata del 2023; analisi non idrostatica).

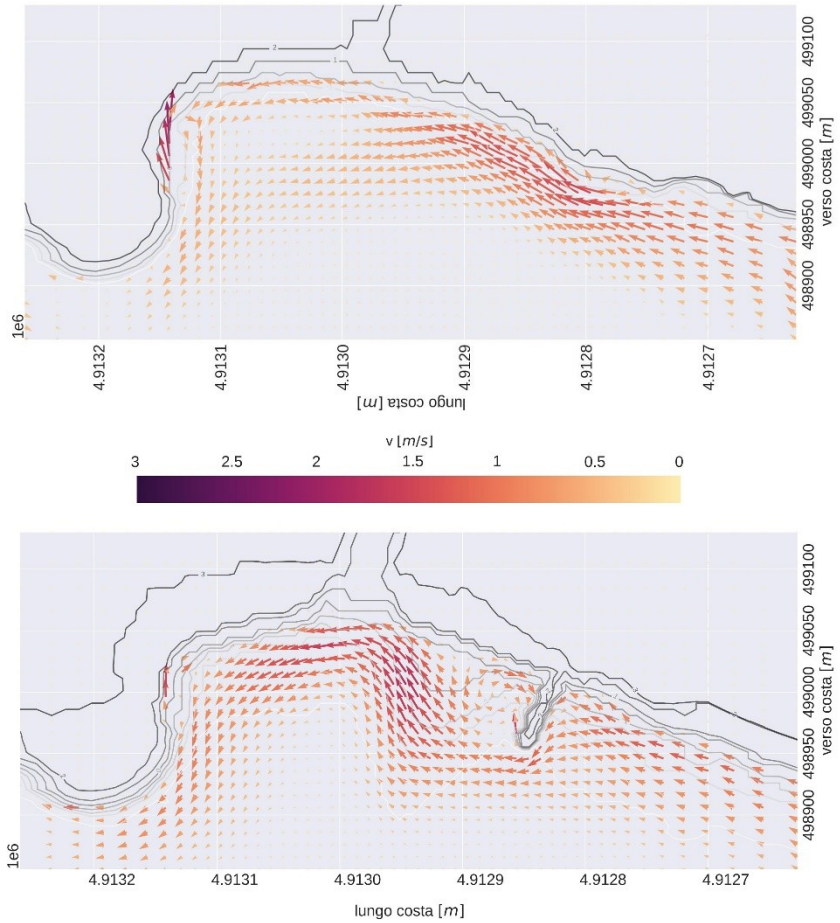


Figura 16. Correnti litoranee indotte al picco della mareggiata; pannello superiore: caso A14; pannello inferiore: caso P14.

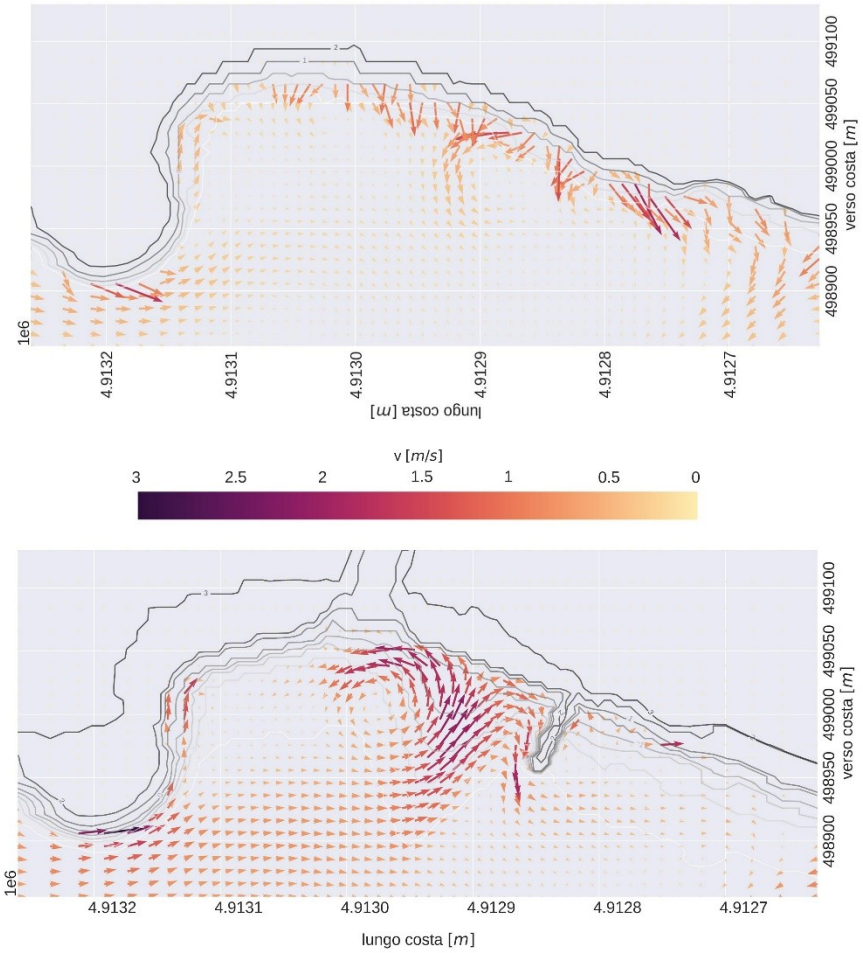


Figura 17. Correnti litoranee indotte al picco della mareggiata; pannello superiore: caso A23; pannello inferiore: caso P23.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio ha analizzato la risposta della spiaggia di Sturla (GE) a fenomeni di allagamento ed erosione costiera, indotti dalle mareggiate che insistono nell'area. A tal fine, sono stati selezionati due eventi meteo-marini verificatisi al largo della spiaggia nel Novembre del 2014 e nel Novembre del 2023 e ricostruiti tramite simulazioni numeriche. La scelta di queste mareggiate ha permesso di valutare l'erosione indotta sulla spiaggia e i diversi pattern idrodinamici per condizioni ambientali tra loro differenti e tuttavia frequenti per l'area esaminata.

Le analisi summenzionate sono state svolte tramite un opportuno modello numerico largamente utilizzato all'interno della comunità scientifica di settore, avvalendosi di dati campionati in loco per quanto concerne il profilo del fondale e delle quote emerse di spiaggia, e la granulometria del materiale presente in loco. Il modello è stato implementato prendendo a riferimento due diverse configurazioni: una inerente allo stato attuale della morfologia della spiaggia; l'altra, ottenuta considerando un ripascimento strutturale unitamente al ripristino di un pennello trasversale di assegnate dimensioni e ubicazione, ed alla installazione di una piattaforma soffolta in prossimità della spiaggia (Artificial Surf Reef o ASR).

I risultati hanno permesso di evidenziare come gli interventi progettuali proposti possano mitigare significativamente il rischio erosione per singoli eventi, pur rispondendo in modo diverso a seconda delle caratteristiche delle onde incidenti, quali altezza, periodo, e direzione di propagazione (così come mostrato dai risultati relativi alle diverse mareggiate considerate). La presenza di un ASR si riverbera positivamente anche su un ridotto rischio di allagamento costiero, dovutamente al frangimento anticipato indotto sulle onde di mare.

Occorre tuttavia precisare come l'effetto cumulativo di eventi ripetuti e molteplici possa progressivamente asportare il materiale del ripascimento, seppur in modo significativamente ridimensionato, in particolar modo grazie all'azione esercitata dalla piattaforma sommersa. A tal proposito, gioca ricordare come lo scopo del presente lavoro sia stato quello di valutare la risposta degli interventi progettuali proposti rispetto a singole mareggiate critiche per l'area, al fine di comprendere la risposta della spiaggia nel breve termine (ovvero, a scala di evento). La stima del comportamento su lassi temporali più estesi deve essere integrata attraverso modelli aventi diverse risoluzioni, che permettano di valutare la variabilità climatica totale per l'area di interesse. Ad esempio, se il pennello trasversale permette un accrescimento della spiaggia nella zona sopraflutto rispetto alla direzione media di incidenza delle onde, genera al contempo un arretramento nella zona sottoflutto. Tale comportamento si manifesta su intervalli di tempo che decorrono su mesi/anni, e dipende dalle caratteristiche di venti ed onde (i.e., eventi regnanti e dominanti), necessitando dunque di analisi addizionali.

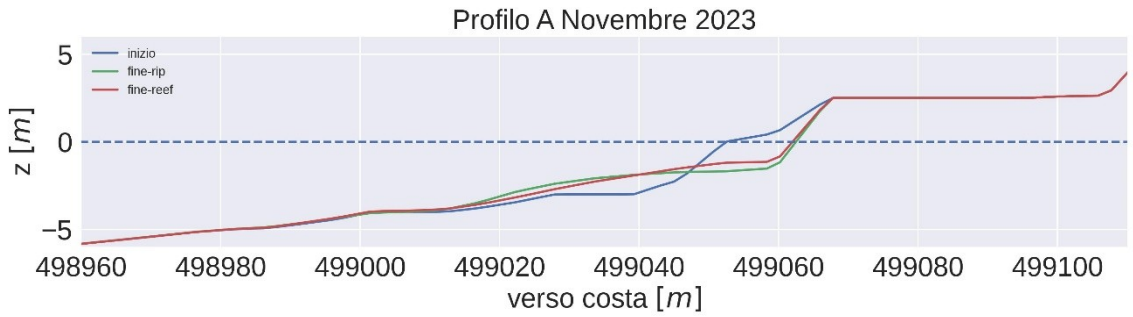
ALLEGATI

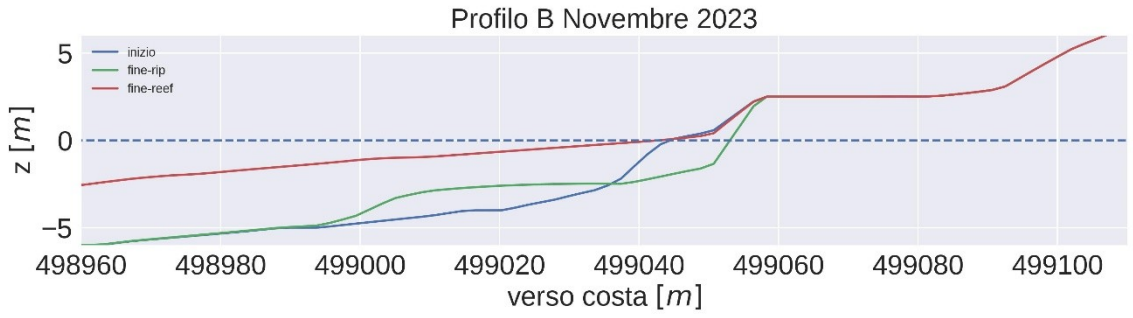
Allegato A1. SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA – RIPASCIMENO SPIAGGE GENERALE. Vedi documento "BIS2E-A-SPG00-RE01-2.pdf".

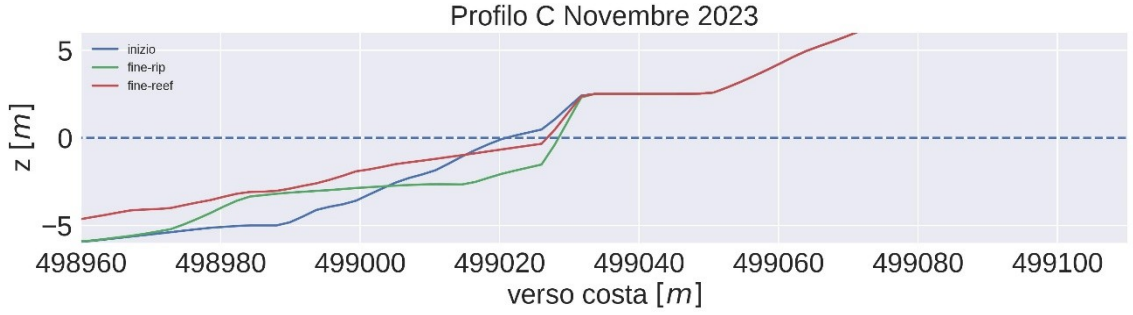
Allegato A2. RIPASCIMENTO SPIAGGE STURLA - PROGETTO DEL RIPASCIMENTO STRUTTURALE - Planimetria nella configurazione di progetto. Vedi documento "BIS2E-A-SPG05-PL01-3.pdf".

Allegato A3. Curve granulometriche per diversi campioni lungo la spiaggia di Sturla. Vedi documenti "Campione-*-Sturla-16012024".**

Allegato A4. Risultati dell'analisi morfodinamica per il caso P23 estratti in corrispondenza dei transetti blu (Profilo A), verde (Profilo B), rosso (Profilo C) mostrati in Figura 14.







FERRI GUIDO
2024.10.17 16:20:49
CN=FERRI GUIDO
C=IT
2.5.4.4=FERRI
2.5.4.42=GUIDO