Comune di CHIAVARI

Piazza Nostra Signora dell'Orto, 1 - 16043 Chiavari (GE)

INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE E DIFESA DEL LITORALE E DELL'ABITATO DI CHIAVARI NEL TRATTO COMPRESO FRA PUNTA DELLE GRAZIE E IL PORTO TURISTICO - PRIMO STRALCIO



PROGETTO ESECUTIVO

All. 1.1.2. - Relazione tecnica variante

Palermo: 11.01.2024

IMPRESA:

ADOR.MARE S.r.l.
Via Quinta Casa, 8 - Palermo 90142
Email: info@adormare.com
Pec: adormare@pec.it

PROGETTAZIONE:

SIGMA INGEGNERIA S.r.l.
Via della Libertà, 201/A - 90143 Palermo
Tel. : 091.6254742
PEC: sigmaingegneriasrl@pec.it

SOMMARIO:

1) Descrizione delle opere previste dal Progetto Esecutivo 4

2) Descrizione della Campagna di Caratterizzazione del materiale da dragare presso la foce del Torrente Entella e motivazioni di introduzione della prima variante progettuale (approvata) 12

3) Descrizione della prima variante suppletiva (approvata) e verifiche sulla stabilità del nuovo profilo di spiaggia 27

4) Criticità osservate all'esecuzione dei lavori sulla Cella n.1, dovute alle eccezionali mareggiate avvenute nei mesi di Ottobre e Novembre 2023 e soluzioni risolutive previste 35

INDICE DELLE FIGURE:

Figura 1 - Indicazione del sito interessato dai Lavori – nella riviera di levante della Liguria 4
Figura 2 - Indicazione di dettaglio del sito interessato dai Lavori, a ponente del porto di Chiavari all'interno del golfo del Tigullio 5
Figura 3 - Mareggiata dell'Ottobre 2018 presso il lungomare di Chivari (GE) 6
Figura 4 - Stralcio sezione scogliera n.2 con proposta di possibile ottimizzazione del progetto definito con scogliera al piede della cella n.3 e della cella n.2 portate da -6.00 m s.l.m. a quota -2.00 m s.l.m. sviluppata dall'impresa e dal progettista indicato per ridurre il fabbisogno di manutenzione della spiaggia e per fornire una ulteriore protezione alla spiaggia in caso di marosi significativi 8
Figura 5 – Stralcio planimetrico stato di Progetto Esecutivo 9
Figura 6 - Foce del Torrente Entella e Barra -A Sx. esempio barra presente a Giugno 2022 (rilievo aerofotogrammetrico eseguito) e a Dx. Esempio barra presente a Ottobre 2018 (google earth) 10
Figura 7 - Stima del volume di salpamento delle scogliere esistenti da riutilizzare – ex. sezione di computo 11
Figura 8 - Stralcio sezione tipo di progetto scogliera al piede del ripascimento cella 2 (a sx.) e cella 3 (a dx.) 11
Figura 9 - Piano di caratterizzazione dei sedimenti marini alla barra del Torrente Entella 12
Figura 10 - Maglia C0 - 0.0 - 0.50 m 14
Figura 11 - Maglia C0 - 0.50 - 1.00 m 15
Figura 12 - Maglia C0 - 1.00 - 2.00 m 16
Figura 13 - Maglia C0 - 2.00 - 3.40 m 17
Figura 14 - Maglia C1 - 0.00 - 0.50 m 18
Figura 15 - Maglia C1 - 0.50 - 1.00 m 19
Figura 16 - Maglia C1 - 1.00 - 2.00 m 20
Figura 17 - Maglia C1 - 2.00 - 3.45 m 21

Figura 18 - Maglia C2 - 0.00 - 0.50 m 22
Figura 19 - Maglia C2 - 0.50 - 1.00 m 23
Figura 20 - Maglia C2 – 1.00 - 2.00 m 24
Figura 21 Maglia C2 - 2.00 - 3.40 m 25
Figura 22 - Materiale grossolano presente presso la barra emersa del Torrente Entella 26
Figura 23 - Complessità di un profilo “reale” di spiaggia in un dato istante temporale 28
Figura 24 - Grafico sperimentale del coefficiente di Drag Cd per particelle in precipitazione in un mezzo liquido 29
Figura 25 - Profili di equilibrio - I cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 30
Figura 26 - Profili di equilibrio - II cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 31
Figura 27 - Profili di equilibrio - III cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 31
Figura 28 - Ripascimento previsto dal Progetto Esecutivo presso la I Cella 32
Figura 29 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella II (sopra) e variante n.1 precedentemente approvata (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia ed un adeguamento della struttura al piede 33
Figura 30 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella III (sopra) e variante n.1 precedentemente approvata (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia 34
Figura 31 - Confronto tra configurazione della spiaggia alla sospensione dei lavori (linea blu - rilievo 21 giugno 2023) e configurazione della spiaggia al 23 Agosto 2023 (linea azzurra) con evidenza delle aree di erosione (in blu) ed aree di accumulo (in verde) 36
Figura 32 - Dati delle mareggiate osservate dalla vicina Boa Ondametrica di La Spezia, facente parte della Rete Ondametrica Nazionale, per il periodo tra il 15/09/2023 ed il 01/12/2023 37
Figura 33 - Foto mareggiata 27/10/2023 presso la prima cella oggetto di intervento 37
Figura 34 - Accumulo del materiale di ripascimento oltre il Pennello P1 a seguito della mareggiata del 27/10 38
Figura 35 - Accumolo del materiale di ripascimento alla radice del Pennello P1 38
Figura 36 - Erosione del materiale alla radice del pennello P2 nella cella 1 39
Figura 37 - Attività di movimentazione dei sedimenti che è stato necessario eseguire al termine delle mareggiate 39
Figura 38 - Foce del Torrente Rupinaro - Foto 13/12/2023 40

Figura 39 - Formazione di occlusione della Foce del Torrente Rupinaro (a levante del Pennello P1) con il materiale di ripascimento, transitato oltre la testata del Pennello P1, dopo la mareggiata del 14/12/2023 (riportata nel dettaglio) – Foto 15/12/2023 40
Figura 40 - Danneggiamenti subiti sul lungomare di Chiavari non ancora interessati dagli interventi in progetto 41
Figura 41 - Previsioni dell'incremento del livello medio del mare previsto al 2050 ed al 2100 per diversi punti del Mediterraneo (Vecchio et al, 2019) – riportato nella relazione "Consulenza tecnico – scientifica per redazione di uno studio per la stima di massima del fabbisogno di manutenzione del lungomare di Chiavari a seguito della realizzazione degli interventi di riqualificazione e difesa del litorale e dell'abitato di Chiavari nel tratto compreso tra Punta delle Grazie e il Porto Turistico" del Progetto Esecutivo 42
Figura 42 - Definizione delle convenzioni utilizzate per le diverse grandezze geometriche di interesse (Goda, 2008 e Tomasicchio e D'Alessandro, 2013) 45
Figura 43 - Planimetria generale progetto proposta di variante 48
Figura 44 - Sezione tipo scogliera soffolta prevista in variante - quota di coronamento al finito a -2.00 m s.l.m. – cella 1 48
Figura 45 - Sezione tipo scogliera soffolta prevista in variante - quota di coronamento al finito a -2.00 m s.l.m. – cella 2 48
Figura 46 - Planimetria del progetto stralcio funzionale (completamento della cella n.1 e n.2 e realizzazione della sola scogliera soffolta della cella n.3) che l'amministrazione intende affidare all'impresa, nell'attesa di reperire le somme necessarie al completamento dell'opera 49

1) Descrizione delle opere previste dal Progetto Esecutivo

Il Progetto Esecutivo per la realizzazione degli "interventi di riqualificazione e difesa del litorale e dell'abitato di Chiavari nel tratto compreso fra punta delle grazie e il porto turistico – I stralcio" è stato sviluppato sulla base delle scelte progettuali eseguite nel livello di progettazione precedente, ovvero il progetto definitivo posto a base gara.

L'area interessata dal Progetto Esecutivo per i "interventi di riqualificazione e difesa del litorale e dell'abitato di Chiavari nel tratto compreso fra punta delle grazie e il porto turistico – I stralcio" è parte della costa del Comune di Chiavari (GE). In particolare, come evidenziato in Figura 1 e Figura 2, l'area è presente nel Golfo del Tigullio, a ponente rispetto al Torrente Entella e al porto turistico di Chiavari.

Come evidente dalle immagini riportate e dagli altri elaborati costituenti il dossier di progetto, il tratto di costa interessato dai lavori in oggetto, così come tutto il lungomare del Comune di Chiavari (GE) è attualmente difeso da un sistema di scogliere emergenti distaccate.

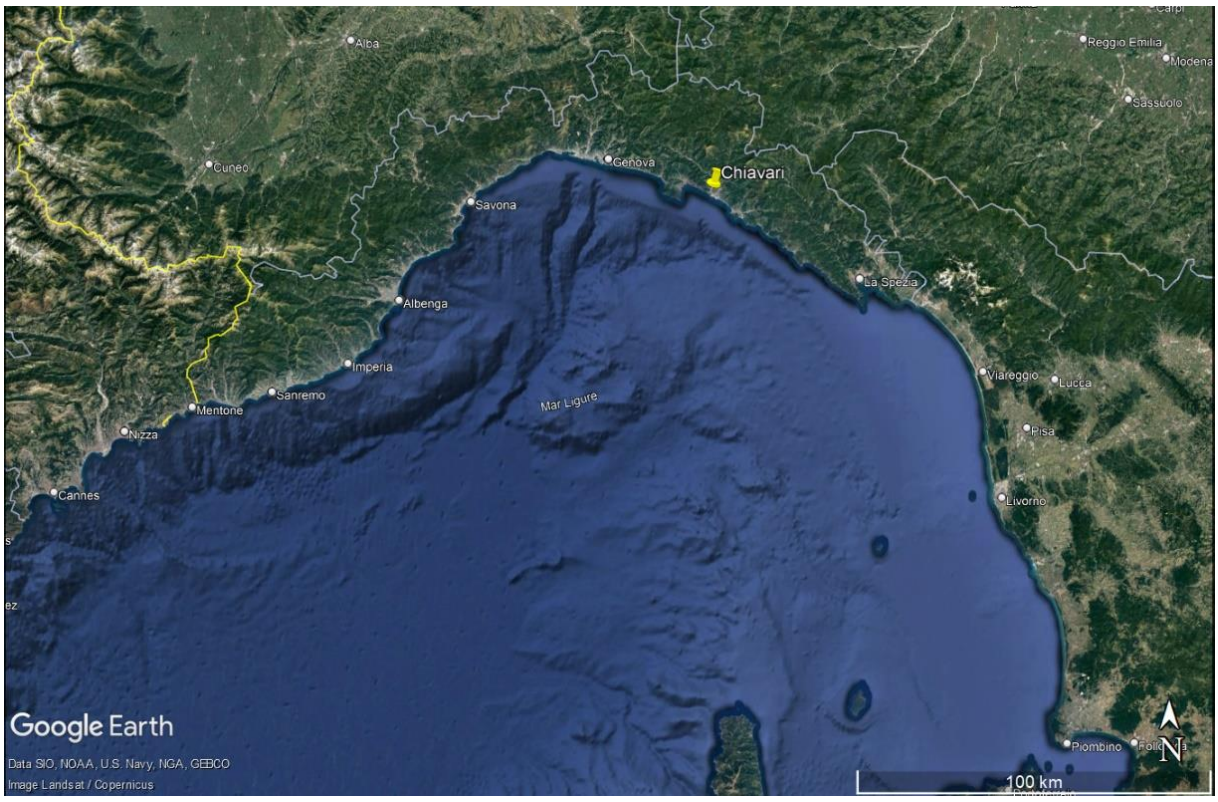


Figura 1 - Indicazione del sito interessato dai Lavori – nella riviera di levante della Liguria

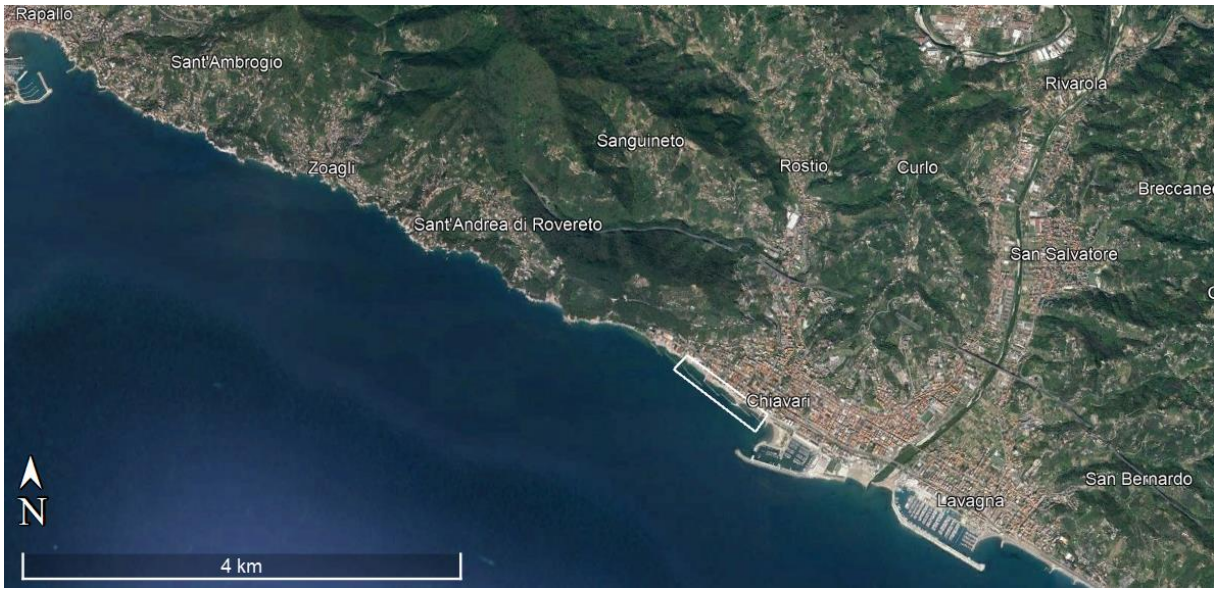


Figura 2 - Indicazione di dettaglio del sito interessato dai Lavori, a ponente del porto di Chiavari all'interno del golfo del Tigullio

L'intervento per la riqualifica e la difesa del lungomare di Chiavari è stato ideato e successivamente finanziato con la doppia finalità di protezione della passeggiata sul lungomare (area densamente urbanizzata con la presenza di diversa abitazioni ed attività commerciali operanti nel settore turistico/ricettivo) che di potenziale sviluppo delle attività balneari, tramite l'eliminazione delle scogliere emerse di protezione del litorale attualmente presenti lungo tutta la costa del comune di Chiavari e la realizzazione di una nuova spiaggia emersa di larghezza molto maggiore.





Figura 3 - Mareggiata dell'Ottobre 2018 presso il lungomare di Chivari (GE)

Come evidenziato dalle immagini sopra riportate (Figura 3) il sistema di scogliere emergenti presenti a protezione del lungomare di Chiavari non riesce a proteggere completamente, in caso di presenza di mareggiate estreme, il lungomare della città, in cui si sono osservati negli anni diversi casi di "overtopping" sia liquido che di materiale asportato dalla spiaggia che viene condotto sulla strada significativo. Tale inefficienza nella dissipazione è sicuramente dovuta sia alla ridotta larghezza in sezione delle scogliere esistenti che anche alla loro elevata vicinanza al muro di sonda della strada esistente, per cui le onde, portate al frangimento dalle scogliere emergenti, arrivano ad impattare con il muro di sponda del lungomare in una condizione di elevata agitazione, ovvero prima di aver compiutamente dissipato per attriti interni grossa parte della propria energia.

Il presente progetto di primo stralcio, di cui un estratto planimetrico è riportato in Figura 5, prevede sostanzialmente la realizzazione di n.3 celle, nello specifico a partire dall'area immediatamente successiva al porto turistico di Chiavari (GE). La tipologia di intervento selezionata dal progettista del livello definitivo è stata quella della "spiaggia dissipativa", ovvero la predisposizione di un intervento che faccia soprattutto affidamento sulla capacità di protezione "dinamica" offerta dai sedimenti utilizzati per il ripascimento. Tale tipologia di intervento, per sua stessa natura per quanto abbia dei vantaggi come la riduzione dei costi iniziale, prevede quindi che possano esserci, in caso di mareggiate anche relativamente frequenti ovvero con cadenza annuale, movimentazioni significative del materiale utilizzato per il ripascimento, senza che questo venga asportato a largo, e dunque la necessità di un/una manutenzione/spianamento del materiale relativamente importante e frequente per permettere la fruibilità della spiaggia, come evidenziato anche dalle risultanze delle prove su modello fisico eseguite presso il laboratorio dell'università degli studi di Firenze facenti parti del

dossier del progetto definitivo posto a base di gara, in cui è anche quantificata la tendenza di tale tipologia di intervento a creare, a seguito di una mareggiata, un grosso accumulo di materiale immediatamente oltre la linea di costa (lato terra) sviluppando di fatto una cresta che, in alcune condizioni testate si è sviluppata sino ad un quota sommitale di +8/9 m s.l.m. . Difatti, tra le 3 celle in cui è suddiviso l'intervento di primo stralcio in esame, ai sensi del progetto definitivo I stralcio, erano dotate solamente di piccole scogliere di sostegno al piede del ripascimento (quota di coronamento -6.00 m s.l.m.) per le due celle più esposte (cella 2 e cella 3) mentre nessuna scogliera era prevista per la cella 1. Il ripascimento della spiaggia è costituito da materiale di grossa pezzatura (30-50 mm) da cava per il 40% in volume o con materiale proveniente dalla barra del fiume Entella, per il 60% in volume.

Alla consegna dell'attività di progettazione esecutiva, al fine di ricercare una soluzione ibrida che mantenendo il principio di funzionamento della spiaggia dissipativa permettesse di **limitare il fabbisogno di manutenzione** e dunque con significativi risparmi economici ed ambientali nel corso della vita utile dell'opera, oltre che per **ottimizzare le prestazioni generali dell'opera**, gli scriventi avevano proposto, con nota del 14 Aprile 2022, una modifica progettuale rispetto all'ipotesi sviluppate nel progetto definitivo, ovvero che prevedesse la realizzazione di una scogliera, sviluppata in modo tale da permettere di non incrementare l'area complessiva di ricoprimento del fondale di progetto dunque sviluppandosi in larghezza verso l'interno ovvero sull'area interessata dal ripascimento, con quota di coronamento più alta pari a -2.00 m s.l.m. ovvero **con maggiore capacità di dissipazione del moto ondoso incidente**, al fine di ridurre il quantitativo di materiale da movimentare al termine di una mareggiata significativa (circa il 50% in meno sia per i casi di mareggiate estreme che di mareggiate che tipicamente avvengono con durata di qualche decina di ore ogni anno ovvero con Hs = 3.00 m), oltre che fornire un ulteriore maggiore sicurezza di difesa della spiaggia.

Sostanzialmente, la soluzione proposta uniformava la scogliera della cella n1, cella n.2 e della cella n.3 (sin dal primo stralcio) con quanto provato su modello fisico e previsto dal progetto definitivo generale per la sezione della scogliera della cella n.4.

Nel corso di riunioni di coordinamento con il R.U.P. e i diversi enti regionali (nella data del 24/05/2022), tra cui la Protezione Civile finanziatrice dell'opera, si è definito di accettare la proposta per la cella 3, portando la scogliera a -2.00 m s.l.m., il cui futuro completamento alla quota di -2.00 m s.l.m. era previsto nell'ambito del progetto definitivo generale per quanto non sarebbe stato possibile rispettare la suddivisione di strati tra mantellata e nucleo della scogliera, ma di non accettare la modifica alla scogliera della cella n.2 e sulla cella n.1, in quanto ritenuta dai progettisti del progetto definitivo nettamente meno esposta alle azioni del moto ondoso rispetto alla cella n.4 a causa del

minore fondale presente. Preso atto di quanto indicato nelle riunioni di coordinamento gli scriventi, ritenendo che la minore esposizione della altre celle (soprattutto per quanto riguarda la cella n.2) rispetto alla cella n.4 sia marginale data la natura del fondali presenti e del funzionamento dei fenomeni morfo dinamici, al fine di frugare ogni dubbio e valutare correttamente il fabbisogno di manutenzione della spiaggia ha commissionato l'esecuzione delle prove su modello fisico per le specifiche configurazioni di interesse della cella n.2 al medesimo laboratorio che ha svolto le prove nell'ambito del progetto definitivo per la cella n.4.

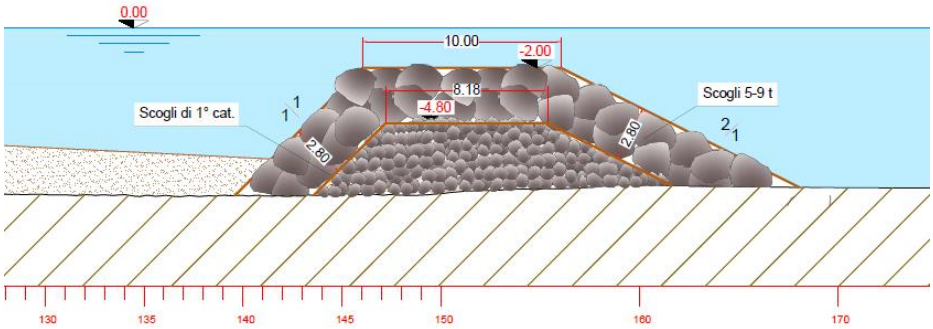


Figura 4 - Stralcio sezione scogliera n.2 con proposta di possibile ottimizzazione del progetto definito con scogliera al piede della cella n.3 e della cella n.2 portate da -6.00 m s.l.m. a quota -2.00 m s.l.m. sviluppata dall'impresa e dal progettista indicato per ridurre il fabbisogno di manutenzione della spiaggia e per fornire una ulteriore protezione alla spiaggia in caso di marosi significativi

Maggiori dettagli sulle risultanze delle prove eseguite nell'ambito del progetto esecutivo sono riportati nello specifico allegato del Progetto Esecutivo. Tuttavia, anche preso atto delle citate risultanze, che sono anche state riportate in uno specifico elaborati di commento tecnico sviluppato dal Prof. Enrico Foti consulente degli scriventi, il RUP ha indicato di non proseguire su tale soluzione progettuale.

Per tanto il progetto esecutivo in fine sviluppato prevedeva le celle di progetto protette in senso ortogonale alla spiaggia da dei pennelli (4) realizzati in scogli naturali di varia pezzatura. In conclusione, nello stato del presente progetto esecutivo, lato mare non è stata prevista la realizzazione di alcuna scogliera per la Cella n.1 (lato porto), la realizzazione di una minuta scogliera al piede del ripascimento con quota di coronamento pari a -6.00 m s.l.m. per la Cella n.2 e la realizzazione di una scogliera soffolta con funzioni dissipative, con quota di coronamento a -2.00 m s.l.m. per la Cella n.3. La lunghezza complessiva del tratto di costa interessato dall'intervento è di circa 1200 m.



Figura 5 – Stralcio planimetrico stato di Progetto Esecutivo

Ogni cella è stata dunque conterminata, nella soluzione del progetto esecutivo, da due pennelli ortogonali alla linea di costa e dal muro esistente lato paese. La cella n.2 e la cella n.3 nelle previsioni del progetto erano delimitate da una scogliera soffolta al piede del ripascimento (-2,00 m s.l.m. per la cella n.3 ed una minuta scogliera al piede a -6.00 m per la cella n.2). Il materiale di ripascimento previsto era costituito, per il 60% in volume, come da previsioni del Progetto Definitivo considerate nella fase di autorizzazione ambientale, da materiale da ripascimento proveniente dalla foce del Torrente Entella, presente tra il porto turistico di Chiavari e quello di Lavagna, che viene spesso dragato per eseguire interventi manutentivi anche straordinari per apporto di sedimenti nei tratti costieri vicini, data anche la funzionalità di tali interventi a favorire il deflusso degli eventi meteorici estremi nel fiume e dunque ridurre il rischio di inondazione nei comuni di Chiavari e Lavagna. Dalle previsioni di Progetto Definitivo, che sono state di seguito riprese dal Progetto Esecutivo, non era considerata alcuna vagliatura o trattamento del materiale presente alla barra del Torrente Entella, di cui si era assunta una dimensione prettamente grossolana compatibile con quella del materiale da Cava (difatti le prove su modello fisico sono state eseguite considerando un'unica tipologia di materiale) La natura della barra del Torrente Entella, dati i frequenti prelievi di materiale ed il significativo apporto di sedimenti che comunque è ovviamente fortemente legato all'andamento degli eventi meteorici, come evidenziato nelle figure di seguito:



Figura 6 - Foce del Torrente Entella e Barra -A Sx. esempio barra presente a Giugno 2022 (rilievo aerofotogrammetrico eseguito) e a Dx. Esempio barra presente a Ottobre 2018 (google earth)

La restante parte del materiale di ripascimento (40% in volume), il cui posizionamento sarà selettivo e realizzato in modo tale da "corazzare" nelle zone maggiormente soggette all'azione del moto ondoso ovvero la parte sommitale del ripascimento il materiale di ripascimento del fiume che avrà una granulometria mista come da previsioni del progetto definitivo, sarà costituito da materiale da frantoio di cava, con pezzatura da 20 a 50 mm.

Tale materiale, per propria natura, sarà inevitabilmente costituito da elementi relativamente spigolosi che, tuttavia, col tempo saranno smussati dall'azione erosiva combinata degli agenti atmosferici e dalle mareggiate.

L'attuale sistema di protezione del lungomare di Chiavari, costituito da scogliere emergenti subparallele alla costa in massi naturali e che sono state oggetto di recenti interventi di rifiorimento conclusi nel 2021 a seguito dei danneggiamenti subiti dalle stesse al seguito della mareggiata avvenuta ad ottobre 2018, saranno salpate coerentemente con il cronoprogramma e la lottizzazione dei lavori in oggetto per la realizzazione delle 3 celle. Il materiale prelevato, in funzione della specifica pezzatura, sarà riutilizzato per la realizzazione dei pennelli e delle scogliere sommerse da realizzarsi nell'ambito del presente progetto esecutivo. Coerentemente alle previsioni del progetto definitivo approvato, ai fini della stima della disponibilità di scogli nelle scogliere esistenti per le diverse categorie necessarie per la realizzazione delle opere in progetto, si è assunta la suddivisione, relativamente ai massi naturali disponibili da salpamento, del 30% di Scogli di II categoria, 40% di Scogli di III categoria e 20% di Scogli di IV categoria. La stima delle disponibilità di materiale è stata eseguita per mezzo della produzione di dettagliate sezioni di computo lungo tutta la lunghezza dei tratti di scogliere esistenti interessati dai salpamenti. Complessivamente si sono stimati salpamenti per oltre 98.000 m^3 vpp.

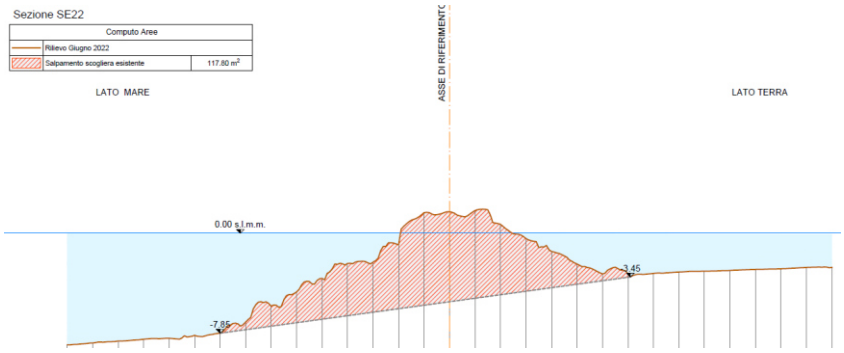


Figura 7 - Stima del volume di salpamento delle scogliere esistenti da riutilizzare – ex. sezione di computo

Le scogliere previste dal Progetto Esecutivo al piede del ripascimento, per le motivazioni sopra esposte, sono state definite con quota di coronamento a -6.00 m s.l.m. per la cella n.2 e a -2.00 m s.l.m. per la cella n.3, costituite rispettivamente con un monostrato di scogli (massi naturali di II e IIII categoria per la scogliera della cella n.2) ed invece sarà composta da un nucleo con materiale di pezzatura inferiore e successiva mantellata (nucleo in scogli naturali di II e III categoria e mantellata in scogli naturali da 5 a 9 tonnellate.

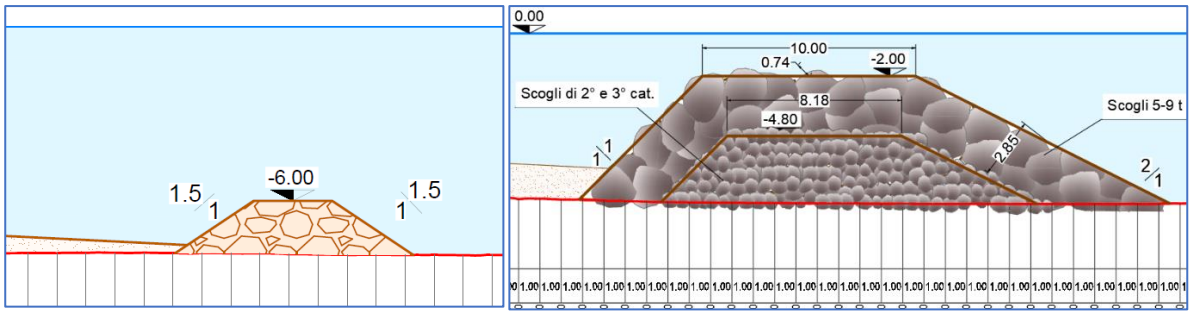


Figura 8 - Stralcio sezione tipo di progetto scogliera al piede del ripascimento cella 2 (a sx.) e cella 3 (a dx.)

Nell'ambito dei lavori in oggetto è anche prevista la realizzazione di n.4 pennelli ortogonali alla linea di costa, che hanno la funzione di definire lateralmente le celle dei ripascimenti, permettendo dunque la possibilità di realizzare le opere secondo il cronoprogramma del progetto definitivo.

Il Progetto Esecutivo è stato verificato ai sensi dell'Art. 26 del D.Lgs 50/2016 ed approvato con Deliberazione di Giunta Comunale n.207 del 19/12/2022.

2) Descrizione della Campagna di Caratterizzazione del materiale da dragare presso la foce del Torrente Entella e motivazioni di introduzione della prima variante progettuale (approvata)

Coerentemente con le previsto del precedente Progetto Definitivo, nel cui quadro economico erano state previste delle somme per l'esecuzione dell'attività di caratterizzazione dei Sedimenti Marini da dragare presso la foce del torrente Entella ai sensi del D.M. 173/2016, il laboratorio Mériux NutriSciences è stato incarcato da parte dell'Amministrazione Comunale di Chiavari per l'esecuzione delle analisi di caratterizzazione dei sedimenti marini presenti presso la foce del Torrente Entella di cui nel progetto di Difesa del Litorale del Comune di Chiavari è previsto il dragaggio al fine di operare parte del ripascimento presso il tratto del litorale di Chiavari oggetto di intervento, ai sensi del D.M. 173/2016. Nello specifico, la caratterizzazione sarà eseguita seguendo il Percorso II di cui all'allegato tecnico al D.M. 173/2016, in quanto "area di foce fluviale non portuale" ai sensi del capitolo 2.1. Stante tale condizioni, la griglia di caratterizzazione è di maglia quadrata con elementi di lato pari a 100 m. Come previsto dalla normativa, è possibile accettare aree residue sino al 50% della misura adottata sino a <5'000,00 mq. Nello specifico come da figura prima riportata, si prevede di caratterizzare l'area di escavo tramite 3 aree unitarie, nelle quali saranno realizzante altrettante verticali di campionamento.

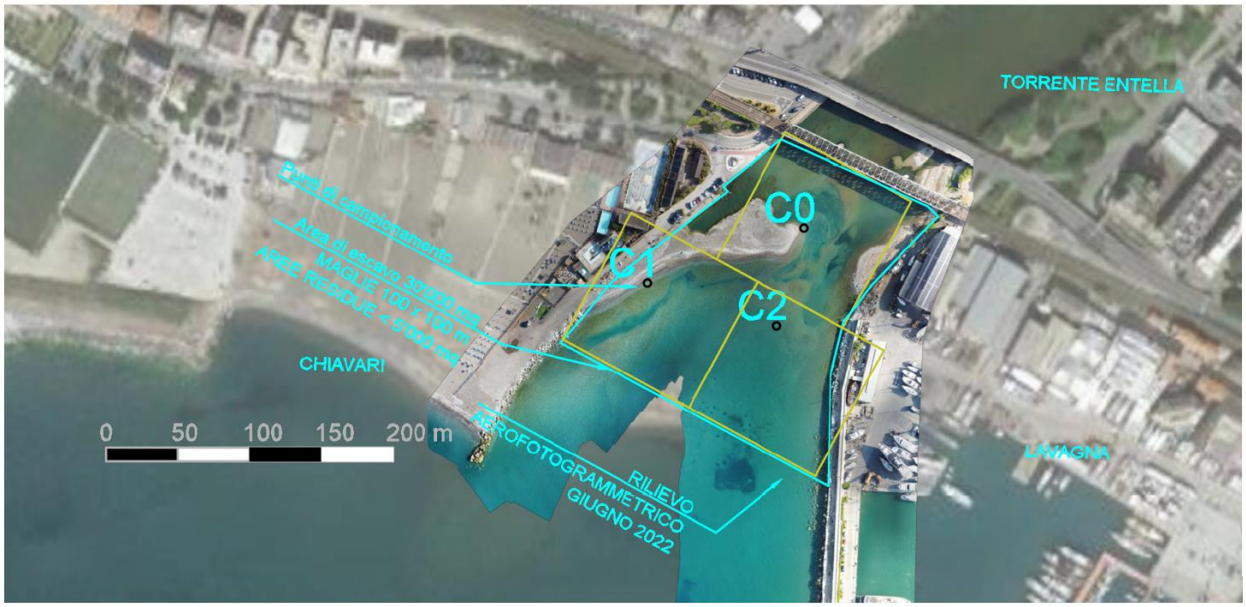


Figura 9 - Piano di caratterizzazione dei sedimenti marini alla barra del Torrente Entella

Ai sensi del capitolo 2.2. dell'allegato tecnico del D.M. 173/2016, per ogni punto di campionamento o verticale, si è previsto di prelevare n.4 campioni, ognuno rappresentativo dei seguenti strati:

- I° campione rappresentativo strato 0 – 50 cm

- II° campione rappresentativo strato 50 – 100 cm
- III° campione rappresentativo strato 100 – 200 cm
- IV° campione rappresentativo strato 200 – 400 cm

Sui campioni prelevati si è previsto di eseguire a caratterizzazione completa ai sensi del D.M. 173/2016:

• Campionamento e caratterizzazione fisica, chimica, microbiologica ed ecotossicologica dei sedimenti del sito da dragare ex par. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 dell'Allegato Tecnico del D.M. 173/20216 (compresa la redazione della Relazione Tecnica di cui al par. 2.2.1) e loro classificazione di cui al p.to 2.7 stesso D.M., **con aggiunta di curva di distribuzione granulometrica – n.12 campioni**

• Caratterizzazione mineralogica e cromatica dei sedimenti del sito da dragare di cui al par. 2.5 dell'Allegato Tecnico del D.M. 173/20216, sui campioni provenienti da una singola verticale – n.4 campioni.

La caratterizzazione dei sedimenti marini, i cui risultati sono stati trasmessi ad ARPAL per l'autorizzazione al dragaggio degli stessi, ha dimostrato la compatibilità ambientale ai sensi del D.M. 173/2016 ai fini di ripascimento in quanto il materiale analizzato è risultato in classe "A", tranne che per lo strato più superficiale della Cella C1 (in cui era stata riscontrata una anomale contaminazione da idrocarburi, per cui il Comune ha predisposto un piano di caratterizzazione di dettaglio anch'esso approvato da ARPAL).

Tuttavia, dai risultati delle indagini granulometriche è risultato evidente come il materiale presente presso la foce del Torrente Entella risulti essere composto, per quota parte rilevante, da materiale di pezzatura decisamente inferiore a quella assunta nel Progetto Definitivo (20 – 50 mm) e con addirittura una componente di "sabbia", ovvero particelle con Dn < 2 mm, pari mediamente a circa il 30%.

Tutti i risultati della caratterizzazione granulometrica sono riportati di seguito. Si rappresenta che in ogni punto la profondità indicata non è riferita al livello medio mare bensì rispetto alla quota del fondale esistente al momento della caratterizzazione del materiale, coerentemente con quanto previsto dal D.M. 173/2016, ovvero con le relative classi di spessore.

Mutual Recognition Agreements

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23135

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		667,94	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	200,50	30,02	30,02	69,98	
16	68,40	10,24	40,26	59,74	
8	77,37	11,58	51,84	48,16	
4	39,64	5,93	57,78	42,22	
2	35,42	5,30	63,08	36,92	
1	46,22	6,92	70,00	30,00	
0,8	25,54	3,82	73,82	26,18	
0,63	37,88	5,67	79,49	20,51	
0,5	40,40	6,05	85,54	14,46	
0,4	40,61	6,08	91,62	8,38	% ghiaia
0,3	31,05	4,65	96,27	3,73	63,08
0,25	9,25	1,38	97,66	2,34	% sabbia
0,125	7,54	1,13	98,78	1,22	36,52
0,063	5,42	0,81	99,60	0,40	% limo/argilla
Fondo	2,70				0,40

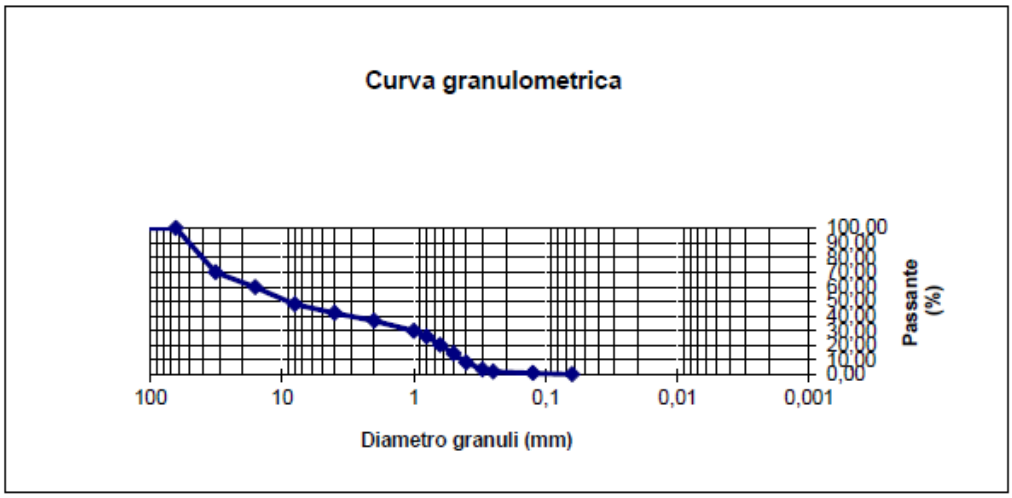


Figura 10 - Maglia C0 - 0.0 - 0.50 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23136

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		702,27	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	249,37	35,51	35,51	64,49	
16	32,42	4,62	40,13	59,87	
8	71,28	10,15	50,28	49,72	
4	52,02	7,41	57,68	42,32	
2	38,35	5,46	63,14	36,86	
1	51,72	7,36	70,51	29,49	
0,8	25,10	3,57	74,08	25,92	
0,63	38,16	5,43	79,52	20,48	
0,5	38,87	5,53	85,05	14,95	
0,4	41,56	5,92	90,97	9,03	% ghiaia
0,3	31,88	4,54	95,51	4,49	63,14
0,25	9,52	1,36	96,86	3,14	% sabbia
0,125	9,62	1,37	98,23	1,77	36,32
0,063	8,63	1,23	99,46	0,54	% limo/argilla
Fondo	3,77				0,54

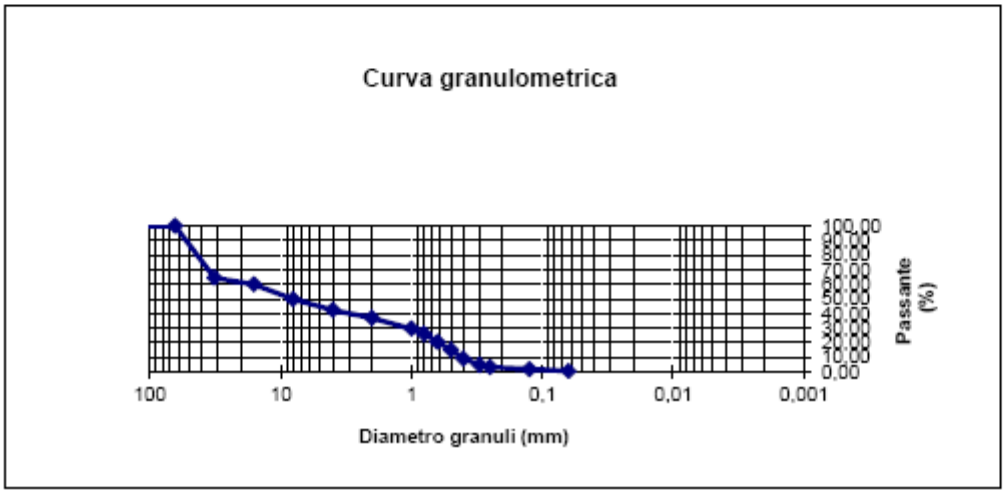


Figura 11 - Maglia C0 - 0.50 - 1.00 m

Mutual Recognition Agreements

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23137

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		811,67	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	229,55	28,28	28,28	71,72	
16	86,43	10,65	38,93	61,07	
8	96,79	11,92	50,85	49,15	
4	89,49	11,03	61,88	38,12	
2	70,86	8,73	70,61	29,39	
1	65,44	8,06	78,67	21,33	
0,8	25,54	3,15	81,82	18,18	
0,63	28,20	3,47	85,29	14,71	
0,5	26,68	3,29	88,58	11,42	
0,4	29,95	3,69	92,27	7,73	% ghiaia
0,3	24,70	3,04	95,31	4,69	70,61
0,25	7,91	0,97	96,29	3,71	% sabbia
0,125	11,25	1,39	97,67	2,33	29,00
0,063	15,70	1,93	99,61	0,39	% limo/argilla
Fondo	3,18				0,39

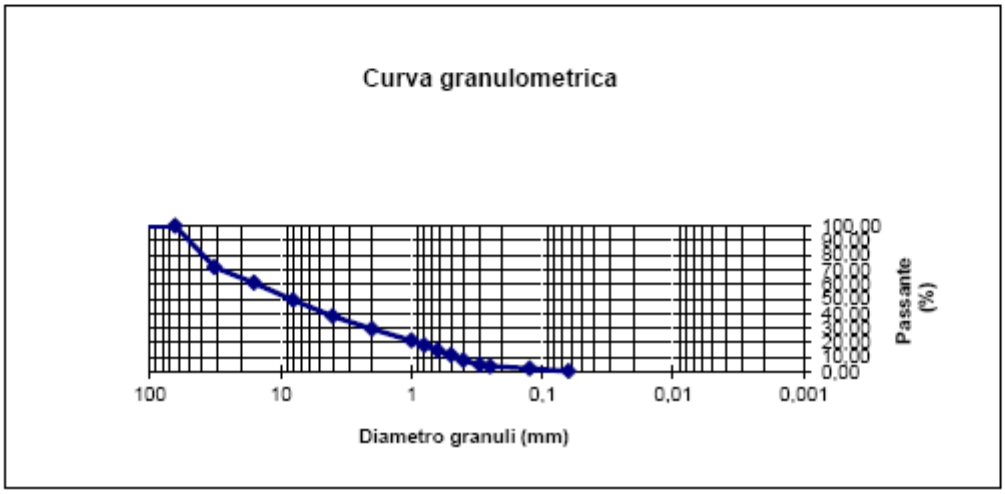


Figura 12 - Maglia C0 - 1.00 - 2.00 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23138

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		885,11	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	49,94	5,64	5,64	94,36	
16	46,17	5,22	10,86	89,14	
8	90,08	10,18	21,04	78,96	
4	98,87	11,17	32,21	67,79	
2	126,64	14,31	46,51	53,49	
1	145,94	16,49	63,00	37,00	
0,8	45,84	5,18	68,18	31,82	
0,63	52,86	5,97	74,15	25,85	
0,5	43,33	4,90	79,05	20,95	
0,4	44,61	5,04	84,09	15,91	% ghiaia
0,3	50,05	5,65	89,74	10,26	46,51
0,25	12,42	1,40	91,15	8,85	% sabbia
0,125	51,14	5,78	96,92	3,08	52,60
0,063	19,37	2,19	99,11	0,89	% limo/argilla
Fondo	7,85				0,89

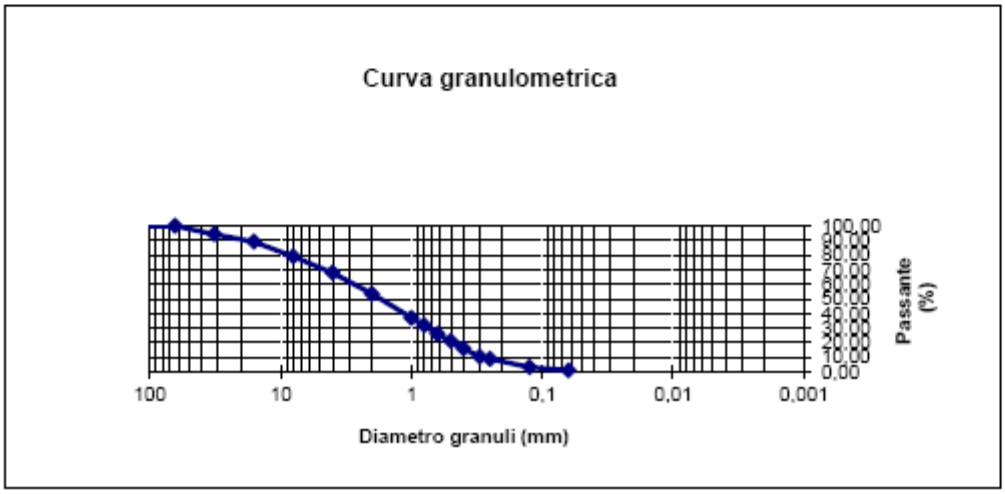


Figura 13 - Maglia C0 - 2.00 - 3.40 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23139

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		857,52	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	341,48	39,82	39,82	60,18	
16	172,04	20,06	59,88	40,12	
8	60,75	7,08	66,97	33,03	
4	64,30	7,50	74,47	25,53	
2	47,90	5,59	80,05	19,95	
1	34,93	4,07	84,13	15,87	
0,8	10,94	1,28	85,40	14,60	
0,63	15,87	1,85	87,25	12,75	
0,5	19,25	2,24	89,50	10,50	
0,4	26,69	3,11	92,61	7,39	% ghiaia
0,3	27,42	3,20	95,81	4,19	80,05
0,25	13,40	1,56	97,37	2,63	% sabbia
0,125	14,48	1,69	99,06	0,94	19,55
0,063	4,69	0,55	99,61	0,39	% limo/argilla
Fondo	3,38				0,39

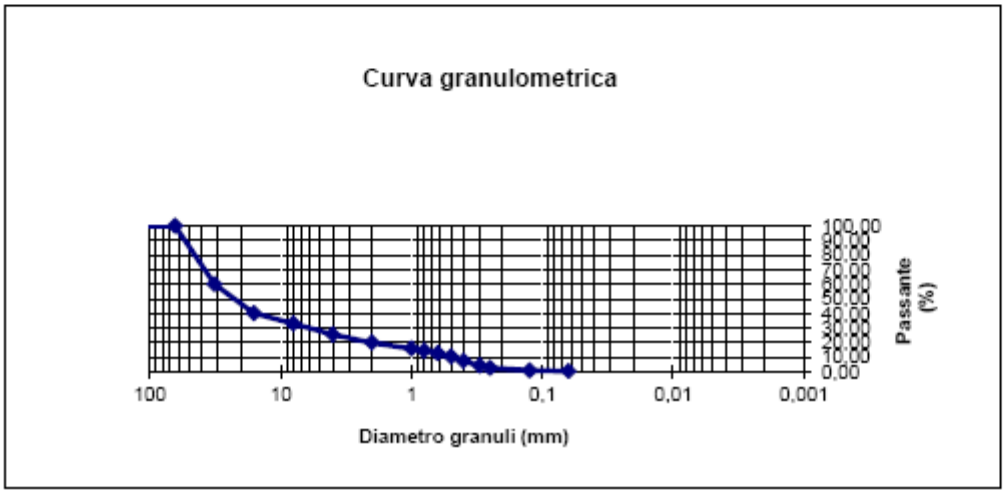


Figura 14 - Maglia C1 - 0.00 - 0.50 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23140

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		984,38	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	358,72	36,44	36,44	63,56	
16	178,99	18,18	54,62	45,38	
8	104,08	10,57	65,20	34,80	
4	70,67	7,18	72,38	27,62	
2	59,39	6,03	78,41	21,59	
1	48,56	4,93	83,34	16,66	
0,8	14,94	1,52	84,86	15,14	
0,63	19,25	1,96	86,82	13,18	
0,5	21,53	2,19	89,00	11,00	
0,4	28,84	2,93	91,93	8,07	% ghiaia
0,3	30,57	3,11	95,04	4,96	78,41
0,25	13,53	1,37	96,41	3,59	% sabbia
0,125	18,60	1,89	98,30	1,70	20,79
0,063	8,87	0,90	99,20	0,80	% limo/argilla
Fondo	7,84				0,80

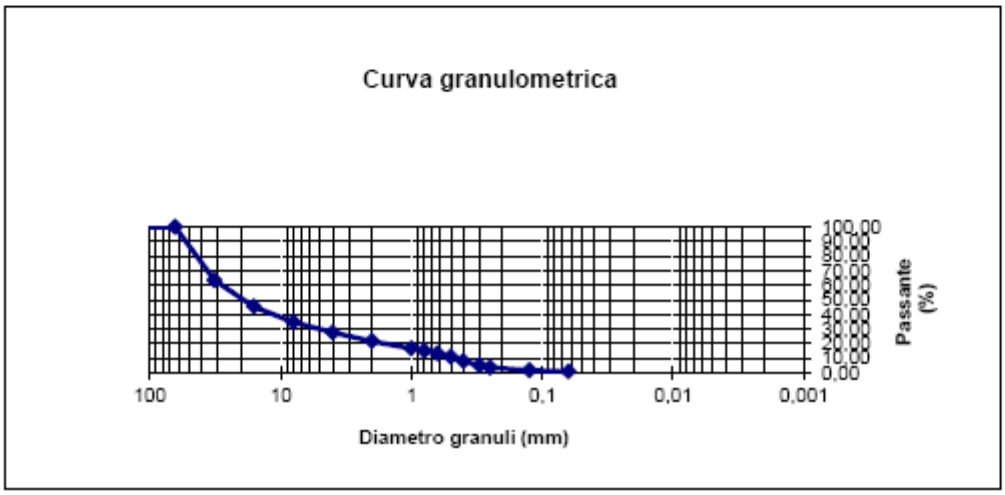


Figura 15 - Maglia C1 - 0.50 - 1.00 m

Mutual Recognition Agreements

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23141

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		678,3	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	152,45	22,48	22,48	77,52	
16	75,15	11,08	33,55	66,45	
8	109,56	16,15	49,71	50,29	
4	82,79	12,21	61,91	38,09	
2	53,83	7,94	69,85	30,15	
1	48,20	7,11	76,95	23,05	
0,8	15,42	2,27	79,23	20,77	
0,63	20,32	3,00	82,22	17,78	
0,5	21,14	3,12	85,34	14,66	
0,4	28,33	4,18	89,52	10,48	% ghiaia
0,3	29,47	4,34	93,86	6,14	69,85
0,25	13,20	1,95	95,81	4,19	% sabbia
0,125	8,16	1,20	97,01	2,99	29,02
0,063	12,60	1,86	98,87	1,13	% limo/argilla
Fondo	7,68				1,13

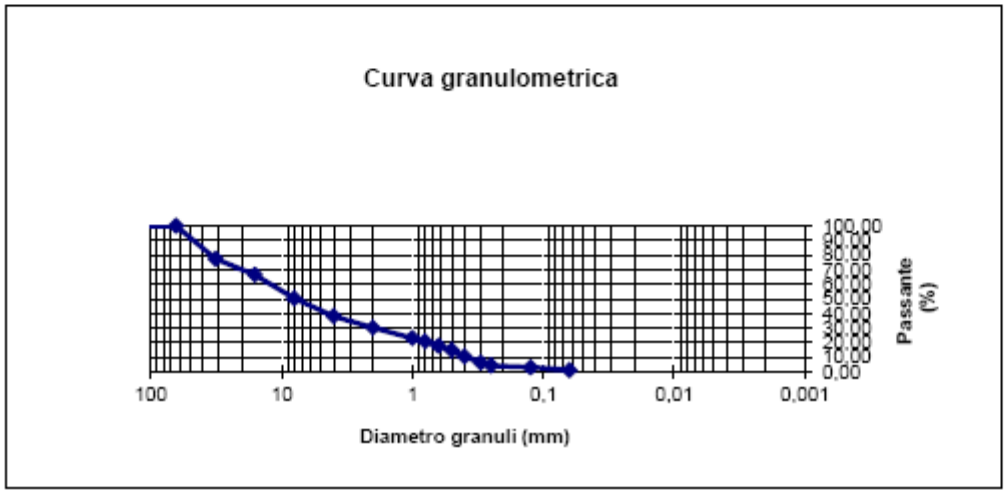


Figura 16 - Maglia C1 - 1.00 - 2.00 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23142

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		770,86	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	198,61	25,76	25,76	74,24	
16	70,60	9,16	34,92	65,08	
8	45,10	5,85	40,77	59,23	
4	62,40	8,09	48,87	51,13	
2	60,65	7,87	56,74	43,26	
1	47,68	6,19	62,92	37,08	
0,8	16,29	2,11	65,04	34,96	
0,63	17,09	2,22	67,25	32,75	
0,5	20,30	2,63	69,89	30,11	
0,4	32,03	4,16	74,04	25,96	% ghiaia
0,3	57,54	7,46	81,51	18,49	56,74
0,25	22,68	2,94	84,45	15,55	% sabbia
0,125	78,85	10,23	94,68	5,32	41,73
0,063	29,20	3,79	98,46	1,54	% limo/argilla
Fondo	11,84				1,54

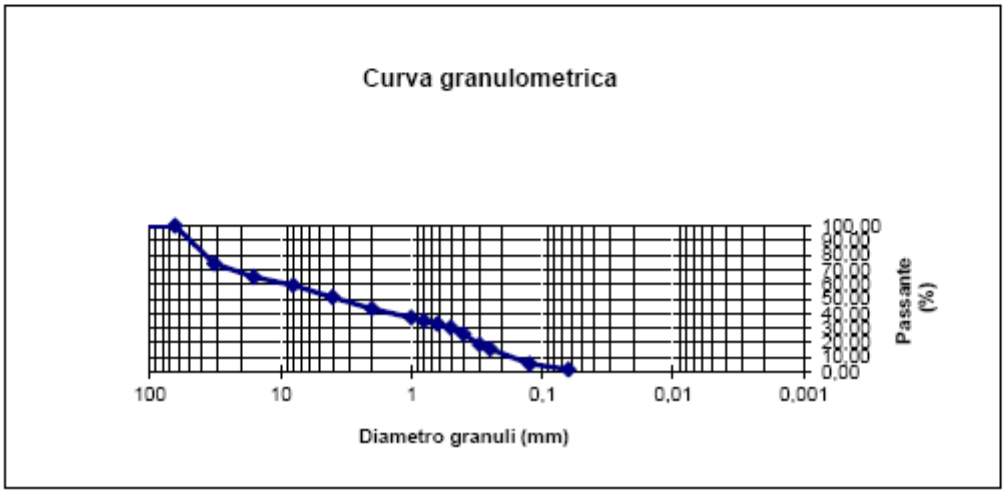


Figura 17 - Maglia C1 - 2.00 - 3.45 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23143

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		938,08	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	303,95	32,40	32,40	67,60	
16	93,20	9,94	42,34	57,66	
8	81,43	8,68	51,02	48,98	
4	101,48	10,82	61,83	38,17	
2	106,35	11,34	73,17	26,83	
1	77,34	8,24	81,42	18,58	
0,8	23,34	2,49	83,90	16,10	
0,63	27,87	2,97	86,88	13,12	
0,5	23,92	2,55	89,43	10,57	
0,4	23,19	2,47	91,90	8,10	% ghiaia
0,3	20,94	2,23	94,13	5,87	73,17
0,25	8,59	0,92	95,05	4,95	% sabbia
0,125	6,51	0,69	95,74	4,26	24,43
0,063	17,51	1,87	97,61	2,39	% limo/argilla
Fondo	22,46				2,39

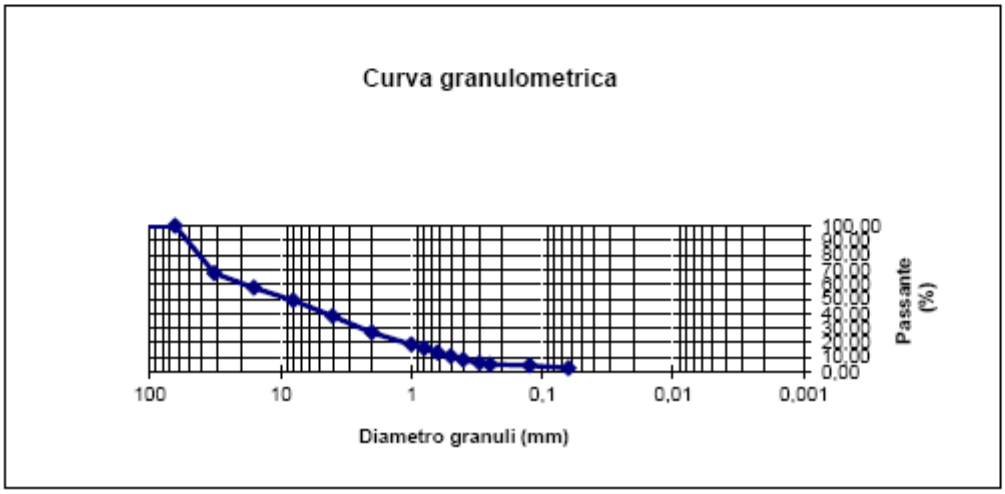


Figura 18 - Maglia C2 - 0.00 - 0.50 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23144

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		690,87	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	79,54	11,51	11,51	88,49	
16	69,68	10,09	21,60	78,40	
8	97,84	14,16	35,76	64,24	
4	90,68	13,13	48,89	51,11	
2	88,68	12,84	61,72	38,28	
1	69,28	10,03	71,75	28,25	
0,8	22,69	3,28	75,03	24,97	
0,63	25,97	3,76	78,79	21,21	
0,5	46,46	6,72	85,52	14,48	
0,4	24,95	3,61	89,13	10,87	% ghiaia
0,3	22,33	3,23	92,36	7,64	61,72
0,25	10,25	1,48	93,85	6,15	% sabbia
0,125	26,11	3,78	97,62	2,38	37,83
0,063	13,31	1,93	99,55	0,45	% limo/argilla
Fondo	3,10				0,45

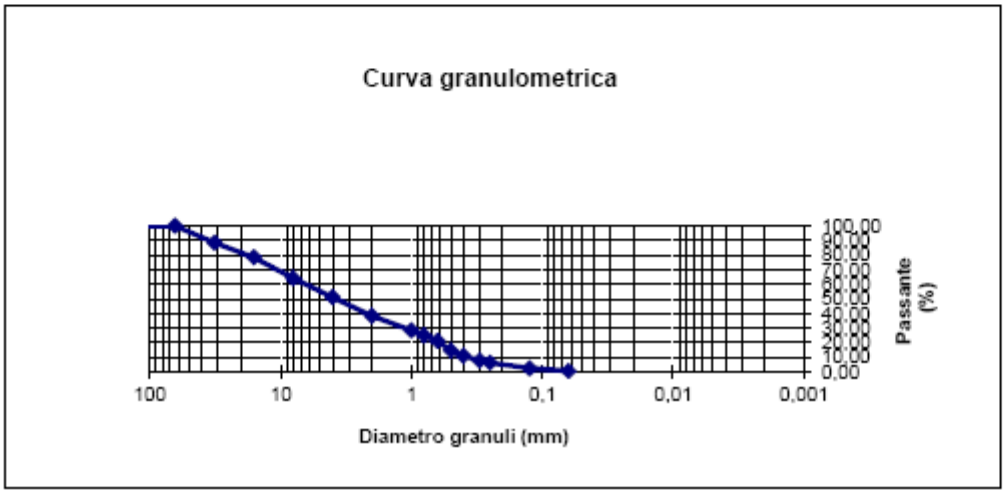


Figura 19 - Maglia C2 - 0.50 - 1.00 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23145

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		800,53	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	193,25	24,14	24,14	75,86	
16	87,33	10,91	35,05	64,95	
8	92,01	11,49	46,54	53,46	
4	90,29	11,28	57,82	42,18	
2	86,44	10,80	68,62	31,38	
1	71,14	8,89	77,51	22,49	
0,8	21,53	2,69	80,20	19,80	
0,63	27,28	3,41	83,60	16,40	
0,5	24,13	3,01	86,62	13,38	
0,4	26,43	3,30	89,92	10,08	% ghiaia
0,3	26,33	3,29	93,21	6,79	68,62
0,25	11,47	1,43	94,64	5,36	% sabbia
0,125	26,55	3,32	97,96	2,04	30,84
0,063	12,06	1,51	99,46	0,54	% limo/argilla
Fondo	4,29				0,54

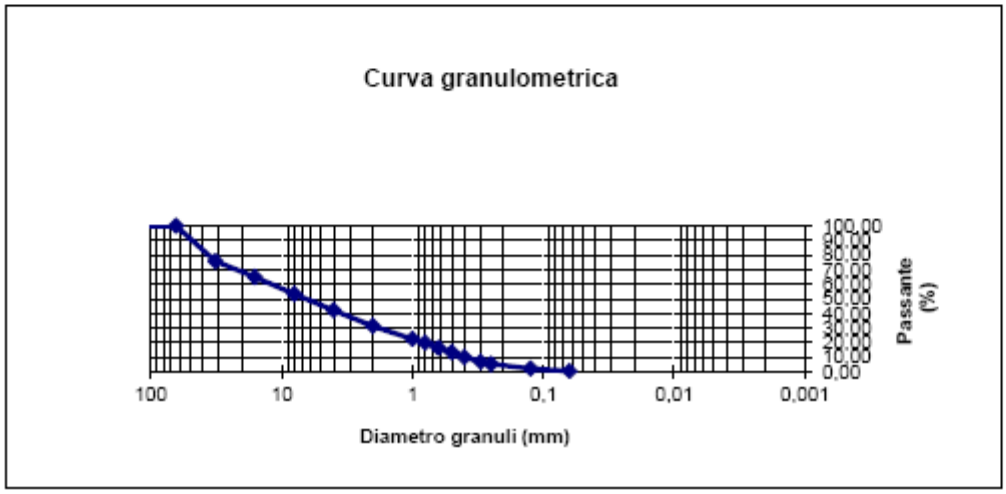


Figura 20 - Maglia C2 – 1.00 - 2.00 m

Allegato 1 al rapporto di prova n°: 22la23146

ANALISI GRANULOMETRICA

		Terreno analizzato M (g)=		962,4	
Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (g)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti (%)	Totale dei passanti (%)	
128	0,00	0,00	0,00	100,00	
64	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	293,31	30,48	30,48	69,52	
16	111,30	11,56	42,04	57,96	
8	148,22	15,40	57,44	42,56	
4	97,27	10,11	67,55	32,45	
2	70,91	7,37	74,92	25,08	
1	68,61	7,13	82,05	17,95	
0,8	25,74	2,67	84,72	15,28	
0,63	34,33	3,57	88,29	11,71	
0,5	34,00	3,53	91,82	8,18	
0,4	33,46	3,48	95,30	4,70	% ghiaia
0,3	24,80	2,58	97,88	2,12	74,92
0,25	8,63	0,90	98,77	1,23	% sabbia
0,125	9,38	0,97	99,75	0,25	24,95
0,063	1,16	0,12	99,87	0,13	% limo/argilla
Fondo	1,28				0,13

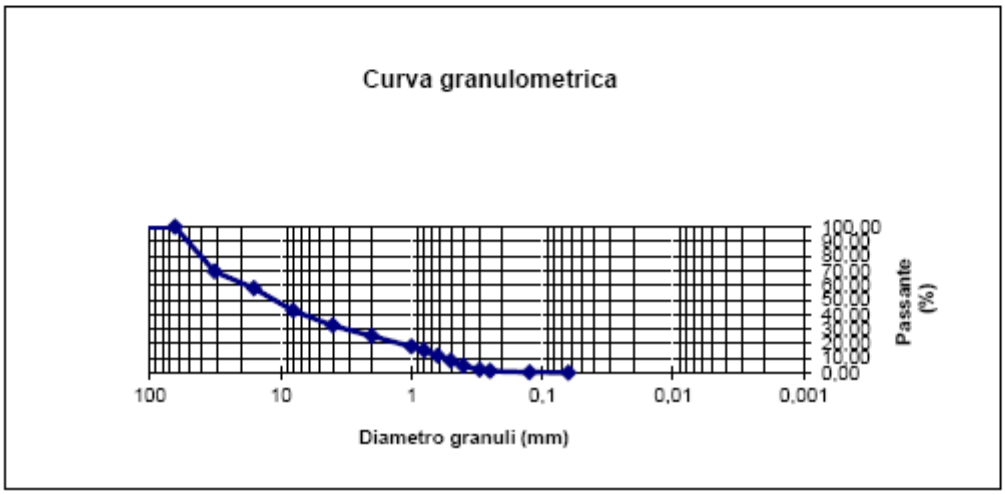


Figura 21 Maglia C2 - 2.00 - 3.40 m

Dai campioni prelevati è risultato evidente come la granulometria del materiale presente presso la foce del Torrente Entella risulti molto variabile e, mediamente, di dimensioni significativamente minori a quelli previste nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo. Inoltre, come segnalato precedentemente, la condizione della Foce del Torrente non risulta essere un sistema statico, bensì molto dinamico con grandi variazioni apportate ad ogni evento di piena significativo, che apporta molto materiale oltre che modificare la condizione della barra presente sulla foce. Mediamente si osserva la presenza di materiale molto più grossolano presso la barra emersa del Torrente, mentre il materiale nella parte sommersa o comunque in profondità risulta di pezzatura più minuta.



Figura 22 - Materiale grossolano presente presso la barra emersa del Torrente Entella

Dati i quantitativi di materiale che si prevedere di dragare presso la barra del Torrente Entella (circa 200.000,00 metri cubi di materiale) non risulta possibile prevedere l'esecuzione di dragaggio selettivo presso le singole zone in cui risultino presenti accumuli di materiale grossolano.

Per le ragioni sopra esposte, derivanti da una condizione imprevedibile relativa alla granulometria del materiale presente presso la foce dell'Entella, è necessario prevedere una variante al Progetto Esecutivo verificato (ai sensi dell'Art. 26 del D.Lgs. 50/2016) ed approvato, in quanto la stabilità di un profilo di spiaggia, è direttamente funzionale alla pezzatura dei sedimenti (semplificata tramite l'adozione del Diametro Mediano o nominale Dn50) ed inversamente proporzionale alla pendenza del profilo di spiaggia stesso. Nello specifico, al fine di garantire la stabilità del ripascimento, come indicato di seguito, si è prevista la riduzione della pendenza complessiva del ripascimento, tramite un incremento del materiale complessivo.

3) Descrizione della prima variante suppletiva (approvata) e verifiche sulla stabilità del nuovo profilo di spiaggia

La stabilità di un profilo di spiaggia, sia esso nesso naturale o artificialmente ricreato tramite ripascimento, risulta essere una proprietà dinamica, intesa in senso complessivo e di media temporale influenzata da vari fattori, tra cui la pezzatura dei sedimenti utilizzati. In generale, un ripascimento eseguito con sedimenti di pezzatura minore risulta meno stabile di uno eseguito con materiale più grossolano. Ci sono due ragioni principali alla base di questo fenomeno.

Prima di tutto, i sedimenti più piccoli sono più facilmente mobilizzati dalle forze idrodinamiche come le onde e le correnti. In altre parole, una materiale più fine ha una maggiore probabilità di essere asportata via dalle forze naturali rispetto ad un sedimento più grossolano (come quello che era stato verificato nell'ambito delle prove su modello fisico del Progetto Definitivo), come dimostrato in vari studi di settore, tra cui "Beach Nourishment and Beach Stability" di Hanson e Kraus (1989).

In secondo luogo, la teoria del profilo di equilibrio della spiaggia suggerisce che ogni spiaggia tende a raggiungere un profilo stabile, o "profilo di equilibrio", che è determinato dalle condizioni ambientali locali (tra cui l'energia delle onde) e le caratteristiche dei sedimenti, come la pezzatura.

La forma del profilo di equilibrio dipende dall'equilibrio tra i processi di deposizione e rimozione di sedimenti sulla spiaggia. Quando le onde hanno energia sufficiente per rimuovere i sedimenti dalla spiaggia, ciò può portare a un cambiamento nel profilo della spiaggia. Al contrario, se le onde depositano più sedimenti di quanti ne rimuovano, la spiaggia può accumulare sedimenti e il suo profilo può cambiare in modo da adattarsi a questo nuovo apporto di materiali.

In particolare, come meglio evidenziato al seguente capitolo, la "pendenza" del profilo di equilibrio (in realtà di forma concava) è direttamente funzionale della pezzatura del materiale di spiaggia.

Il concetto di profilo di equilibrio è stato introdotto da Dean nel 1977 nel suo lavoro "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications".

Dean ha proposto una formula empirica per descrivere il profilo di equilibrio di una spiaggia, basata sull'osservazione che il profilo di una spiaggia in equilibrio tende a seguire una forma parabolica. Ovviamente tale formulazione risulta semplificare fortemente la complessità che il profilo di una spiaggia può assumere in ogni dato momento, essendo tra l'altro lo stesso caratterizzato da fenomeni morfologici che a seguito di singole mareggiate può modificarsi significativamente (Figura 23).

Tuttavia, la teoria del profilo di equilibrio è largamente sfruttata alla base dei progetti di ripascimento costiero, tenendo anche in considerazione che lo stesso "profilo di equilibrio", risulta avvicinarsi molto al profilo medio della spiaggia nel tempo, come dimostrato dai diversi studi eseguiti nel settore.

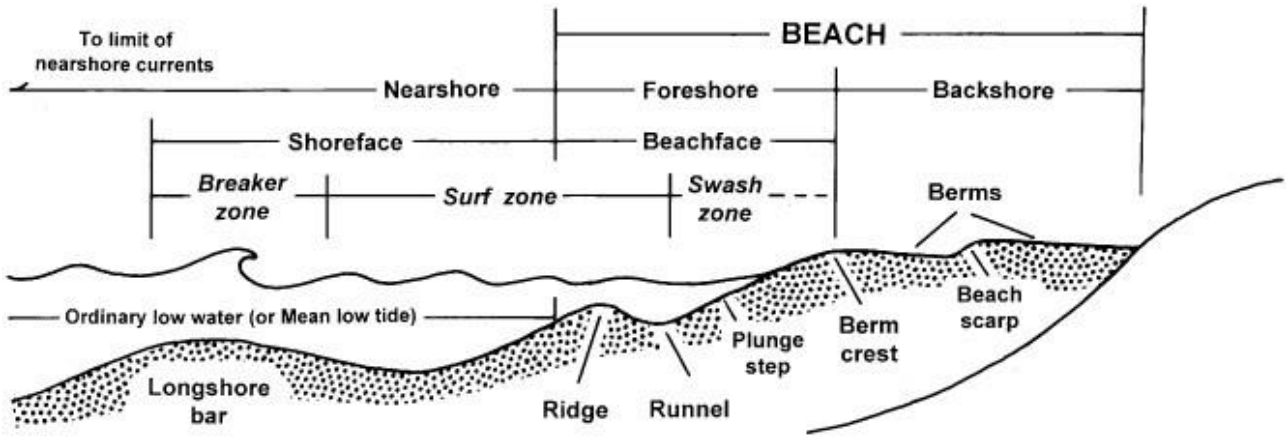


Figura 23 - Complessità di un profilo "reale" di spiaggia in un dato istante temporale

Per un dato clima di onde stabile, il profilo della costa tende, dopo un certo (lungo) periodo, a un profilo di equilibrio, come precedentemente indicato. Questo profilo di equilibrio può essere calcolato applicando formule di trasporto dei sedimenti a un profilo iniziale per un periodo che comprende tutte le condizioni di onda secondo le statistiche locali del clima delle onde. Ciò richiede calcoli pesanti che sono inoltre soggetti a ampi margini di incertezza. Pertanto, spesso si utilizzano profili di equilibrio derivati da osservazioni sul campo. Analizzando un gran numero di profili di spiaggia delle coste californiane e danesi e delle coste atlantiche e del Golfo degli Stati Uniti, Bruun (1954) e Dean (1977) hanno derivato un profilo di equilibrio (spesso chiamato profilo Dean/Bruun) della forma:

$$h(x) = A\,x^n$$

Dove:

- h(x) è la profondità (in metri) ad una distanza x (in metri) dalla linea di costa
- A è un parametro di scala, dipendenti dalle caratteristiche del sedimento
- n è un esponente parametro di forma, che nella formulazione iniziale di Bruun e Dean è stato assunto pari a 2/3, mentre più recenti studi basati su database più grandi (come Inman e altri, 1993 "Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches") hanno più cautelativamente stimato pari a 0.45

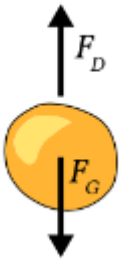
Per quanto concerne il parametro di scala A si è scelto di utilizzare la formula di Kriebel e altri, 1991:

$$A = 2.25\,(w^2_s/g)^{1/3}$$

Dove:

- w_s è la velocità di precipitazione del sedimento (sediment fall velocity) [m/s]
- g è l'accelerazione di gravità, assunta pari a 9.81 m/s^2

Per quanto riguarda la velocità di precipitazione del sedimento, si deve considerare che Quando una particella cade in acqua calma e limpida, essa accelera fino a raggiungere una velocità verticale costante che viene chiamata velocità di caduta o velocità di sedimentazione. Questa velocità può essere valutata dal bilancio tra la forza di gravità diretta verso il basso FG (meno l'effetto della galleggiabilità) e la forza di resistenza diretta verso l'alto FD, come indicato nella Figura a destra:



Il calcolo della forza peso esercitata sulla particella è banale, mentre la forza di drag Fd si può calcolare come:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho w_s^2 \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$$

Dove Cd è un coefficiente di drag della particella. Tale coefficiente tuttavia non può essere considerato constante in ogni condizione, ma è legato alla forma della particella ed al numero di Reynolds del liquido in cui la stessa particella precipita. Il numero di Reynolds (Re) può essere stimato come segue:

$$\mathrm{Re} = w_s D / v$$

Dove v è la viscosità cinematica del mezzo, che per l'acqua di mare a temperatura standard pari a 20°C è pari a 10^{-6} m^2/s, e D è il diametro mediano delle particelle.

Tramite diversi studi sperimentali è stato possibile sviluppare il seguente grafico:

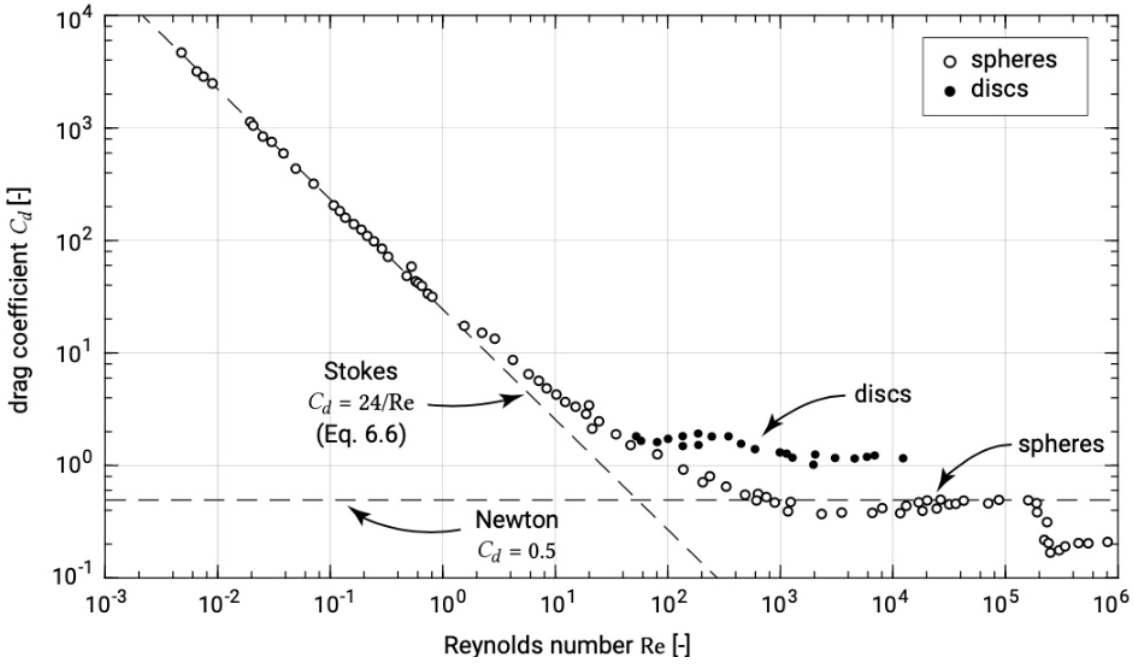


Figura 24 - Grafico sperimentale del coefficiente di Drag Cd per particelle in precipitazione in un mezzo liquido

Al fine di determinare la velocità di sedimentazione dei sedimenti, e dunque il profilo di equilibrio della spiaggia, è fondamentale definire il diametro nominale (Dn50) del materiale di ripascimento. Nel caso in esame sulla scorta delle indagini granulometriche eseguite, **si è scelto di utilizzare come Dn50 8 mm**, valore per cui la percentuale di trattenuti da un setaccio con maglia 8 mm è maggiore o uguale al 50% del peso del materiale per, sostanzialmente 8 sui 12 campioni di sedimento analizzati, ovvero eseguendo una scelta conservativa. Tuttavia, al fine di dimostrare la variabilità della formulazione, si sono considerati anche altri valori di Dn 50 (4, 6, 8, 10, 12 mm).
I valori del numero di Reynolds risultante sono trascritti nella seguente tabella:

	Dn 50 - vari valori [m]				
	0.004	0.006	**0.008**	0.01	0.012
Ws (m/s)	0.40	0.49	**0.56**	0.63	0.69
Re	1589.95	2920.92	**4497.06**	6284.83	8261.62

Essendo il valore del numero 400 < Re < 20000 si può considerare, anche guardando i risultati del grafico in Figura 24, di essere nel cosi detto "range di Newton", **per cui è possibile assumere un valore del coefficiente di drag Cd costante pari a 0.50**. Procedendo al calcolo di ws.

A questo punto, tramite le formule sopra indicate è possibile calcolare i profili di equilibrio per le 3 diverse celle di progetto. La distanza di chiusura del ripascimento è stata ricavata dalla planimetria di Progetto Esecutivo.

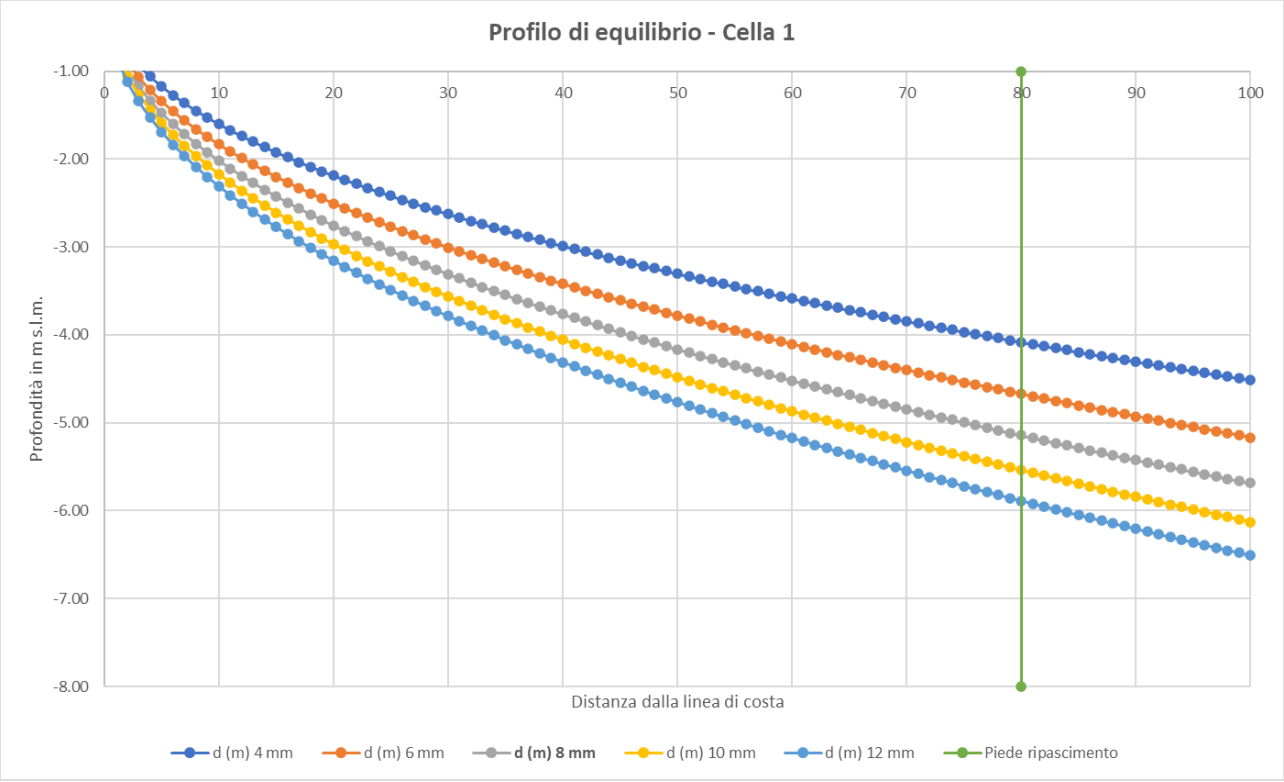


Figura 25 - Profili di equilibrio - I cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

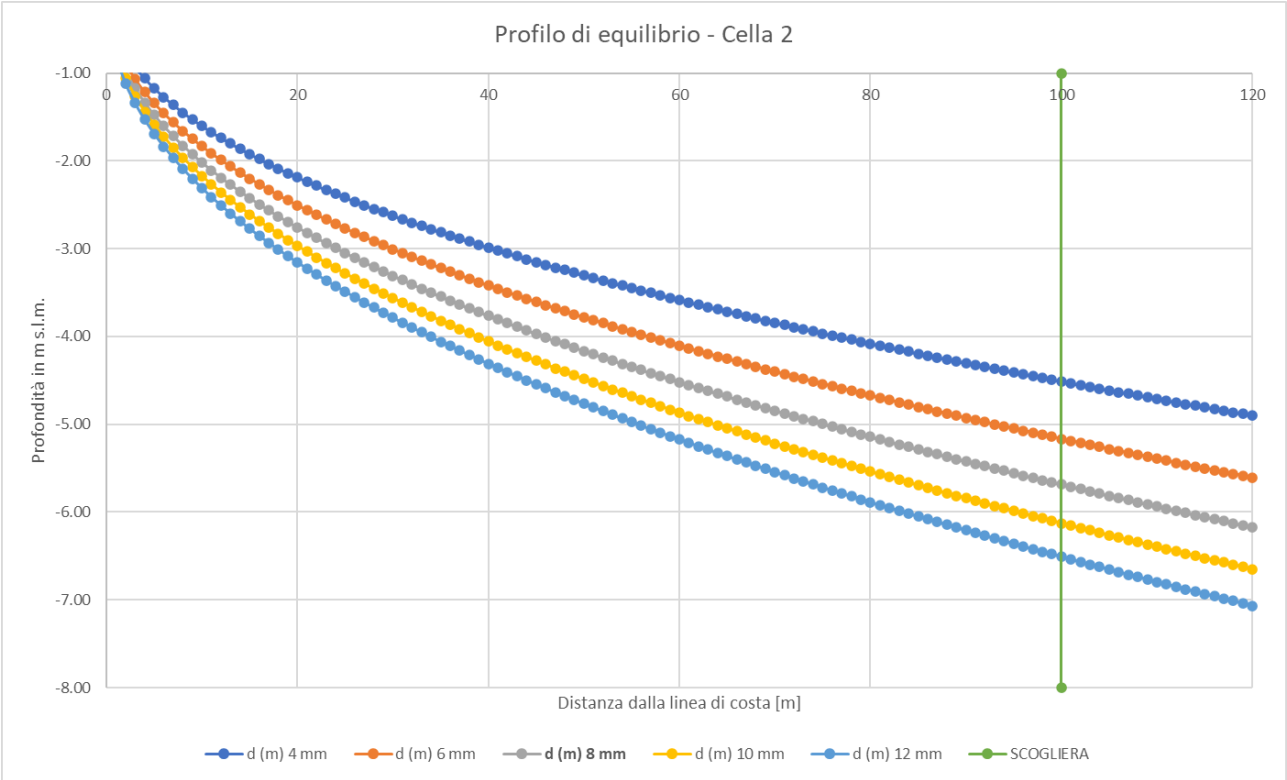


Figura 26 - Profili di equilibrio - II cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

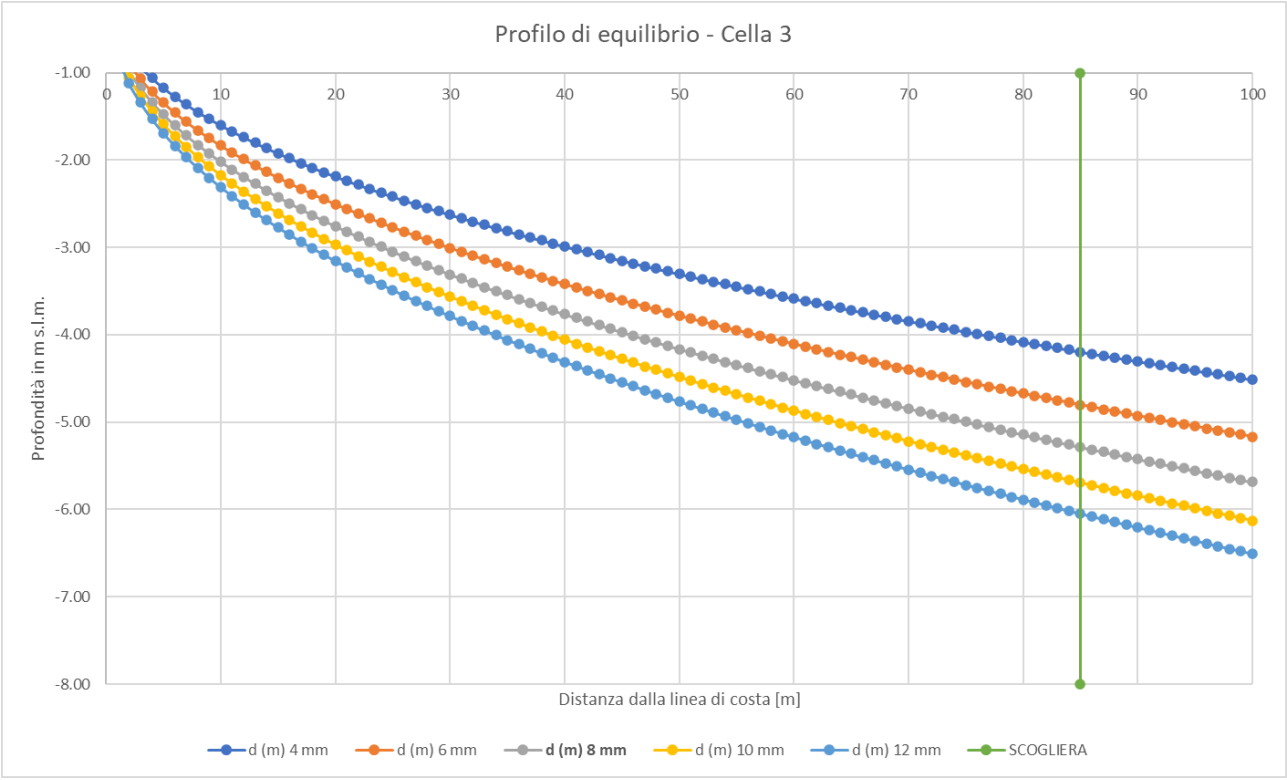


Figura 27 - Profili di equilibrio - III cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

Ovviamente, nell'ambito di realizzazione di un ripascimento, non è possibile posizionare il materiale esattamente secondo il profilo di equilibrio, per cui, si è andati solamente ad indagare la profondità che il profilo di equilibrio avrebbe alla distanza prevista del piede del ripascimento (per la Cella 1) o al piede della scogliera (per la Cella 2 e Cella 3), considerando che un successivo spargimento con pendenza lineare (a partire dalla quota di -2.00 m s.l.m., sopra la quale è previsto sin dal Progetto Definitivo il posizionamento del materiale di cava che estremamente più stabile in quanto più grossolano - pezzatura 20 – 50 mm), sino alla quota del piede del ripascimento (come evidente dai grafici in Figura 25- Figura 26 - Figura 27) andrà a costituire una approssimazione molto vicina al profilo di equilibrio previsto. La quota approssimata è stata arrotondata per difetto (in sicurezza), prevedendo di fatto un maggior apporto di materiale di spiaggia.

	CELLA I	CELLA II	CELLA III
Distanza da piede ripascimento [m]	80	100	85
Quota da profilo di equilibrio [m s.l.m.]	-5.14	-5.69	-5.29
Quota considerata	**-5.00**	**-5.50**	**-5.25**

Di seguito è stato possibile eseguire i seguenti ragionamenti per le 3 celle:

Cella I: Nelle previsioni del Progetto Definitivo, poi riprese dal Progetto Esecutivo, nella prima Cella, data la natura dei fondali, caratterizzati da un basso fondale, nella parte immersa è previsto solo un minimo ricoprimento del fondale attuale, sostanzialmente già in equilibrio stabile anche al di là delle scogliere esistenti, per cui non si ritiene necessario, anche se il materiale di ripascimento dal Torrente Entella è caratterizzato da una pezzatura inferiore a quella prevista, prevedere alcuna modifica relativamente alla quantità di materiale da approvigionare.

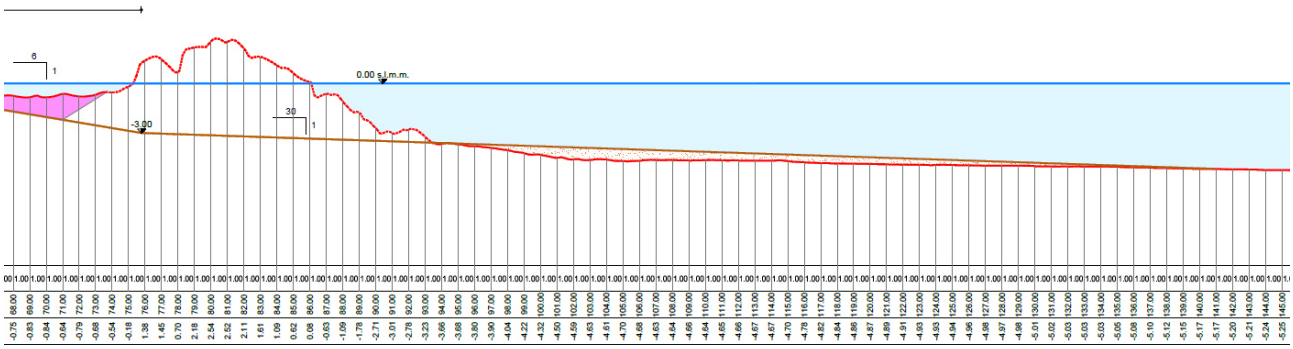


Figura 28 - Ripascimento previsto dal Progetto Esecutivo presso la I Cella

Cella II: Nelle previsioni del Progetto Definitivo, a cui il Progetto Esecutivo è dovuto adeguarsi, nella seconda Cella, caratterizzata da fondali più elevati soprattutto nella parte Nord Orientale, è stato prevista solamente una piccola scogliera al piede del ripascimento, con coronamento a -6.00 m s.l.m. Data la pezzatura inferiore riscontrata sul materiale della foce del Torrente Entella, come indicato in precedenza, è necessario prevedere una riduzione della pendenza del profilo di spiaggia immersa. Nello specifico, come indicato nella precedente tabella, è stato innalzato il livello del piede del ripascimento a -5.50 m s.l.m., apportando maggiore materiale proveniente dal Torrente Entella, motivo per cui è stato anche necessario prevedere un adeguamento della scogliera al piede del ripascimento, ottenuto mediante l'aggiunta di un doppio strato di scogli naturali di III categoria, portando il coronamento ad una quota di -3.50 m s.l.m. ed una larghezza di 4.20 m s.l.m.

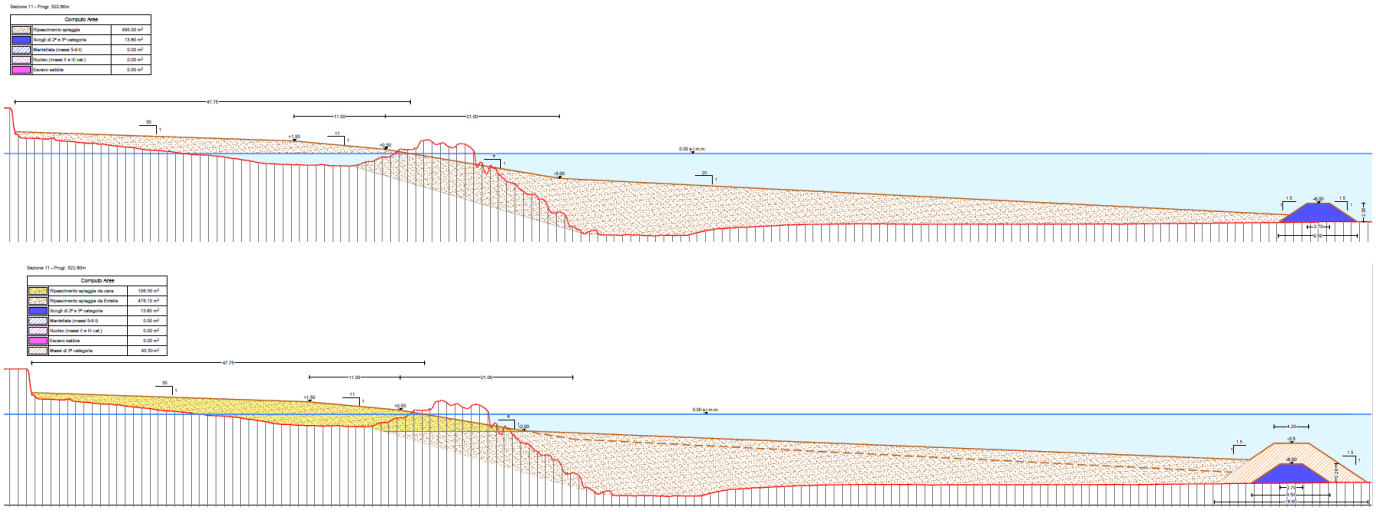


Figura 29 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella II (sopra) e variante n.1 precedentemente approvata (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia ed un adeguamento della struttura al piede

Cella III: Nelle previsioni del Progetto Definitivo – primo stralcio, nella terza Cella, caratterizzata dao fondali maggiori ed una maggiore esposizione al moto ondoso, era prevista solamente la predisposizione, con coronamento a -6.00 m s.l.m., di una scogliera che sarebbe stata successivamente completata a -2.00 m s.l.m. nell'ambito dei lavori del secondo lotto. Come spiegato in introduzione, al fine di risolvere alcune criticità realizzative ed incrementare il livello di sicurezza oltre che per ridurre il fabbisogno di manutenzione, gli scriventi hanno previsto nel Progetto Esecutivo la realizzazione della scogliera della cella III interamente in questa fase dei lavori. Data la pezzatura inferiore riscontrata sul materiale della foce del Torrente Entella, come indicato in precedenza, è necessario prevedere una riduzione della pendenza del profilo di spiaggia immersa. Nello specifico, come indicato nella precedente

tabella, è stato innalzato il livello del piede del ripascimento a -5.25 m s.l.m., apportando maggiore materiale proveniente dal Torrente Entella.

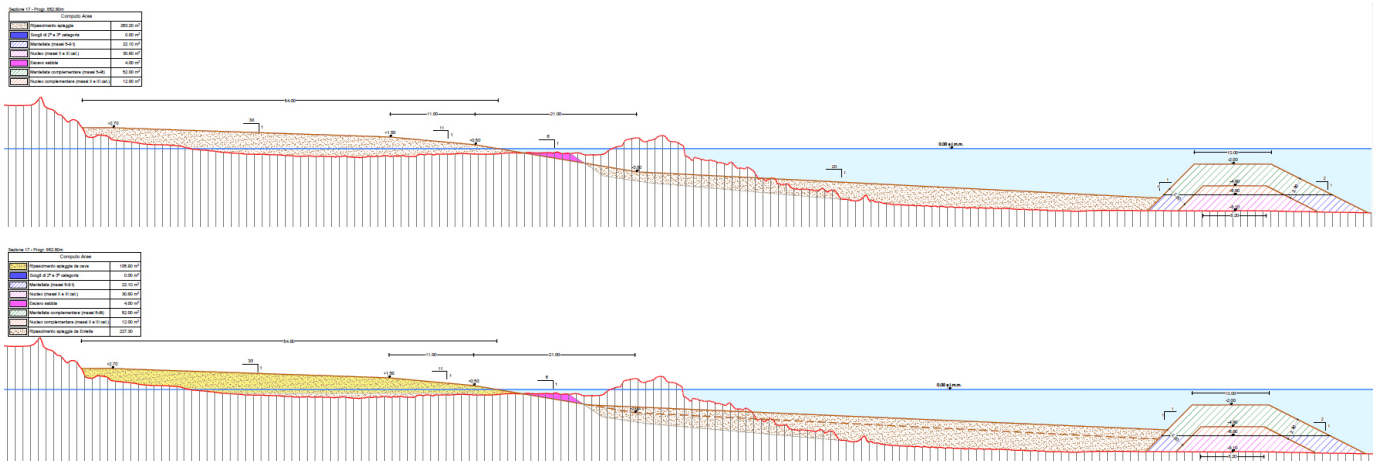


Figura 30 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella III (sopra) e variante n.1 precedentemente approvata (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia

Tale proposta di variante non sostanziale è stata sottoposta, ai sensi dell'art. 6 comma 9 e comma 9 bis del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii., al Settore Valutazione Impatto Ambientale e Sviluppo Sostenibile della Regione Liguria**, il quale si è espresso favorevolmente con nota prot. 2023-0882177 del 28/06/2023.**

4) Criticità osservate all'esecuzione dei lavori sulla Cella n.1, dovute alle eccezionali mareggiate avvenute nei mesi di Ottobre e Novembre 2023 e soluzioni risolutive previste

Coerentemente con le previsioni contrattuali, alla data del 16 Maggio 2023, è intervenuta la sospensione dei lavori per l'inizio della stagione balneare e turistica presso il lungomare del Comune di Chiavari (GE), sino alla data del 15 Settembre 2023.

Alla data di sospensione dei lavori erano stati, sostanzialmente, terminati i lavori di salpamento delle scogliere parallele esistenti presso la cella n.1, la realizzazione del Pennello P1 e del Pennello P2 ed del ripascimento della spiaggia, con materiale da cava e proveniente dal dragaggio della barra del torrente Entella. Rimanevano da completare la definizione in sagoma dei due pennelli realizzati e l'apporto di una parte minoritaria del ripascimento per completare le lavorazioni previste presso la Cella C.1.

Sin dal completamento dei lavori, anche durante la stagione estiva, si è subito evidenziata la prevista elevata mobilità del ripascimento, anche in presenza di mareggiate non particolarmente significative, che ha causato non poche criticità operative nella gestione della spiaggia, con un importante movimentazione del materiale del materiale di ripascimento da ponente verso levante, con conseguente erosione alla radice del Pennello P2 ed accumulo, fino a quasi il superamento della quota di coronamento, lungo il Pennello P1, dove difatti si sono osservate perdite del materiale.

L'elevata mobilità dei sedimenti di ripascimento è dovuta, come evidenziato dalle prove su modello fisico e come indicato segnalato dagli scriventi sin dalla consegna dell'attività di progettazione esecutiva, alla soluzione selezionata nell'ambito del progetto definitivo costituita da un ripascimento libero, ovvero che non prevede la presenza di nessun elemento di protezione parallelo alla costa che permetta di dissipare l'energia del moto ondoso incidente.

Tale evidenza è immediatamente riscontrabile dal confronto tra il rilievo dello stato di fatto della spiaggia alla sospensione dei lavori (analizzata con rilievo del 21/06/2023) e con il rilievo eseguito dall'impresa al 23/08/2023. L'erosione evidenziata dal confronto dei due rilievi ha dimostrato un arretramento della linea di costa, nel tratto più critico, di quasi 20 m rispetto alla configurazione consegnata alla sospensione per stagione balneare dei lavori, come evidenziato dalla seguente figura.

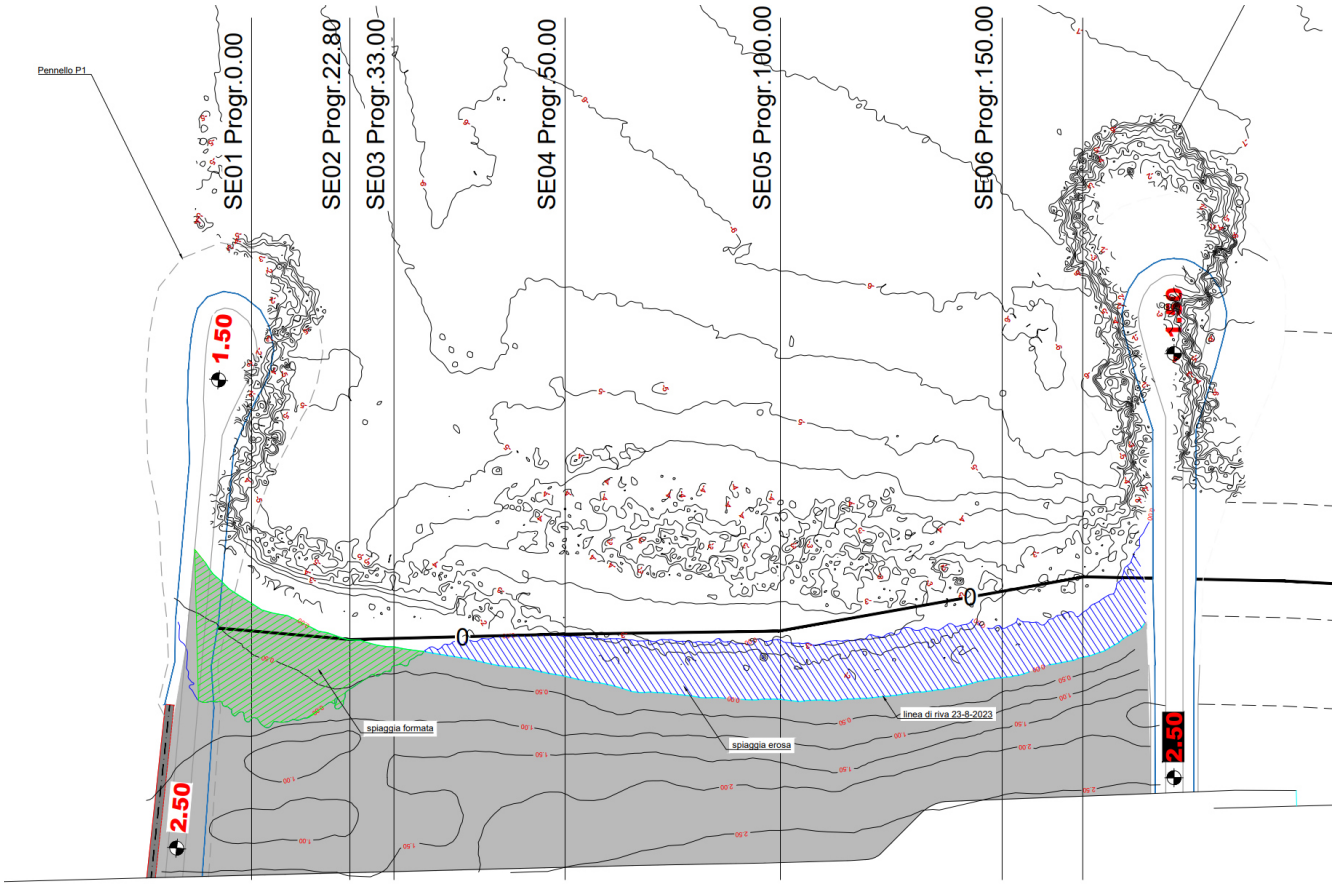


Figura 31 - Confronto tra configurazione della spiaggia alla sospensione dei lavori (linea blu - rilievo 21 giugno 2023) e configurazione della spiaggia al 23 Agosto 2023 (linea azzurra) con evidenza delle aree di erosione (in blu) ed aree di accumulo (in verde)

L'elevata movimentazione dei sedimenti di spiaggia, anche durante la mite stagione estiva, ha comportato oneri significativi per l'amministrazione, che ha dovuto soventemente eseguire operazioni di movimentazione meccanica dei sedimenti di spiaggia con mezzi meccanici, compromettendo la fruibilità della spiaggia stessa da parte dei turisti e dei cittadini di Chiavari.

Al termine della stagione estiva, tuttavia, le criticità del ripascimento libero si sono maggiormente manifestate durante le eccezionali mareggiate che si sono presentate, con distanza temporale estremamente limitata, nel periodo di ottobre e novembre 2023, lungo la costa di levante ligure.

Nello specifico, come evidenziato nella seguente Figura 32, in un periodo di soli 75 giorni, si sono evidenziate 14 mareggiate indipendenti che hanno superato una soglia di altezza d'onda significativa pari a 2.50 m e 5 eventi che hanno superato una soglia di altezza d'onda significativa pari a 4.00 m (considerando come eventi separati eventi distanziati da almeno 12 ore).

Tale concentrazione di eventi eccezionali, sicuramente anomala, ha causato delle criticità su tutto il litorale di Chiavari, e, per quanto riguarda l'area della Cella n.1 in cui era stato realizzato l'intervento previsto nel progetto definitivo ed esecutivo, elevate movimentazioni di materiale da ripascimento.

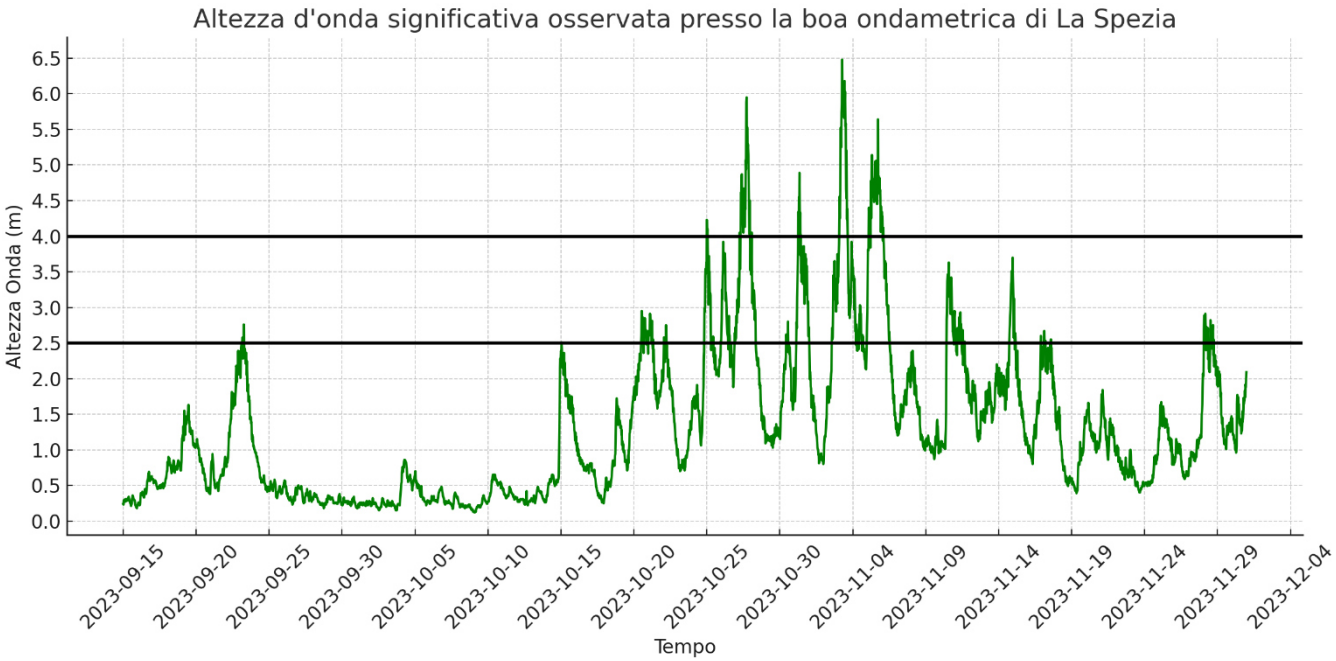


Figura 32 - Dati delle mareggiate osservate dalla vicina Boa Ondametrica di La Spezia, facente parte della Rete Ondametrica Nazionale, per il periodo tra il 15/09/2023 ed il 01/12/2023

Di seguito si riportano alcune fotografie relative agli eventi estremi che si sono susseguiti presso il lungomare di Chiavari nel periodo a cavallo tra il 25 ottobre ed il 05 Novembre. Complessivamente, il tratto in cui è stato eseguito l'intervento (Cella 1) ha subito i minori danni (nessun danno alla passeggiata lungo mare, ma elevata movimentazione del materiale anche oltre il pennello P1 che ha richiesto il pronte intervento di mezzi meccanici), rispetto alla restante parte di lungomare ancora non interessata dagli interventi (in cui si sono verificati diversi danneggiamenti alle strutture ed opere presenti sulla passeggiata lungomare, oltre che un significativo apporto di materiale sulla strada),



Figura 33 - Foto mareggiata 27/10/2023 presso la prima cella oggetto di intervento



Figura 34 - Accumulo del materiale di ripascimento oltre il Pennello P1 a seguito della mareggiata del 27/10



Figura 35 - Accumolo del materiale di ripascimento alla radice del Pennello P1



Figura 36 - Erosione del materiale alla radice del pennello P2 nella cella 1



Figura 37 - Attività di movimentazione dei sedimenti che è stato necessario eseguire al termine delle mareggiate

Le attività di movimentazione del materiale di ripascimento sono state necessarie al fine di ripristinare, per quanto possibile, la configurazione iniziale di spiaggia, ed evitare che una eccessiva quantità di materiale possa superare il limite del pennello P1 verso levante, andando ad invadere la foce del Torrente Rupinaro, con conseguenti problematiche di rischio idraulico oltre che di perdita di materiale di ripascimento apportato.

Anche al termine del completamento della definizione in sagoma del pennello P1 in tutta la sua lunghezza, per cui è stato possibile escludere il transito del materiale di ripascimento al di sopra del pennello, si è osservato un passaggio di materiale oltre la testata del Pennello P1, evidenziando l'opportunità di prevedere una scogliera di protezione al piede del ripascimento, per il contenimento del materiale di ripascimento all'interno della cella. In particolare, il fenomeno è stato recentemente osservato con la mareggiata del 14/12/2023, dove si è osservato un accumulo di materiale proveniente

dal ripascimento con materiale da cava (individuabile dalla spigolosità e colore) della Cella 1, senza che si sia osservato un sormonto del Pennello P1, dando prova di come il materiale abbia oltrepassato la testata del pennello stesso, in quanto la cella non possiede nessuna opera di protezione o contenimento in senso parallelo alla linea di costa. Tale evidenza ha pertanto dimostrato la necessità di prevedere un elemento continuo di contenimento del materiale al piede di tutto il ripascimento della cella n.1 che avesse un duplice effetto: una finalità di dissipazione del moto ondoso per evitare il travaso di materiale al di sopra del coronamento del pennello P1 e aumentare il livello di difesa sul lato opposto della cella dove l'erosione ha ridotto la profondità della spiaggia in modo significativo e una finalità contenitiva per evitare il passaggio del materiale di ripascimento oltre la testata del pennello P1 nel tratto sommerso. Anche nella cella n.2, non ancora interessata dai lavori oggetto del presente progetto, si sono osservati importati spostamenti di materiale verso levante.

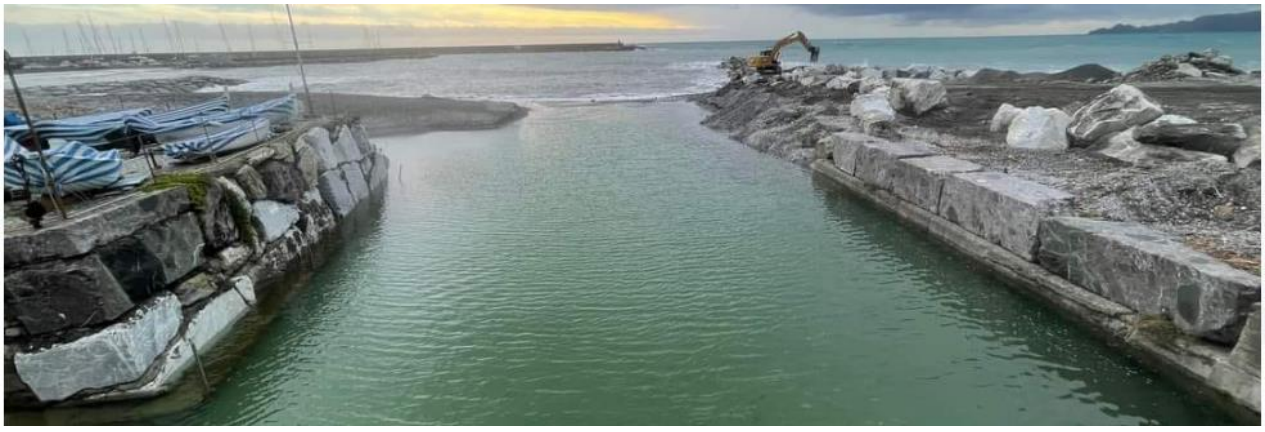


Figura 38 - Foce del Torrente Rupinaro - Foto 13/12/2023



Figura 39 - Formazione di occlusione della Foce del Torrente Rupinaro (a levante del Pennello P1) con il materiale di ripascimento, transitato oltre la testata del Pennello P1, dopo la mareggiata del 14/12/2023 (riportata nel dettaglio) – Foto 15/12/2023



Figura 40 - Danneggiamenti subiti sul lungomare di Chiavari non ancora interessati dagli interventi in progetto

Per tanto, anche al fine di realizzare un'opera con maggiore grado di sicurezza e con minori oneri di manutenzione per il Comune, anche in considerazione della necessaria resilienza ai cambiamenti climatici, che stanno sia esponendo la costa del Comune di Chiavari ad eventi meteomarini estremi con sempre maggiore frequenza ed intensità, che andando a causare un incremento del livello medio del mare, fino a + 60 cm al 2100 rispetto alla condizione attuale per il Mar Ligure, che inevitabilmente aumenterà il rischio di diverse strutture costiera (riducendo, ad esempio, il franco tra le opere esistenti

come la passeggiata del Comune di Chiavari ed il reale livello medio del mare), **con la presente proposta di variante si è previsto di incrementare il livello di protezione del lungomare di Chiavari oggetto di intervento, senza modificare significativamente la tipologia progettuale generale** (che rimarrà, come richiesto dall'ente finanziatore, dal RUP e dalla D.L., una struttura di protezione costiera di tipo morbido, ovvero per il quale si tiene conto della capacità dissipativa della spiaggia da ripascimento e non delle sole scogliere sommerse, anche in considerazione delle prescrizioni riportate nelle norme di attuazione del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero – Ambito 15 – Unità fisiografiche Golfo del Tigullio, Baia del Silenzio e Riva Trigoso)**,** estendendo la previsione di una **scogliera** soffolta dissipativa, parallela alla linea di costa**, anche alle Celle n.1 e n.2**, così come già previsto nel Progetto Definitivo per la sola cella n.3.

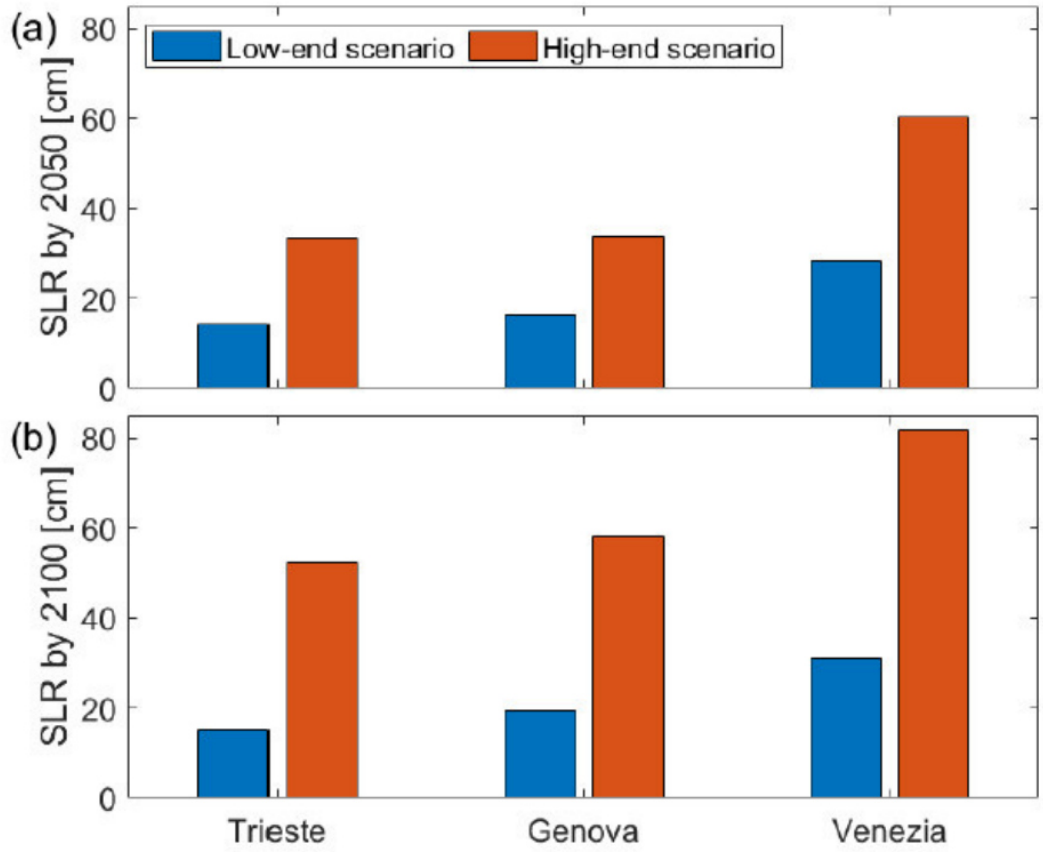


Figura 41 - Previsioni dell'incremento del livello medio del mare previsto al 2050 ed al 2100 per diversi punti del Mediterraneo (Vecchio et al, 2019) – riportato nella relazione "Consulenza tecnico – scientifica per redazione di uno studio per la stima di massima del fabbisogno di manutenzione del lungomare di Chiavari a seguito della realizzazione degli interventi di riqualificazione e difesa del litorale e dell'abitato di Chiavari nel tratto compreso tra Punta delle Grazie e il Porto Turistico" del Progetto Esecutivo

Nello specifico, si prevede di realizzare, come già previsto per la cella n.3, delle scogliere soffolte a chiusura lato-mare delle celle, con le seguenti caratteristiche:

- **Quota di coronamento in esercizio** (a seguito di cedimenti ed assestamenti dopo la realizzazione e prima mareggiate) **almeno pari a -2,00 m s.l.m**.
- **Larghezza della berma di coronamento in esercizio pari a 10,00 m**
- **Mantellata realizzata con scogli da 5 a 9 tonnellate**
- **Nucleo interno per prevenire il trasporto del materiale di ripascimento attraverso la scogliera**

Al fine di garantire il rispetto della quota di coronamento in esercizio sono state inserite (a misura) nel Computo Metrico Estimativo delle quantità di scogli di III e IV cat necessari ad operare puntuali rifiorimenti qualora, puntualmente, si osservasse all'arrivo delle prime mareggiate sull'opera un assestamento della stessa che porti la quota di coronamento media a profondità superiori a -2,00 m s.m.l, garantendo la piena funzionalità dell'opera al termine dei lavori.

Complessivamente, è previsto un incremento delle forniture di materiale lapideo per la realizzazione delle scogliere soffolte pari a **circa 82 mila Tonnellate** (circa 41 mila m^3), ovvero un incremento di circa il 33 % rispetto alle circa 242 mila Tonnellate (circa 122 mila m^3) previsti precedentemente.

Elementi migliorativi

La soluzione selezionata permette di incrementare il livello di sicurezza dell'intervento e la stabilità del ripascimento, oltre a garantire la possibilità di assicurare il contenimento dello materiale di spiaggia apportato all'interno delle celle ovvero escludendo ogni significativa perdita di materiale, senza andare a variare l'impatto ambientale per la realizzazione delle opere, in quanto sostanzialmente risulta invariata la soluzione progettale adottata (viene solamente estesa la soluzione progettuale di frangiflutti sommerso al piede del ripascimento già prevista nella cella 3 a tutte le 3 celle d'intervento – l'intervento, come richiesto dall'ente finanziatore e dal committente, resta complessivamente di tipo "morbido", ovvero relativo ad una spiaggia dissipativa, con un contributo aggiuntivo della scogliera soffolta presente al piede del ripascimento).

Tutto l'incremento di materiale lapideo da approvvigionare in cantiere (pari a circa il 33% delle quantità precedentemente previste) sarà approvvigionato in cantiere direttamente via mare, secondo le modalità già previste ed utilizzate dall'impresa, ovvero con un impatto ambientale e sulla viabilità e sulla città di Chiavari estremamente limitato. Inoltre, la maggiore stabilità che sarà garantita al ripascimento delle celle n.1 e n.2 dalla presenza della scogliera sommersa dissipativa, oltre ad incrementare il livello di sicurezza del lungomare comunale, permetterà di ridurre il fabbisogno di

manutenzione della spiaggia, dimostratosi insostenibile dal monitoraggio e dalla gestione in corso d'opera della cella n.1 attualmente realizzata senza scogliera dissipativa al piede, con grossi vantaggi economici per l'amministrazione ma anche ambientali, in quanto sarà fortemente ridotta la necessità di intervenire con mezzi meccanici in spiaggia (vedasi Figura 37) ovvero di dovere, in futuro, eseguire ulteriori interventi di ripascimento a causa della perdita di materiale di ripascimento dall'area delle celle, che nella soluzione attualmente proposta è impedito dalla presenza delle scogliere al piede anche nella cella n.2 e n.1 che garantiscono il confinamento del materiale nelle rispettive celle.
Avendo mantenuto, su volere dell'Ente Finanziatore, del Committente e della D.L., l'approccio sostenuto dal Progetto Definitivo, relativo ad una protezione costiera di tipo misto, in cui quota parte della capacità di dissipazione del moto ondoso viene delegata alla "spiaggia dissipativa", ovvero non incrementando le dimensioni complessive della scogliera fino a creare una difesa costiera "rigida" capace di garantire una completa stabilità della spiaggia, sarà comunque necessario preventivare degli interventi manutentivi relativi allo spianamento o alla gestione del materiale di ripascimento, solamente che gli stessi risulteranno significativamente ridotti dall'azione dissipativa delle scogliere soffolte con coronamento a -2.00 m s.l.m. e larghezza 10.00 m, che si propone di estendere a tutto l'intervento.

Tali miglioramenti (incremento della sicurezza del lungomare e riduzione del fabbisogno di manutenzione) risultano assicurati dalla capacità di dissipazione di grossa quota parte dell'energia del moto ondoso incidente da parte delle scogliere sommerse, con quota di coronamento in esercizio (a seguito di cedimenti ed assestamenti) pari a -2,00 m s.l.m.. Al fine di dare un'analisi quantitativa, oltre che qualitativa, sulla capacità di dissipazione dell'energia del moto ondoso incidente, si è sviluppata un'analisi analitica che permette di stimare, sulla scorta delle caratteristiche geometriche della scogliera prevista in progetto e delle caratteristiche del moto ondoso incidente alle opere, le caratteristiche del moto ondoso trasmesso a tergo della scogliera soffolta di progetto, ovvero dell'energia dissipata rispetto al moto ondoso incidente.

Nello specifico, le scogliere offshore previste, come già introdotto, sono del tipo low-crested. Per tali strutture, al fine di valutarne l'efficacia a dissipare l'energia del moto ondoso e dunque a proteggere lo specchio acqueo a tergo delle strutture stesse, è necessario andare ad identificare l'altezza d'onda trasmessa (Ht [m]) a tergo della struttura a seguito di un'altezza d'onda incidente alla stessa (Hi [m] = Hs [m]).
Un più moderno metodo sviluppato negli ultimi anni che sfrutta la teoria dell'adimesionalizzazione è quello di Goda (2008), valido sia per frangiflutti sommersi che leggermente emergenti. Questo è

stato calibrato inizialmente sui risultati di 851 simulazioni su modelli fisici diversi e successivamente ricalibrato da Tomasicchio e D'Alessandro (2013) su 3327 diverse simulazioni su modelli fisici in canale da 33 dataset diversi, tra i quali erano presenti sia strutture realizzate in gettata di massi naturali o artificiali e altre impermeabili massive in calcestruzzo. In questa sede si riportano solamente le formule risultanti da questa nuova e più ampia calibrazione. La definizione degli elementi geometrici di riferimento è rappresentato nella seguente figura:

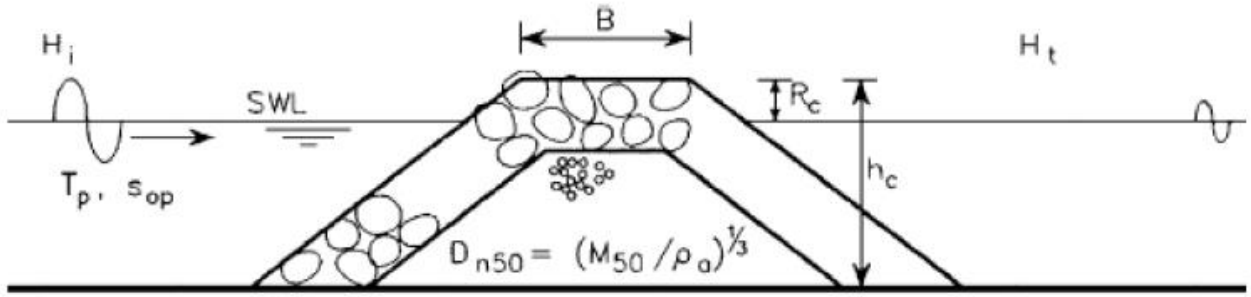


Figura 42 - Definizione delle convenzioni utilizzate per le diverse grandezze geometriche di interesse (Goda, 2008 e Tomasicchio e D'Alessandro, 2013)

Il processo sviluppato dagli autori citati, basato sul teorema Π o di Buckingham, ipotizza che il coefficiente di trasmissione sia esprimibile con una funzione del genere:

$$\boldsymbol{Kt = \frac{Ht}{Hi} = f\left(\frac{Rc}{Hi}, \frac{Hi}{L}, \frac{B_{eff}}{L_0}, \frac{Hi}{D_{eff}}, \frac{d}{Hi}\right)}$$

Dove, oltre alle variabili già indicate in questo capitolo:

- Ht [m] è l'altezza d'onda trasmessa
- Rc [m] è l'elevazione della scogliera, nel caso in esame pari a -2.00 m s.l.m. per la soluzione prevista dalla variante sia per la cella n.1 che la cella n.2
- d [m] è la profondità dell'acqua al piede delle scogliere, assunta pari a d = 6.00 m per la scogliera della cella 1 e d = 8.40 m per la cella 2.
- Hi [m] è l'altezza d'onda incidente al piede della struttura, in questo caso dunque pari ad Hs = 4,90 m per la cella n.2 e Hs = 4.20 m per la cella n.1
- L_0 [m] è la lunghezza d'onda in acque profonde, pari a $= \frac{gT^2}{2\pi}$, dove T è il periodo di picco della mareggiata (pari a 12.20 s) = 232.4 m;

- L [m] è la lunghezza d'onda per la profondità al piede della struttura, ricavabile iterativamente con la formula implicita L = $L_0 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$, nel caso in esame pari a 115.56 m per la cella n.1 e 128.80 m per la cella n.2;
- B_{eff} [m] è la larghezza effettiva, cioè (4 x Larghezza Cresta di Sommità + Larghezza del fondo), pari a 12.40 m per la cella n.1 e 13.84 m per la cella n.2;
- D_{eff} [m] è il diametro nominale dei massi naturali in cui è composta la barriera, pari per la mantellata in esame a 1.38 m per entrambe le scogliere soffolte

Detto ciò, nel metodo in questione si sceglie di studiare separatamente la quantità di onda trasmessa per passaggio di acqua al di sopra della struttura (*overtopping*) è quella che deriva dal passaggio di acqua internamente alla struttura stessa per filtrazione (*through*). Si definiscono quindi i coefficienti di trasmissione parziali Kt_{over} e Kt_{thru} rispettivamente per i due fenomeni.

Questi vengono stimati con le seguenti formule empiriche, in primis per Kt_{thru}:

$$\boldsymbol{Kt_{thru} = 1/\left[1 + C\left(\frac{Hi}{L}\right)^{0.5}\right]^2}$$

$$\boldsymbol{C = 3.450\left(\frac{B_{eff}}{D_{eff}}\right)^{0.65}}$$

Per quanto riguarda il coefficiente per passaggio Kt_{over}:

$$\boldsymbol{Kt_{over} = \max\left\{0, (1 - \exp\left[a\left(\frac{Rc}{Hi} - Rc_0\right)\right]\right\}}$$

$$\boldsymbol{Rc_0 = \begin{cases} 1.0 & se\ D_{eff} = 0 \\ \max\left[0.6, \quad min\left(0.8, \frac{Hi}{D_{eff}}\right)\right] & se\ D_{eff} > 0 \end{cases}}$$

$$\boldsymbol{a = 0.248 \exp\left[-0.384 \ln\left(\frac{B_{eff}}{L_0}\right)\right]}$$

Infine è possibile collegare i due contributi con la seguente formula:

$$\boldsymbol{Kt = \sqrt{Kt_{over}^2 + K_h^2 Kt_{thru}^2}}$$

$$Kh = \min\left[0.8, \frac{Rc}{d + Hi}\right]$$

L'altezza d'onda trasmessa, banalmente, è calcolabile come prodotto del coefficiente di trasmissione Kt per l'altezza d'onda indicente Hi.

Nel caso in esame risulta:

- Kt = 0.62 per la scogliera prevista dalla variante (con coronamento a -2.00 m s.l.m.) per la cella n.1
- Kt = 0.59 per la scogliera prevista dalla variante (con coronamento a -2.00 m s.l.m.) per la cella n.2

Dunque, l'altezza d'onda tramessa immediatamente a tergo della scogliera sarà pari a Ht = 2.62 m per la scogliera prevista dalla variante per la cella n.1 e Ht = 2.88 m per la scogliera prevista dalla variante per la cella n.2 (maggiore in funzione della maggiore altezza d'onda incidente).

Ricordando come l'energia del moto ondoso (E = $^1/_8 \rho g H^2$) sia proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda, si ottiene che l'energia del moto ondoso viene ridotta dalla scogliera di circa il 61 % per la cella n.1 e del 65% per la cella n.2, limitando il potere erosivo o di movimentazione del materiale di ripascimento, oltre che il rischio di overtopping liquido o di materiale sulla passeggiata del lungomare di Chiavari incrementando il livello di sicurezza.

Ovviamente, sarebbe stato possibile incrementare la capacità dissipativa della scogliera soffolta (riducendo ulteriormente la movimentazione del ripascimento a tergo) riducendo la sommergenza (ad esempio a -1.50 m s.l.m.) e/o aumentando la larghezza delle scogliere soffolte. Tuttavia, tali variazioni sarebbero andate a modificare sostanzialmente la soluzione progettuale del Progetto Definitivo, su cui è stato acquisito il parere ambientale di esclusione VIA, e dunque tale ipotesi è stata considerata impraticabile da parte del RUP e dalla D.L. In particolare, il parere dell'Amministrazione e della D.L. è fondato sulle prescrizioni riportate all'Art.8 delle Norme di Attuazione del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero – ambito costiero 15 approvato con Delibera del Consiglio Regionale n.18 del 25/09/2012 vigente sul Comune di Chiavari, che esclude la possibilità di realizzare interventi di protezione delle coste basse interamente basati su opere di difesa costiera parallele alla costa, per cui la soluzione progettuale deve tenere conto delle capacità dissipative della spiaggia.

Si rappresenta inoltre come la scogliera prevista dalla presente proposta di variante presso la cella II non comporti alcun aumento "dell'impronta" complessiva delle opere previste in progetto sul fondale marino naturale, in quanto l'allargamento è stato tutto eseguito verso la battigia, in modo tale che la struttura occupi solamente area che già nel Progetto Esecutivo e nel Progetto Definitivo era previsto che si ricoprisse di materiale di ripascimento. Nell'ambito della Cella n.1 la scogliera prevista dalla proposta di variante è prevista come congiungente le estremità dei pennelli P1 e P2, ovvero totalmente interna all'ambito di intervento già previsto e valutato.

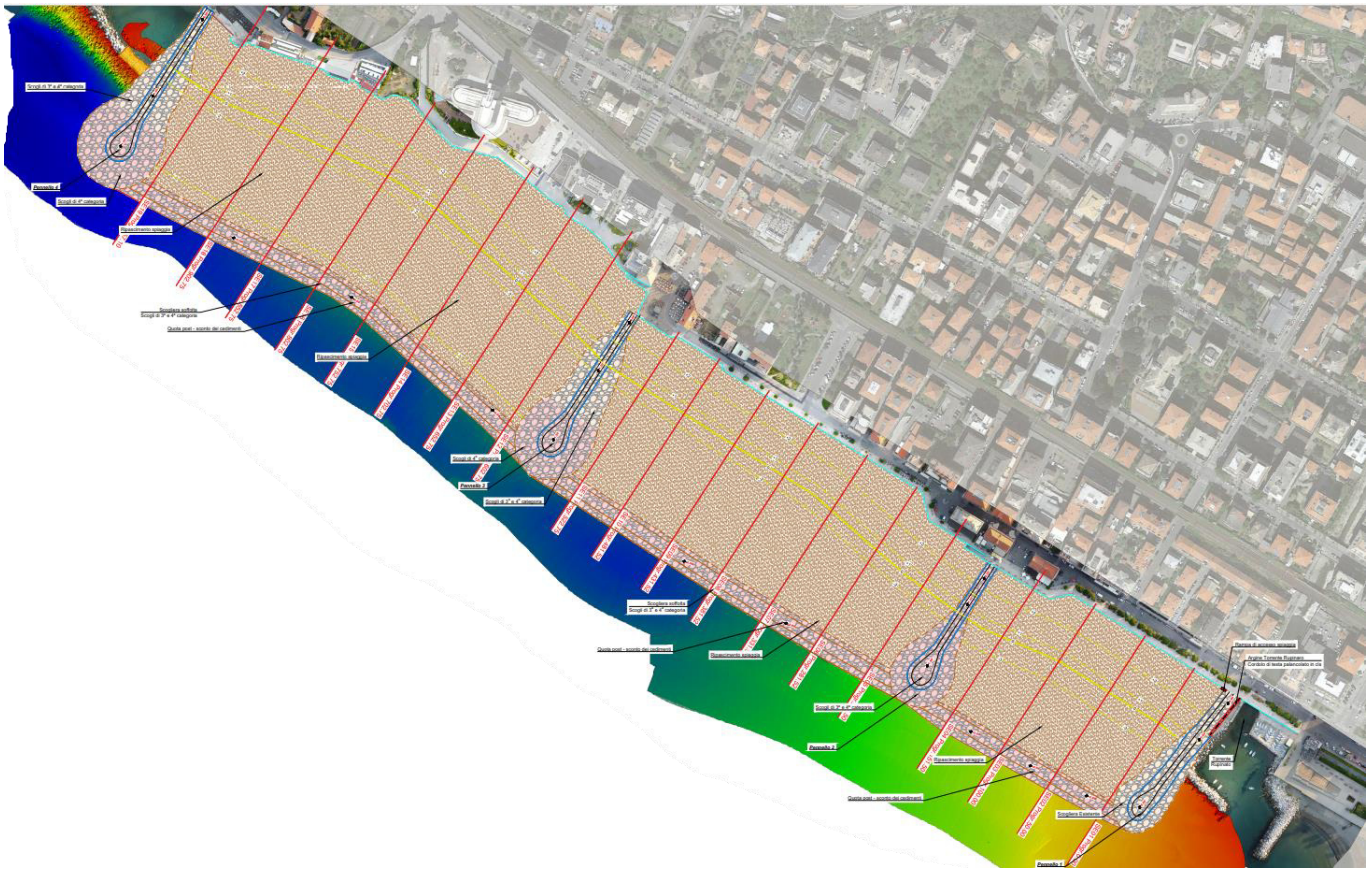


Figura 43 - Planimetria generale progetto proposta di variante

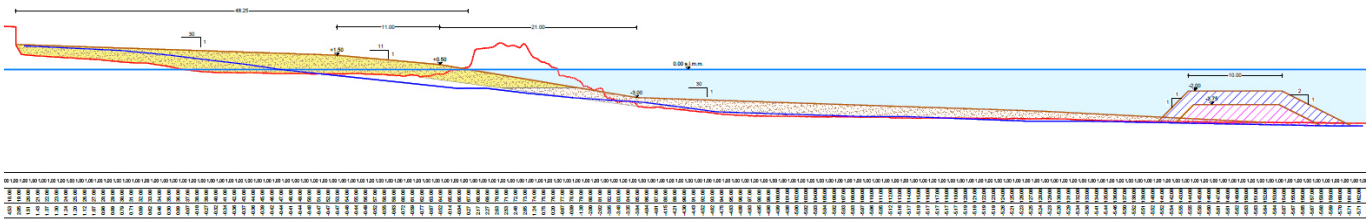


Figura 44 - Sezione tipo scogliera soffolta prevista in variante - quota di coronamento al finito a -2.00 m s.l.m. – cella 1

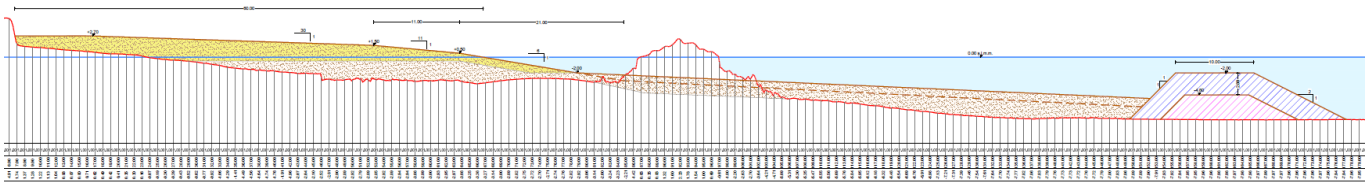


Figura 45 - Sezione tipo scogliera soffolta prevista in variante - quota di coronamento al finito a -2.00 m s.l.m. – cella 2

Inoltre, si segnala come, tenendo conto delle attuali disponibilità economiche presenti nel Quadro Economico di Progetto, il Comune intende inizialmente, in attesa di reperire ulteriori risorse finalizzate a definire l'opera, di affidare all'impresa la realizzazione di una variante stralcio, che prevede il completamento delle celle n.1 e n.2, mentre, relativamente alla cella n.3, si prevede di realizzare la sola scogliera soffolta per la sua completa estensione, senza eseguire dunque il salpamento delle esistenti scogliere emergenti di protezione della spiaggia o il ripascimento e la realizzazione dell'ultimo pennello di levante (P4). Tale stralcio funzionale, garantirà comunque un incremento, rispetto allo stato di fatto, della protezione della spiaggia e del lungo mare (saranno presenti due linee di difesa: le scogliere soffolte esterne di nuova realizzazione e le esistenti scogliere emergenti più vicine alla linea di costa), e non comprometteranno in alcun modo il completamento delle opere, che potrà avvenire (al reperimento delle risorse) tramite il salpamento delle scogliere emergenti esistenti della cella n.3 (utilizzando i massi ricavati da tale attività per la costituzione del pennello P4), il ripascimento come da progetto e la costituzione del pennello P4. Tenendo conto della volontà dell'Amministrazione di portare a compimento l'opera nella sua interezza, resta valido l'obiettivo di completare la cella n.3 con le restanti attività (realizzazione del pennello P4 attraverso il salpamento dei massi delle scogliere esistenti e ripascimento strutturale della cella n.3) in modo da adeguarsi alla configurazione finale, non appena saranno messi a diposizione ulteriori fondi.

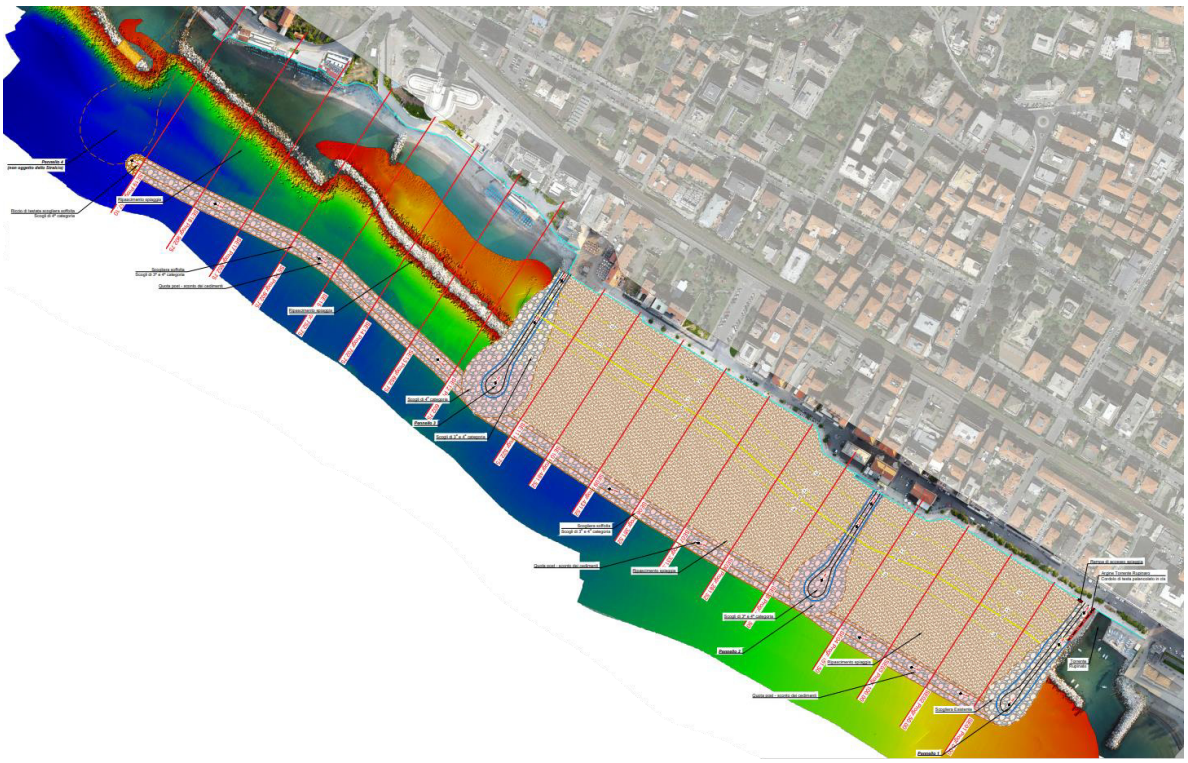


Figura 46 - Planimetria del progetto stralcio funzionale (completamento della cella n.1 e n.2 e realizzazione della sola scogliera soffolta della cella n.3) che l'amministrazione intende affidare all'impresa, nell'attesa di reperire le somme necessarie al completamento dell'opera