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



PERIZIA DI VARIANTE

All.1.10 - Relazione tecnica e descrittiva di variante

Palermo: 16.05.2023

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....3

2) Descrizione della Campagna di Caratterizzazione del materiale da dragare presso la foce del Torrente Entella e motivazioni di introduzione della variante....11

3) Descrizione della proposta di variante suppletiva e verifiche sulla stabilità del nuovo profilo di spiaggia....26

4) Ulteriori vantaggi attesi dalla proposta di variante e sintesi modifiche eseguite....34

INDICE DELLE FIGURE:

Figura 1 - Indicazione del sito interessato dai Lavori – nella riviera di levante della Liguria....3
Figura 2 - Indicazione di dettaglio del sito interessato dai Lavori, a ponente del porto di Chiavari all'interno del golfo del Tigullio....4
Figura 3 - Mareggiata dell'Ottobre 2018 presso il lungomare di Chivari (GE)....5
Figura 4 - Stralcio planimetria 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....7
Figura 5 - 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....7
Figura 6 – Stralcio planimetrico stato di Progetto Esecutivo....8
Figura 7 - 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)....9
Figura 8 - Stima del volume di salpamento delle scogliere esistenti da riutilizzare – ex. sezione di computo....10
Figura 9 - Stralcio sezione tipo di progetto scogliera al piede del ripascimento cella 2 (a sx.) e cella 3 (a dx.)....10
Figura 10 - Piano di caratterizzazione dei sedimenti marini alla barra del Torrente Entella....11
Figura 11 - Maglia C0 - 0.0 - 0.50 m....13
Figura 12 - Maglia C0 - 0.50 - 1.00 m....14
Figura 13 - Maglia C0 - 1.00 - 2.00 m....15
Figura 14 - Maglia C0 - 2.00 - 3.40 m....16
Figura 15 - Maglia C1 - 0.00 - 0.50 m....17

Figura 16 - Maglia C1 - 0.50 - 1.00 m 18
Figura 17 - Maglia C1 - 1.00 - 2.00 m 19
Figura 18 - Maglia C1 - 2.00 - 3.45 m 20
Figura 19 - Maglia C2 - 0.00 - 0.50 m 21
Figura 20 - Maglia C2 - 0.50 - 1.00 m 22
Figura 21 - Maglia C2 – 1.00 - 2.00 m 23
Figura 22 Maglia C2 - 2.00 - 3.40 m 24
Figura 23 - Materiale grossolano presente presso la barra emersa del Torrente Entella 25
Figura 24 - Complessità di un profilo “reale” di spiaggia in un dato istante temporale 27
Figura 25 - Grafico sperimentale del coefficiente di Drag Cd per particelle in precipitazione in un mezzo liquido 28
Figura 26 - Profili di equilibrio - I cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 29
Figura 27 - Profili di equilibrio - II cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 30
Figura 28 - Profili di equilibrio - III cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato 30
Figura 29 - Ripascimento previsto dal Progetto Esecutivo presso la I Cella 31
Figura 30 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella II (sopra) ed attuale proposta di variante (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia ed un adeguamento della struttura al piede 32
Figura 31 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella III (sopra) ed attuale proposta di variante (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia 33

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.

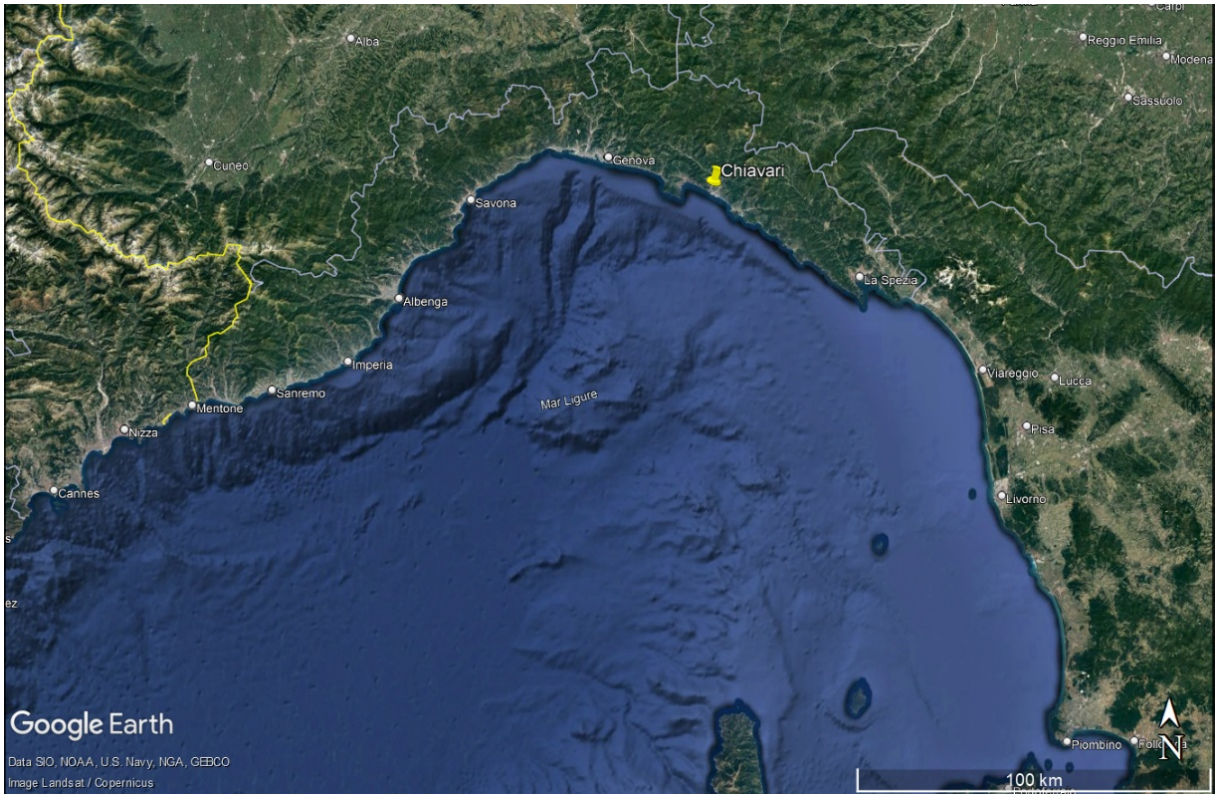


Figura 1 - Indicazione del sito interessato dai Lavori – nella riviera di levante della Liguria

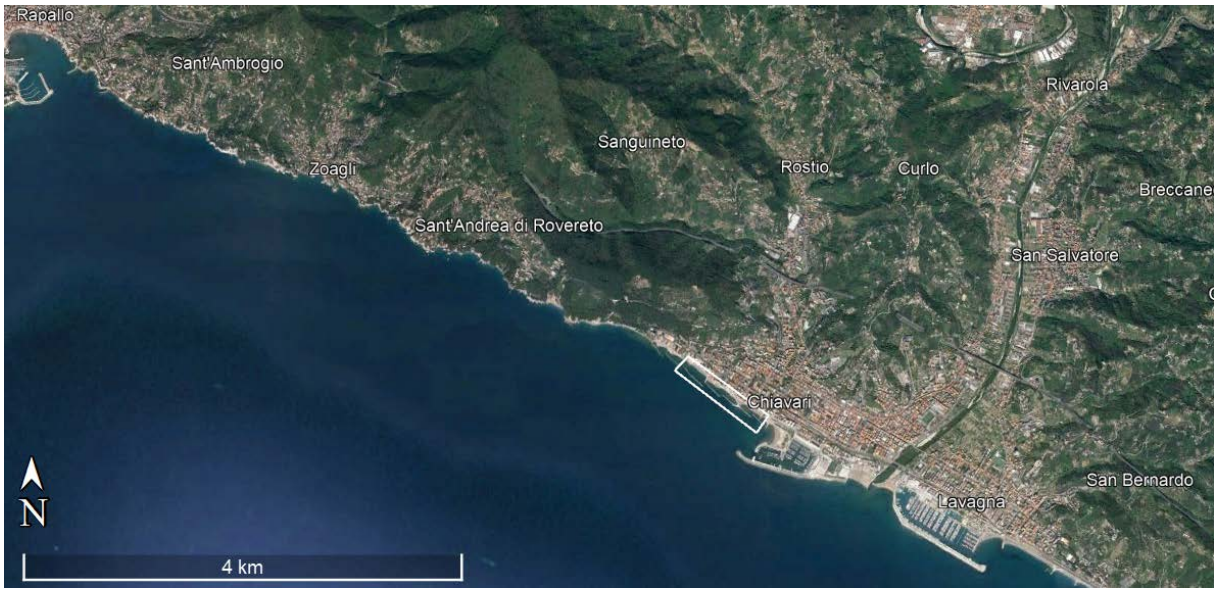


Figura 2 - Indicazione di dettaglio del sito interessato dai Lavori, a ponente del porto di Chiavari all'interno del golfo del Tigullio

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 6, 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 nella cella n.2 e n.3 (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 uniforma la scogliera della 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, 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 cella n.2 rispetto alla cella n.4 sia marginale data la natura del fondali presenti e del funzionamento dei fenomeni morfo dinamici e che dunque non sia possibile assicurare il corretto funzionamento della sezione tipologia dell'intervento nella cella n.2 senza una specifica prova su modello fisico, 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 planimetria 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

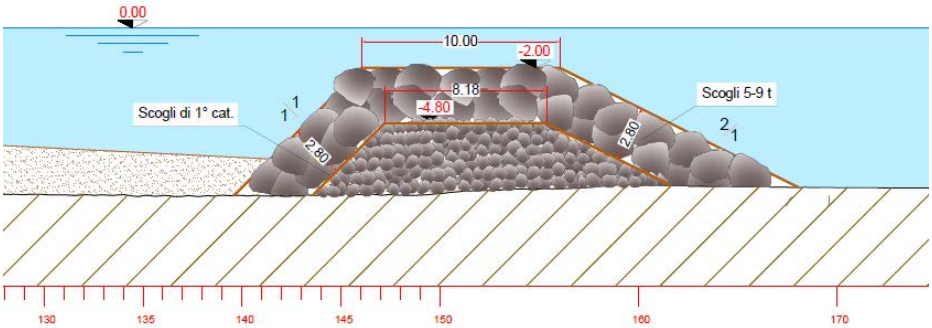


Figura 5 - Stralcio sezione scogliera n.2 con proposta di possibile ottimizzazione del progetto definito con scogliera al piede della cella n.3 e della cella n.2 portate da -6.00 m s.l.m. a quota -2.00 m s.l.m. sviluppata dall'impresa e dal progettista indicato per ridurre il fabbisogno di manutenzione 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.

Le celle di progetto previste 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 prevista la realizzazione di alcuna scogliera per la Cella n.1 (lato porto) in quanto non necessaria in base ai bassi fondali presenti, 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 oltre 1200 m.



Figura 6 – Stralcio planimetrico stato di Progetto Esecutivo

Ogni cella sarà dunque conterminata da due pennelli ortogonali alla linea di costa e dal muro esistente lato paese. La cella n.2 e la cella n.3 saranno anche delimitate da una scogliera soffolta al piede del ripascimento. 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 7 - 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 ripascimento 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.

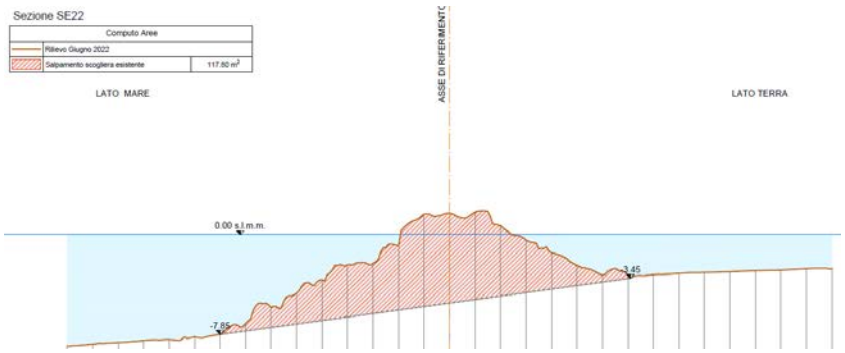


Figura 8 - Stima del volume di salpamento delle scogliere esistenti da riutilizzare – ex. sezione di computo

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, saranno costituire 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.

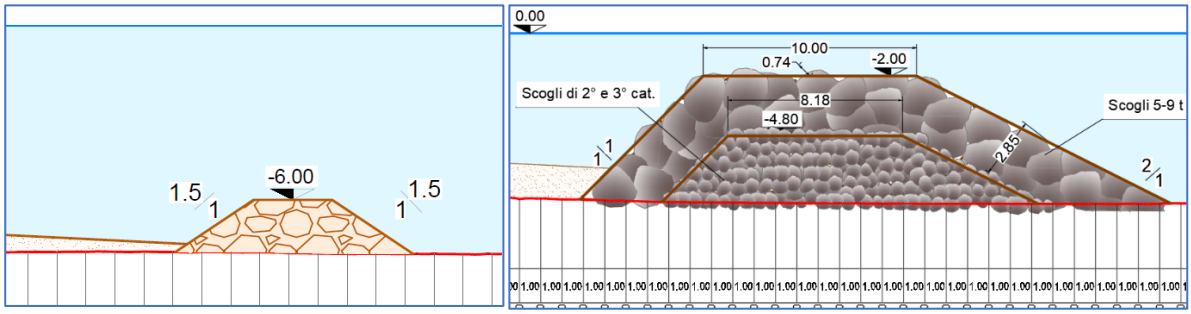


Figura 9 - Stralcio sezione tipo di progetto scogliera al piede del ripascimento cella 2 (a sx.) e cella 3 (a dx.)

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 variante

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.

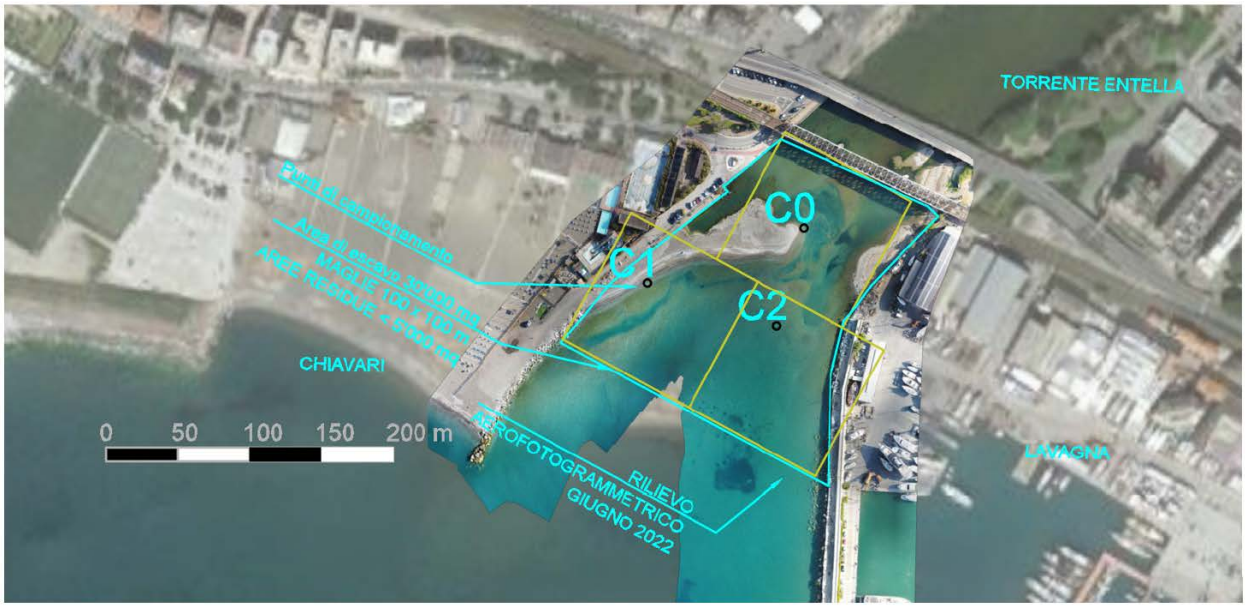


Figura 10 - Piano di caratterizzazione dei sedimenti marini alla barra del Torrente Entella

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

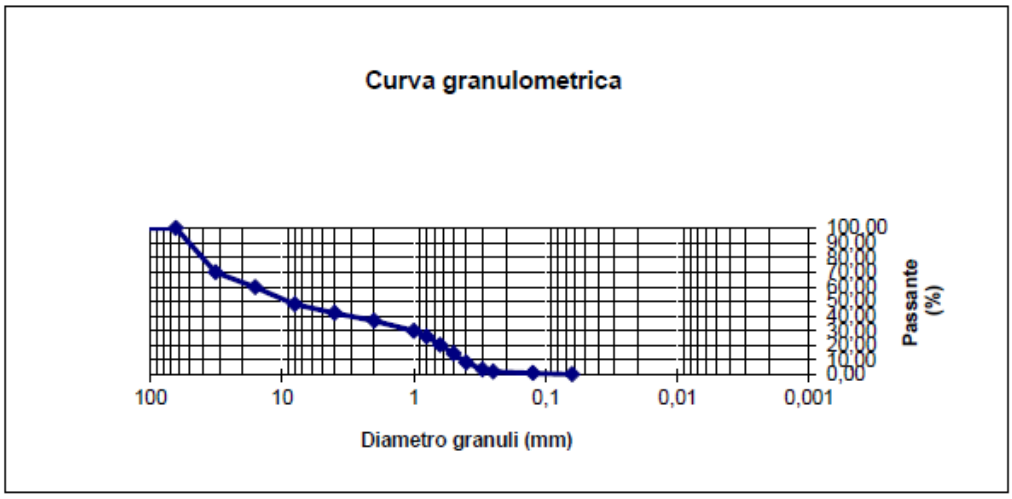


Figura 11 - Maglia C0 - 0.0 - 0.50 m

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

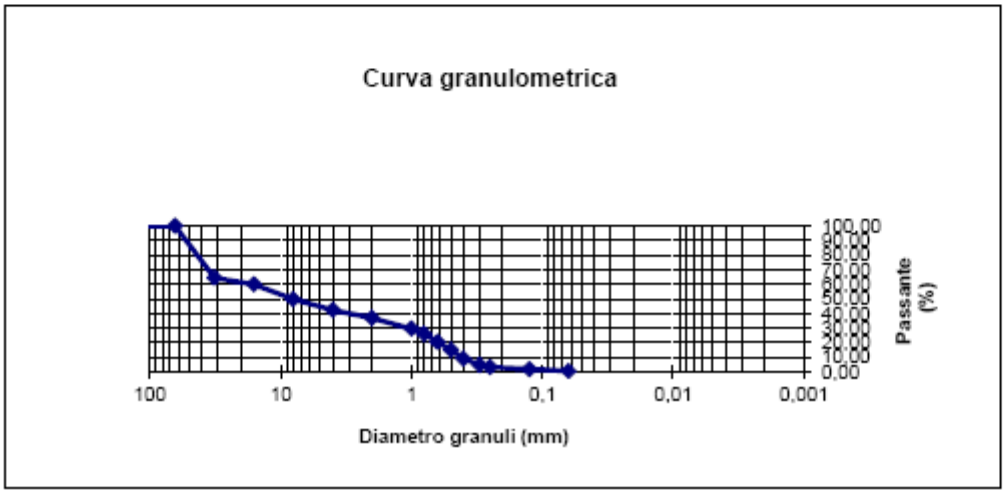


Figura 12 - Maglia C0 - 0.50 - 1.00 m

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

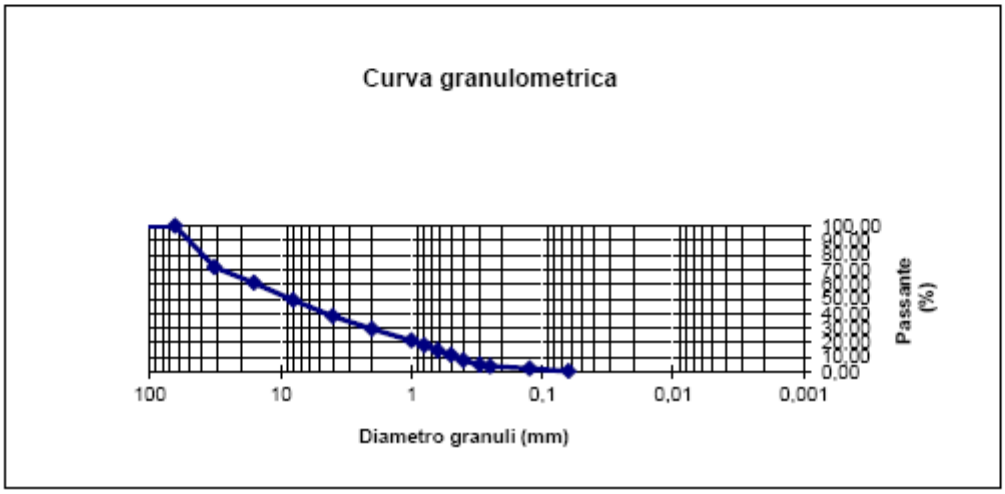


Figura 13 - Maglia C0 - 1.00 - 2.00 m

Mutual Recognition Agreements

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

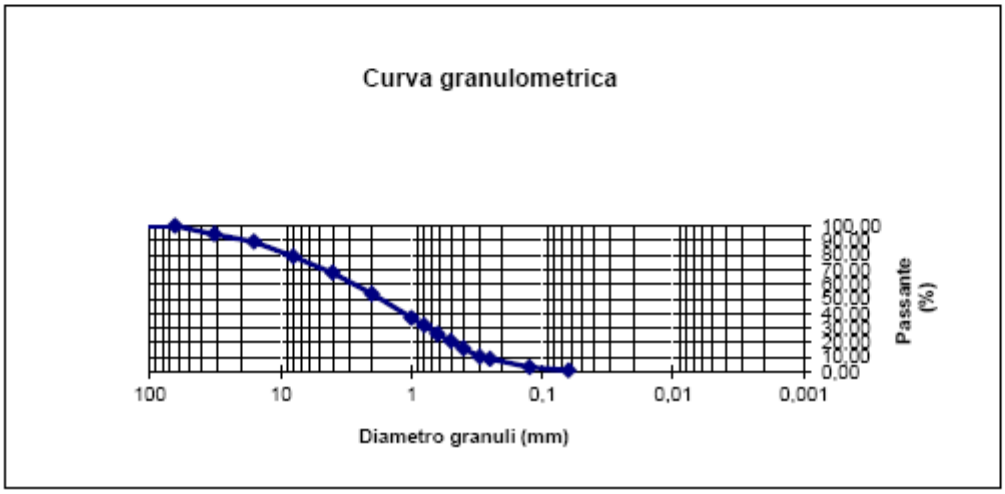


Figura 14 - Maglia C0 - 2.00 - 3.40 m

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

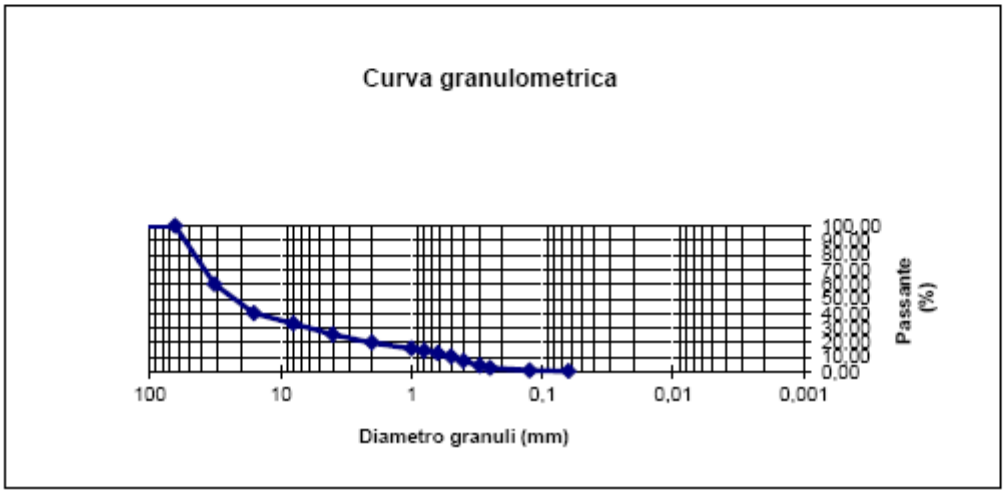


Figura 15 - Maglia C1 - 0.00 - 0.50 m

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

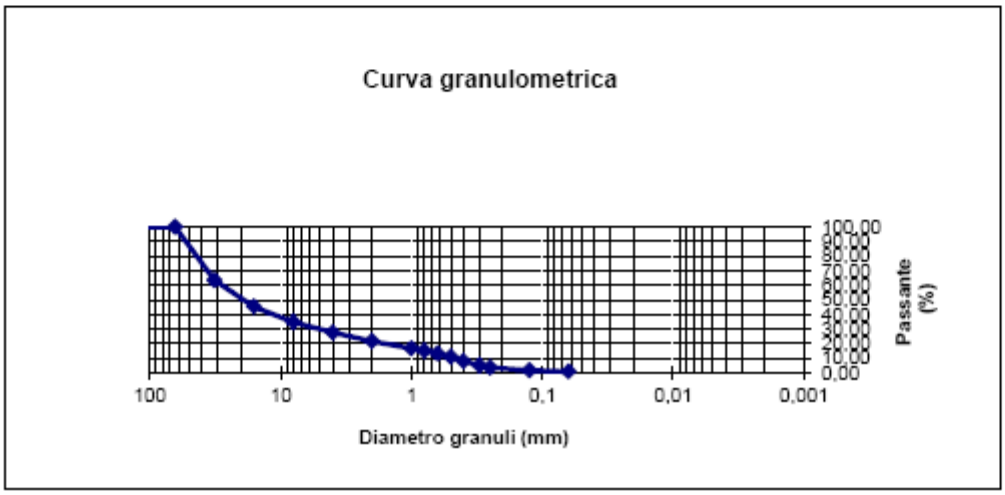


Figura 16 - Maglia C1 - 0.50 - 1.00 m

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

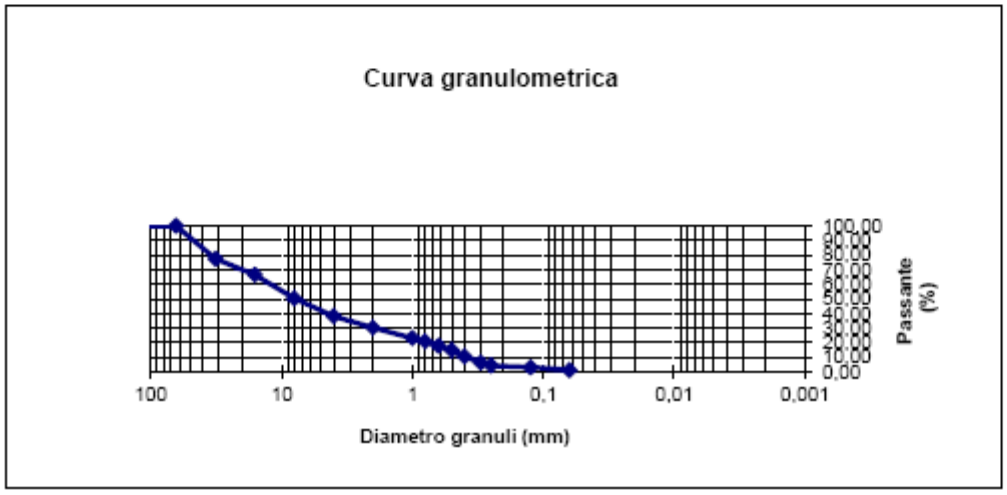


Figura 17 - Maglia C1 - 1.00 - 2.00 m

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

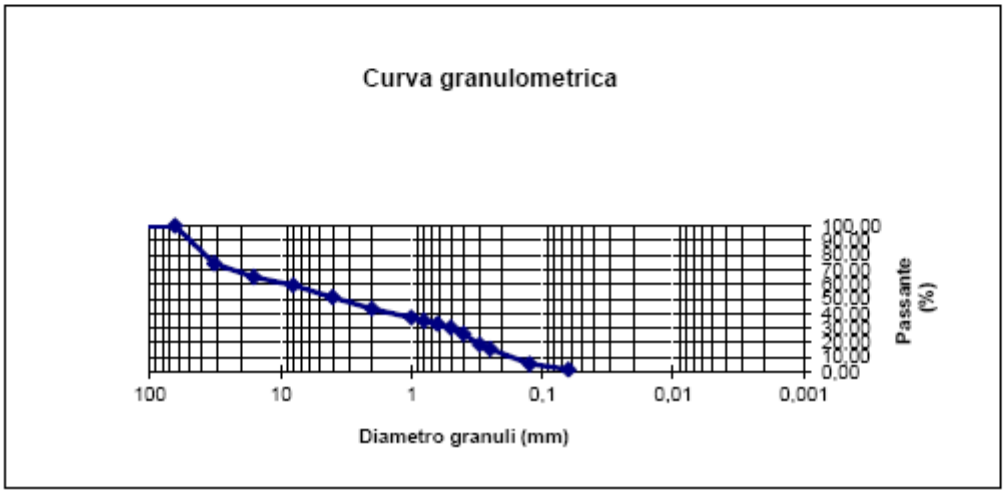


Figura 18 - Maglia C1 - 2.00 - 3.45 m

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

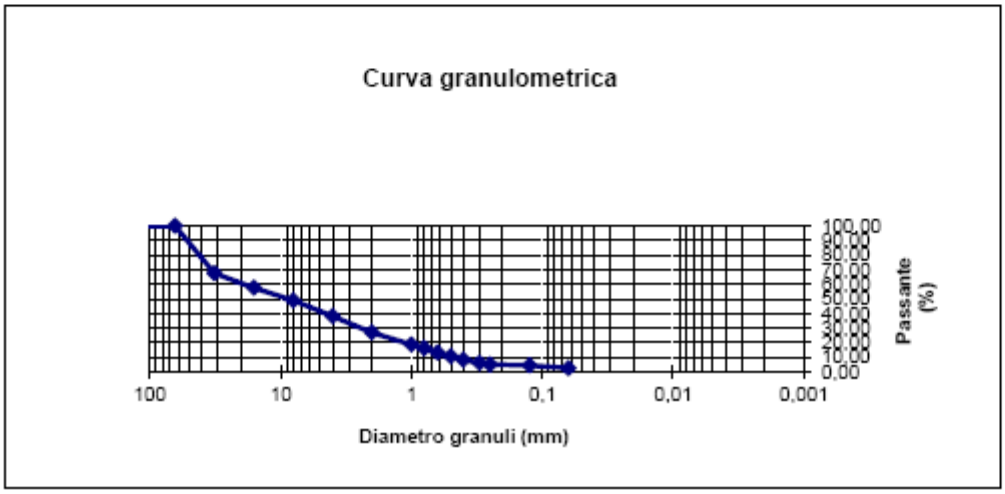


Figura 19 - Maglia C2 - 0.00 - 0.50 m

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

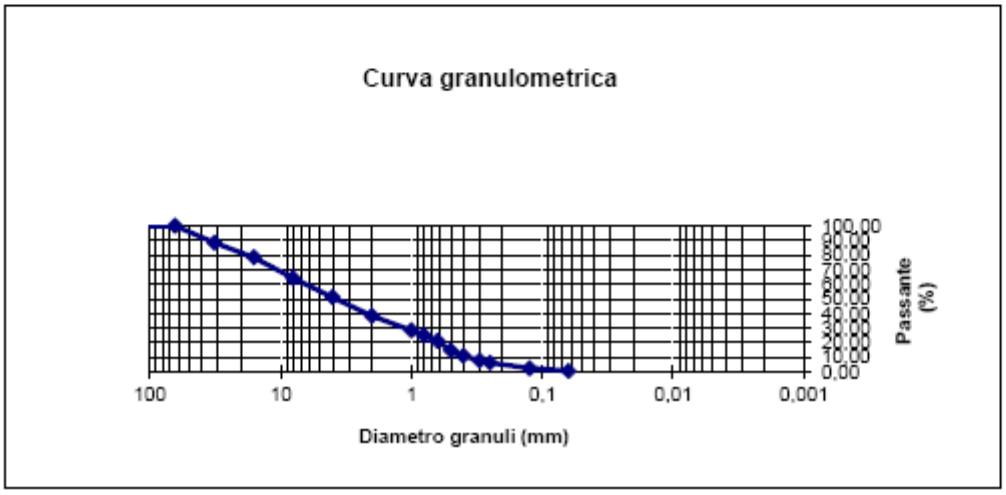


Figura 20 - Maglia C2 - 0.50 - 1.00 m

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

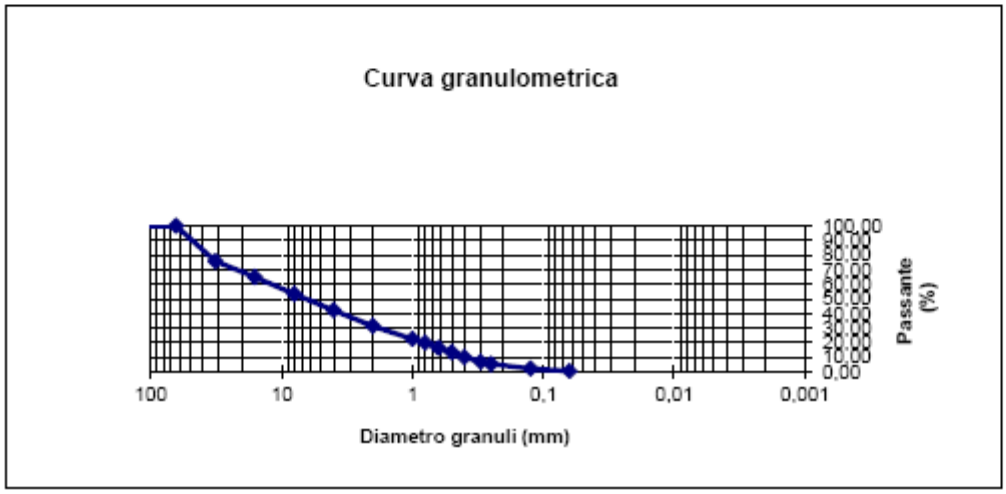


Figura 21 - Maglia C2 – 1.00 - 2.00 m

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

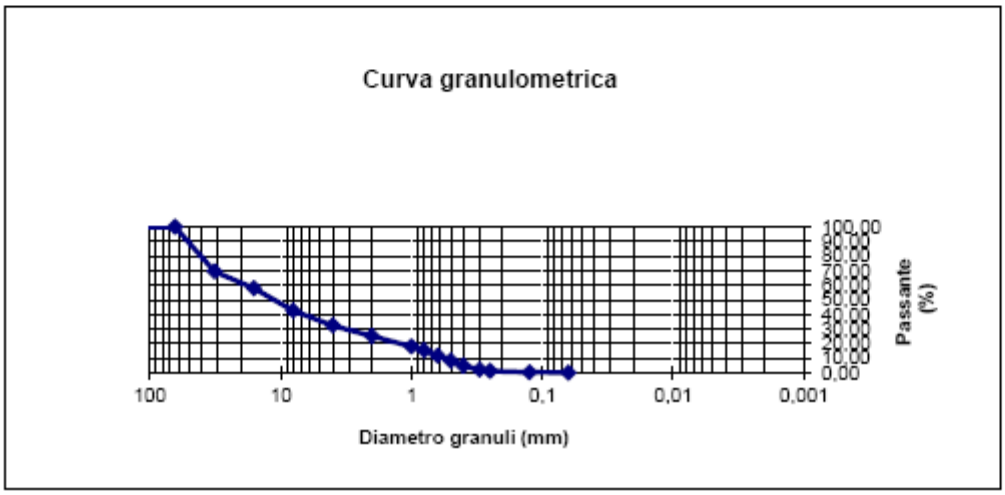


Figura 22 Maglia C2 - 2.00 - 3.40 m

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 23 - 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 prevede la riduzione della pendenza complessiva del ripascimento, tramite un incremento del materiale complessivo.

3) Descrizione della proposta di variante suppletiva 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 24).

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.

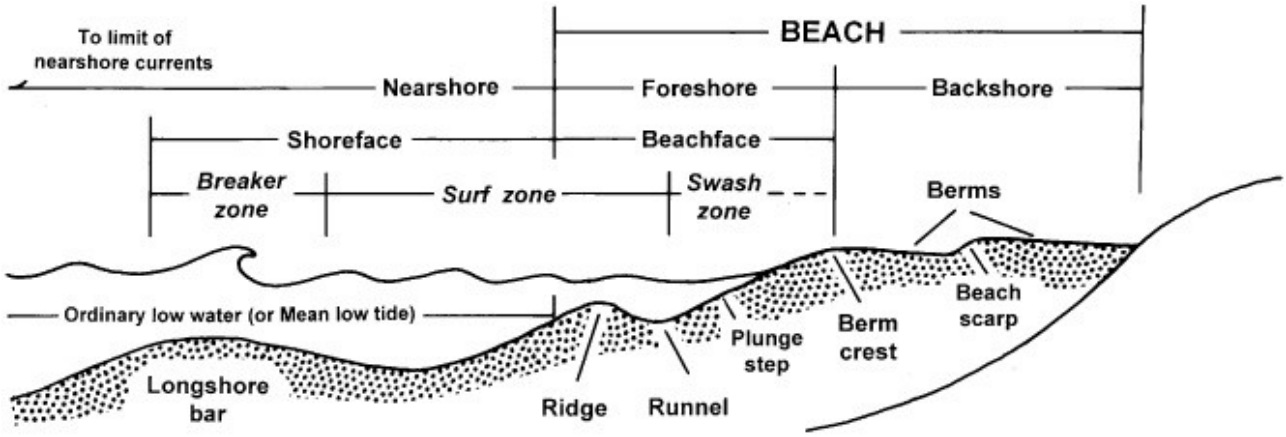


Figura 24 - Complessità di un profilo "reale" di spiaggia in un dato istante temporale

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

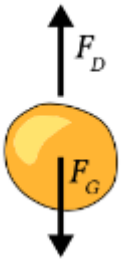
Per quanto concerne il parametro di scala A si è scelto di utilizzare la formula di Kriebel e altri, 1991:

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

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:

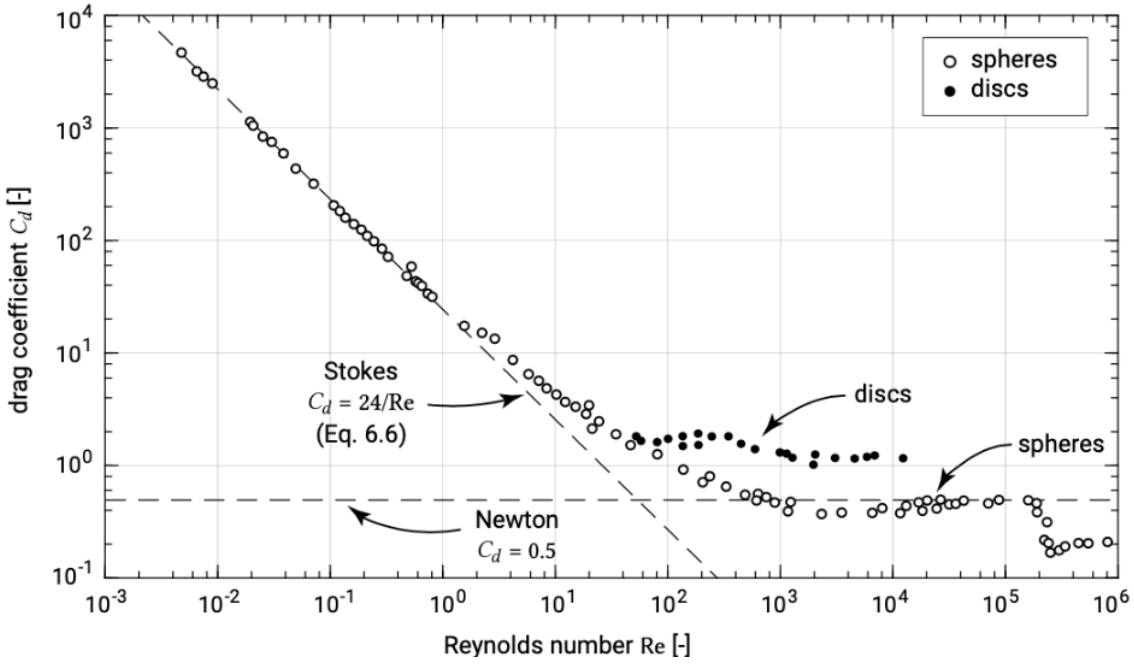


Figura 25 - Grafico sperimentale del coefficiente di Drag Cd per particelle in precipitazione in un mezzo liquido

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 25, 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.

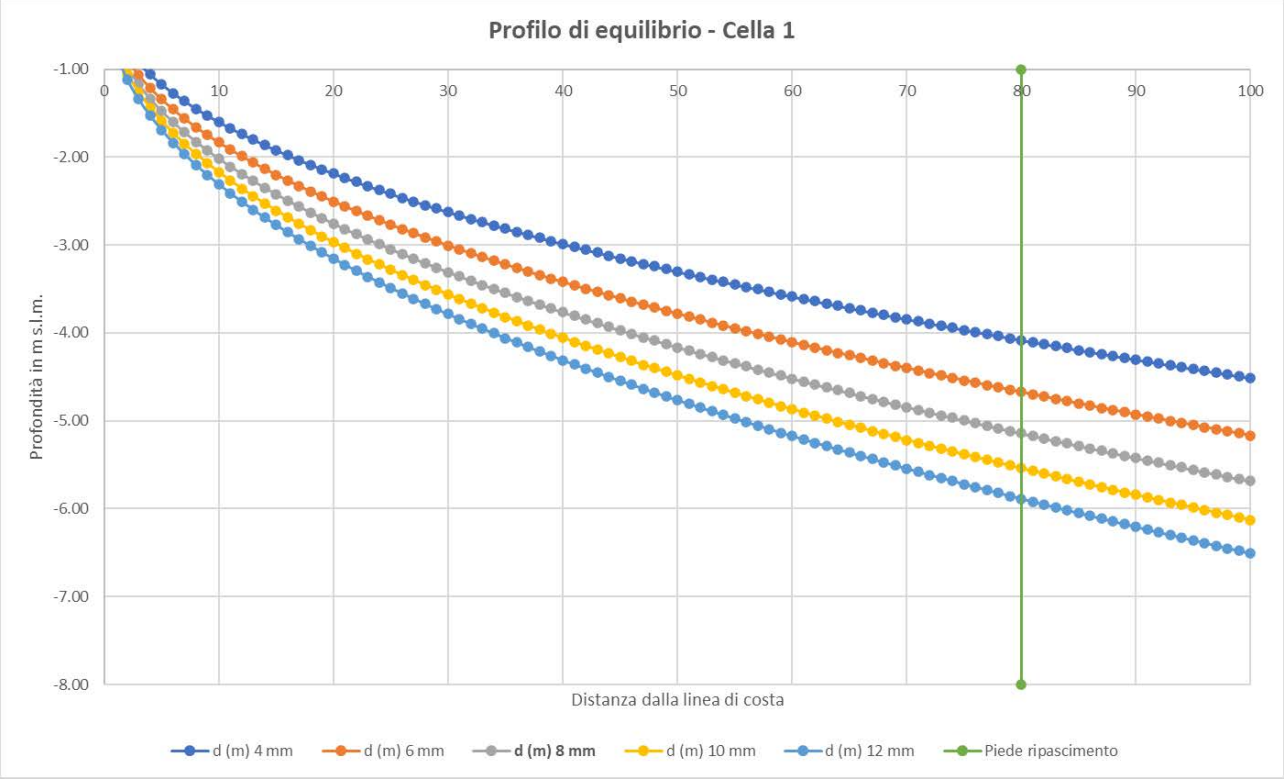


Figura 26 - Profili di equilibrio - I cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

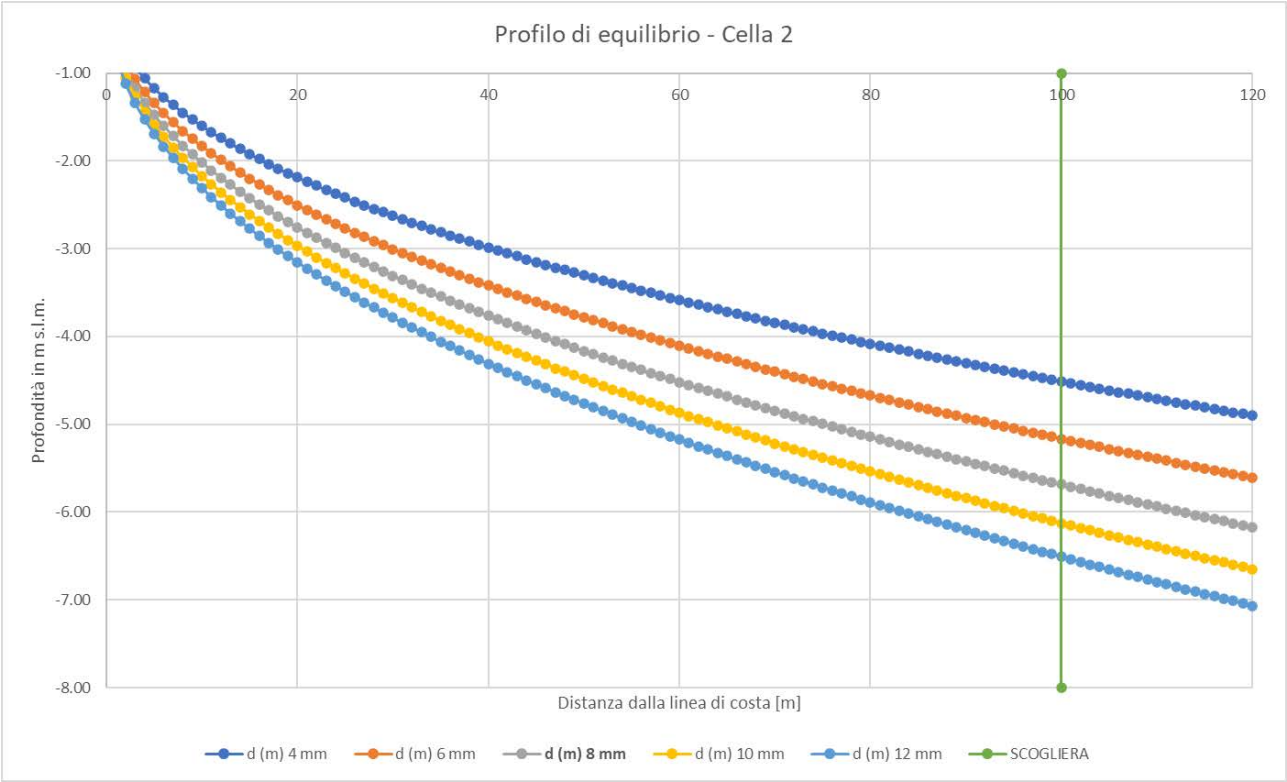


Figura 27 - Profili di equilibrio - II cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

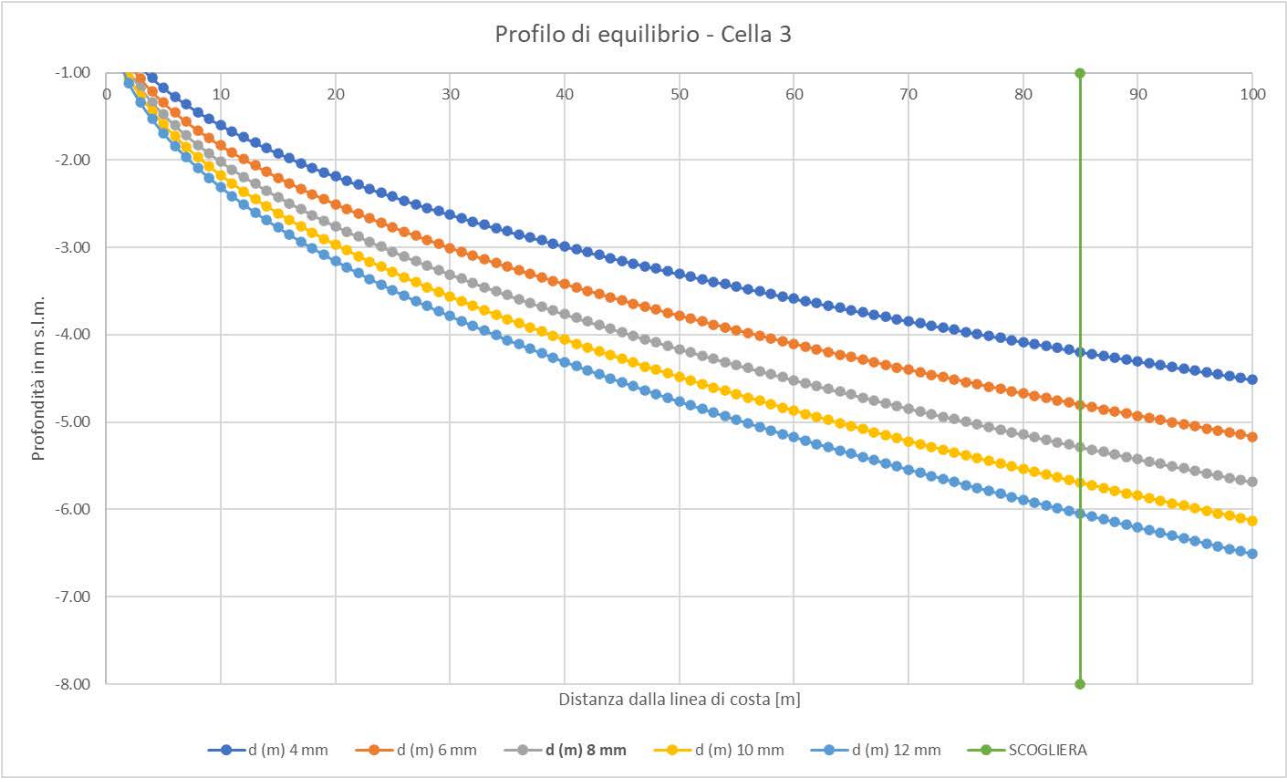


Figura 28 - Profili di equilibrio - III cella - in grigio il profilo di equilibrio per il diametro di 8 mm considerato

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 26- Figura 27 - Figura 28) 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 e dal fatto di essere particolarmente protetti dai marosi dalla presenza della diga foranea del Porto di Chiavari, 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.

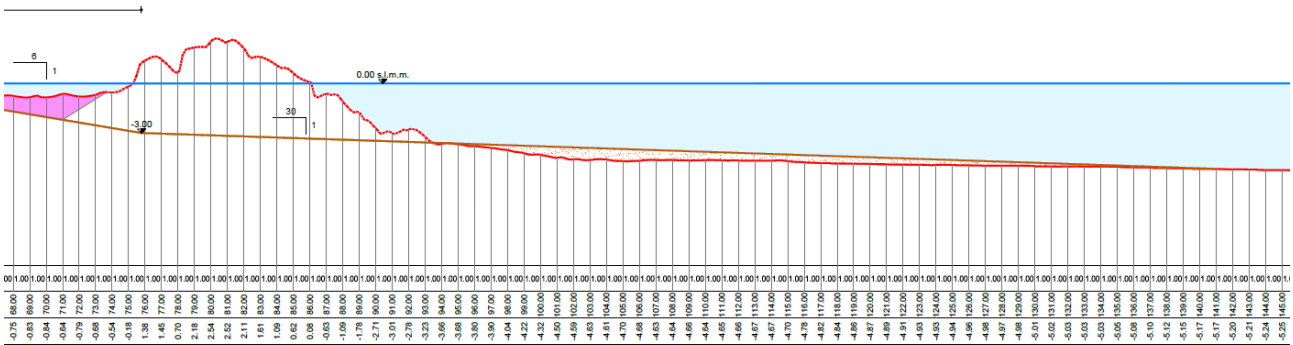


Figura 29 - Ripascimento previsto dal Progetto Esecutivo presso la I Cella

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.

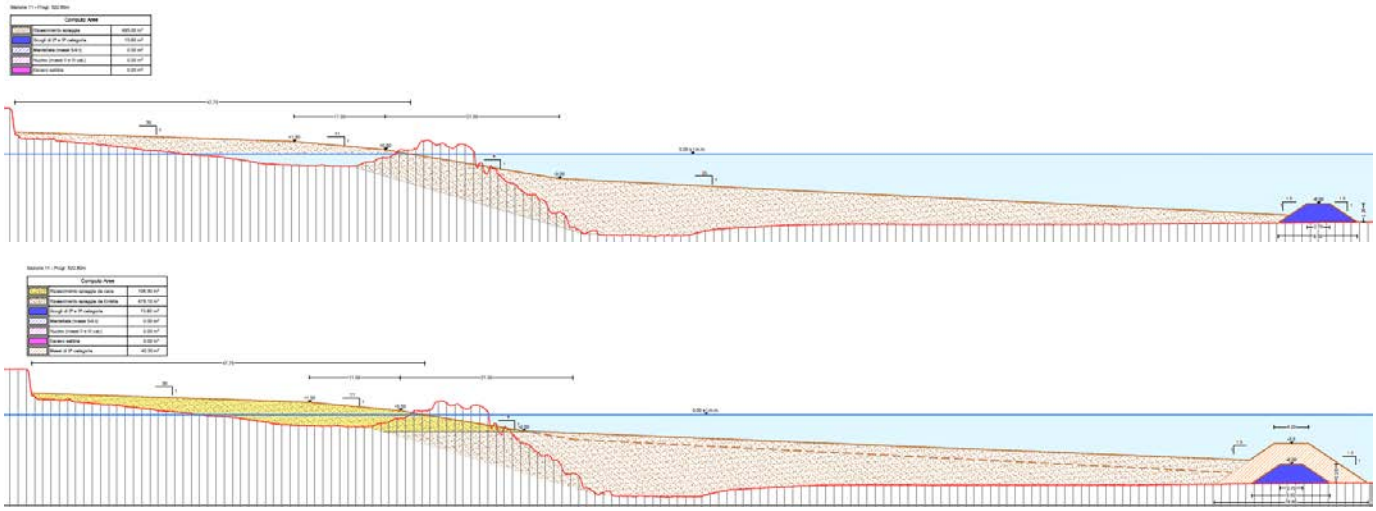


Figura 30 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella II (sopra) ed attuale proposta di variante (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia ed un adeguamento della struttura al piede

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.

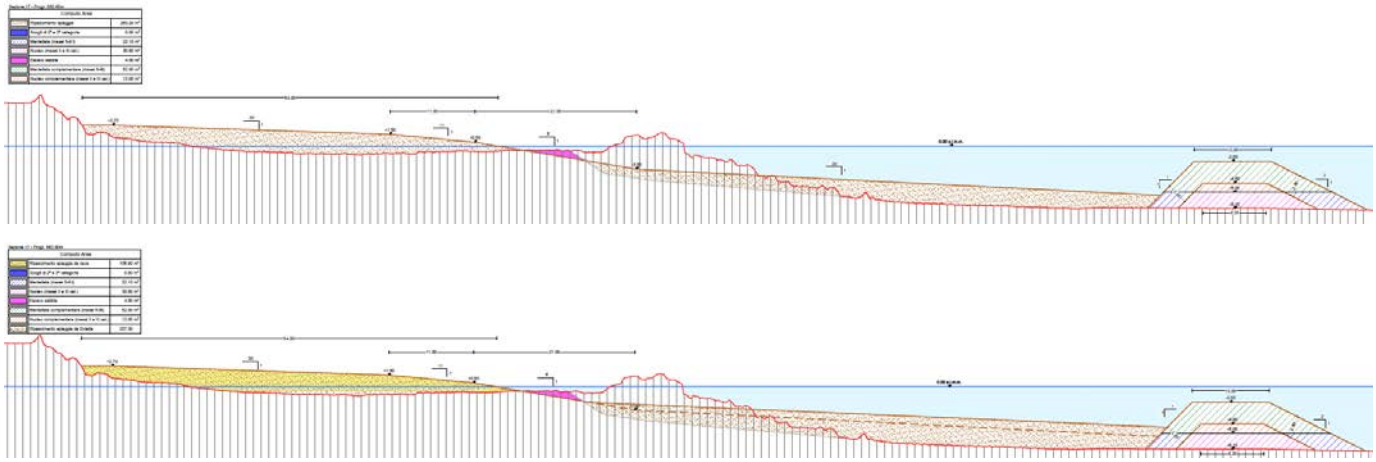


Figura 31 – Ripascimento – previsione del Progetto Esecutivo presso la Cella III (sopra) ed attuale proposta di variante (sotto), che prevede un maggior apporto di sabbia

4) Ulteriori vantaggi attesi dalla proposta di variante e sintesi modifiche eseguite

Sintesi modiche introdotte

La presente proposta di variante è stata sviluppata, come richiamato nel corso della relazione, a seguito dell'esecuzione delle analisi sul materiale presente presso la foce del Torrente Entella, tramite le quali si è constatato come il materiale sia caratterizzato da una curva granulometrica piuttosto ampia (presenza sia di materiale ciottoloso grossolano che di sabbia fina) ma comunque, mediamente per i 12 campioni analizzati, di pezzatura significativamente inferiore a quella ipotizzata nell'ambito del progetto definitivo.

Tale circostanza, considerata anche l'importanza della pezzatura per la stabilità (intesa in senso dinamico) del ripascimento dimostrata dalle prove su modello fisico eseguite durante la redazione del progetto definitivo, hanno imposto di dover prevedere delle modifiche al Progetto Esecutivo.

Nello specifico si è andati a studiare, tramite formulazioni teoriche avendo cura di operare una selezione dei parametri significativi a valore di sicurezza, l'equilibrio del profilo di spiaggia per una sezione significativa delle 3 celle di progetto.

Dalle analisi eseguite è risultato introdurre in progetto le seguenti opere aggiuntive:

- L'incremento del materiale di ripascimento nella parte sommersa della spiaggia per la cella III, portando il fondale al piede del ripascimento a -5.25 m s.l.m.
- L'incremento del materiale di ripascimento nella parte sommersa della spiaggia per la cella II, portando il fondale al piede del ripascimento a -5.50 m s.l.m. ed un incremento dimensionale della scogliera al piede del ripascimento, sino ad una quota di coronamento di -3.50 m s.l.m. ovvero ad una larghezza in sommità di 4.20 m.

Complessivamente, è previsto un incremento del materiale di ripascimento pari a **circa 24145 m^3** per la cella numero II e di **circa 48560 m^3** per la cella III.

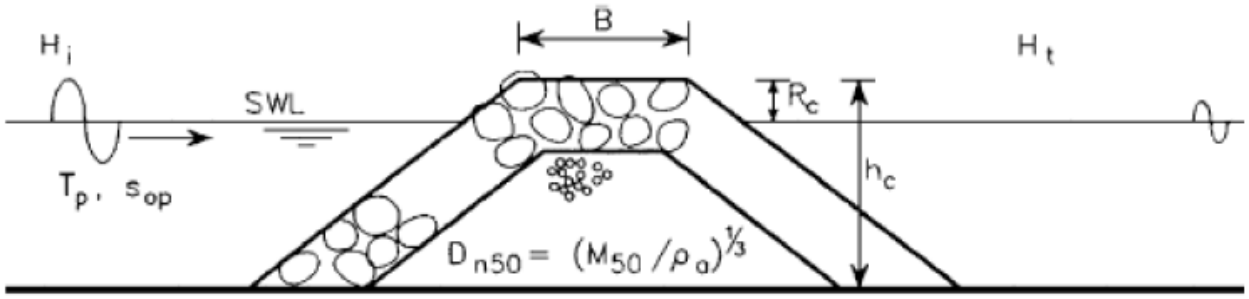
Elementi migliorativi

La soluzione selezionata permette di incrementare il livello di sicurezza del ripascimento, a fronte della problematica riscontrata per la minore pezzatura del materiale presente presso la foce del Torrente Entella, senza andare a variare l'impatto ambientale per la realizzazione delle opere, in quanto sostanzialmente tutto l'incremento di materiale da approvvigionare è relativo a materiale di dragaggio dal fiume, che può essere approvvigionato in cantiere direttamente via mare ovvero con un impatto ambientale e sulla viabilità e sulla città di Chiavari estremamente limitato.

Difatti, un ulteriore possibile soluzione sotto il profilo tecnico poteva essere quella di mantenere le stesse opere previste nel Progetto Esecutivo, sostituendo complessivamente il materiale che si prevedeva di prelevare presso la foce del torrente con materiale di cava, di pezzatura garantita. Tale soluzione avrebbe tuttavia costituito una significativa variazione della filosofia progettuale, che era stata anche oggetto di apposita procedura ambientale di esclusione dalla V.I.A. con parere nel quale era stata evidenziata la necessità di considerare la foce del torrente Entella la principale per il ripascimento, oltre che un significativo aggravio dell'impatto ambientale dovuto allo sfruttamento di risorse naturali (cave) e al trasporto del materiale presso la spiaggia del lungomare. Non per ultimo, tale soluzione avrebbe comportato anche maggiori oneri per l'amministrazione, non compatibili con il Quadro Economico di progetto.

Ulteriore aspetto migliorativo può essere individuato nella maggiore capacità di dissipazione dell'energia del moto ondoso offerta dalla scogliera al piede di maggiori dimensioni per la cella n.2, che può essere quantificato con la seguente formulazione.

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.



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 -6.00 m s.l.m. per la soluzione prevista dal Progetto Esecutivo e -3.50 m s.l.m. per la soluzione prevista dalla variante
- d [m] è la profondità dell'acqua al piede delle scogliere, assunta pari a d = 8.20 m per la scogliera della cella 3.
- Hi [m] è l'altezza d'onda incidente al piede della struttura, in questo caso dunque pari ad Hs = 4,90 m nel tratto maggiormente esposto (di fronte al pennello 3) e Hs = 4.60 m per a metà della cella II
- L [m] è la lunghezza d'onda per la profondità al piede della struttura;
- L_0 [m] è la lunghezza d'onda in acque profonde;
- B_{eff} [m] è la larghezza effettiva, cioè (4 x Larghezza Cresta di Sommità + Larghezza del fondo);
- D_{eff} [m] è il diametro nominale dei massi naturali in cui è composta la barriera, pari per la mantellata in esame a 1.25 m nel caso della proposta di variante e 1.14 m per il progetto esecutivo

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}:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 = 0.75 per la scogliera prevista dalla variante (con coronamento a -3.50 m s.l.m.) e Kt = 0.91 per la scogliera prevista dal Progetto Esecutivo.
Dunque, l'altezza d'onda tramessa immediatamente a tergo della scogliera sarà pari a Ht = 3.67 m per la scogliera prevista dalla variante e Ht = 4.45 m per la scogliera prevista dal Progetto Esecutivo. 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 di circa il 44 %, limitando dunque fortemente il potere erosivo, con la scogliera proposta dalla variante mentre l'energia viene ridotta solamente del 18% dalla scogliera prevista dal Progetto Esecutivo, che di fatti non garantiva una sostanziale riduzione dell'energia del moto ondoso. Si nota comunque come il valore di dissipazione dell'energia, anche della scogliera proposta in variante per la cella n.2, sia inferiore al potere di protezione della scogliera con coronamento a -2.00 m s.l.m. e larghezza superiore prevista per la cella n.3, con una riduzione dell'energia dell'onda incidente sino al 66%.

La stabilità della scogliera sommersa prevista per la seconda cella è stata verificata utilizzando la formula di Kramer e Burchard (2004), calibrata tramite l'osservazione di diversi risultati di prove su modello fisco in canaletta ed in vasca. Nello specifico la formula da loro sviluppata è:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = A + B\frac{R_c}{D_{n50}} + C\left(\frac{R_c}{D_{n50}}\right)^2$$

Dove:

- D_{n50} è il diametro mediano degli scogli (pari in questo caso ad 1.25 m – Massi di III categoria),
- Δ è la densità relativa degli scogli, che considerando una densità degli scogli pari a 2650 kg/mc e una densità dell'acqua di mare pari a 1025 kg/mc è pari a 1.60
- Rc è l'altezza relativa della Cresta (< 0 se sommersa)
- A, B e C sono dei coefficienti empirici derivanti dalla calibrazione dei risultati sperimentali. Nello specifico, per la condizione di inizio danno si ha A =1.36; B = -0.23 e C = 0.06

Nel caso specifico, è stata esplicitata la formula rispetto ad Hs, ottenendo un valore di **Hs = 4.88 m** come condizione di inizio danno. Tale valore è superiore all'altezza d'onda considerata per le verifiche della scogliera della cella II nel progetto esecutivo e nel progetto definitivo, pari a Hs = 4.60m, per cui non ci si aspetta un danneggiamento significativo della scogliera soffolta anche in presenza di mareggiate eccezionali.

Si rappresenta inoltre come la scogliera di maggiori dimensioni 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.