

HUB PORTUALE ravenna



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico centro settentrionale



APPROFONDIMENTO CANALI CANDIANO E BAIONA,
ADEGUAMENTO BANCHINE OPERATIVE ESISTENTI,
NUOVO TERMINAL IN PENISOLA TRATTAROLI E
RIUTILIZZO MATERIALE ESTRATTO IN ATTUAZIONE
AL P.R.P VIGENTE 2007 - I FASE - PORTO DI RAVENNA

PROGETTO ESECUTIVO

oggetto DRAGAGGI
ELABORATI GENERALI
RELAZIONE DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA - DRAGAGGI

file
1114-E-DRX-DRA-RG-02-0.doc

codice
1114-E-DRX-DRA-RG-02-0

scala
-

Revisione	data	causale	redatto	verificato	approvato
0	23/12/2021	Emissione per approvazione	P. Smorqon	P. Pampanin	F. Busola

responsabile delle Integrazioni Specialistiche: **Ing. Lucia de Angelis**

responsabile del Procedimento: **Ing. Matteo Graziani**

committente



Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centro Settentrionale
Via Antico Squero, 31
48122 Ravenna

contraente generale



Consorzio Stabile Grandi Lavori Srl
Piazza del Popolo 18
00187 Roma



DEME - Dredging International NV
Haven 1025 - Scheldedijk 30
2070 Zwijndrecht - Belgium

progettisti



Technital S.p.A.
Via Carlo Cattaneo, 20
37121 Verona

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Filippo Busola



F&M Ingegneria SpA
Via Belvedere 8/10
30035 Mirano (VE)

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Tommaso Tassi



SISPI srl
Via Filangieri 11
80121 Napoli

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Marco Di Stefano

DRAGAGGIO E GESTIONE DEI SEDIMENTI – STRALCIO IV

Relazione di caratterizzazione geotecnica - dragaggi

23 dicembre 2021

PROGETTISTI

RTP:  **TECNITAL**

F&M
ingegneria

SISPI
engineering

SOMMARIO

1	PREMESSA	7
2	OGGETTO E SCOPO	9
3	DOCUMENTI E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	10
4	AREE E QUOTE DI DRAGAGGIO	12
5	DESCRIZIONE INDAGINI GEOTECNICHE	14
5.1	INDAGINI NELLE AREE DI DRAGAGGIO	14
5.1.1	INDAGINE 2014	14
5.1.2	INDAGINE 2019	15
5.1.3	INDAGINE 2020-2021	16
5.2	INDAGINI NELLE AREE LOGISTICHE	17
5.2.1	INDAGINE AREA LOGISTICA S3.....	17
5.2.2	INDAGINE AREA LOGISTICA L2	18
6	GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA	19
6.1	ASSETTO GEOLOGICO	19
6.2	ASSETTO STRATIGRAFICO	21
6.3	ASSETTO IDROGEOLOGICO	22
7	AREE DI DRAGAGGIO	25
7.1	ASSETTO STRATIGRAFICO	25
7.1.1	ZONA 1	25
7.1.1.1	INDAGINE 2014	25
7.1.1.2	INDAGINE 2019	27
7.1.1.3	INDAGINE 2020-2021	27
7.1.1.4	CONFRONTO	28
7.1.2	ZONA 2	28
7.1.2.1	INDAGINE 2014	28
7.1.2.2	INDAGINE 2019	30
7.1.2.3	INDAGINE 2020-2021	31
7.1.2.4	CONFRONTO	31
7.1.3	ZONA 3	32
7.1.3.1	INDAGINE 2014	32
7.1.3.2	INDAGINE 2019	35
7.1.3.3	INDAGINE 2020-2021	37
7.1.3.4	CONFRONTO	37
7.1.4	ZONA 4	38

7.1.4.1	INDAGINE 2014	38
7.1.4.2	INDAGINE 2019	40
7.1.4.3	INDAGINE 2020-2021	41
7.1.4.4	CONFRONTO	41
7.1.5	ZONA 5	42
7.1.5.1	INDAGINE 2014	42
7.1.5.2	INDAGINE 2019	45
7.1.5.3	INDAGINE 2020-2021	46
7.1.5.4	CONFRONTO	46
7.2	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	47
7.2.1	CAMPIONI DISTURBATI.....	47
7.2.1.1	PROVE DI CLASSIFICAZIONE	47
7.2.1.2	PROVE DI SEDIMENTAZIONE IN COLONNA	48
7.2.2	CAMPIONI INDISTURBATI	49
7.2.2.1	PROVE DI CLASSIFICAZIONE	49
7.2.2.2	MISURA DELLA CU IN FUNZIONE DEL CONTENUTO D'ACQUA	50
7.2.2.3	PROVE DI COMPRESSIBILITÀ EDOMETRICA.....	51
7.3	MODELLO DEI FENOMENI DI SEDIMENTAZIONE.....	52
7.3.1	CENNI TEORICI	52
7.3.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO.....	52
7.3.3	RISULTATI DEL MODELLO.....	53
8	AREE LOGISTICHE.....	55
8.1	ASSETTO STRATIGRAFICO E CARATTERISTICHE GEOTECNICHE.....	55
8.1.1	AREA LOGISTICA S3	55
8.1.2	AREE LOGISTICHE L1/L2	55
8.2	LETTURE DI FALDA	57
8.3	CEDIMENTI ATTESI	58
9	BULKING FACTOR DI PROGETTO.....	59
10	CONSIDERAZIONI GENERALI DI PROGETTO	61
10.1	SCARPATE DI DRAGAGGIO.....	61
10.2	STABILITÀ DELLE BANCHINE ESISTENTI	61
11	CONCLUSIONI.....	64

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Aree di dragaggio – Hub portuale di Ravenna I fase – Aree di dragaggio	13
Figura 2 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione dei n.517 sondaggi da doc. rif.[8]	14
Figura 3 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2019 – Planimetria di ubicazione dei n. 402 sondaggi da doc. rif. [24]	15
Figura 4 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione dei n. 10 sondaggi da doc. rif. [22]	16
Figura 5 – Descrizione indagini geotecniche – Area logistica S3 - Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione delle indagini.....	17
Figura 6 – Descrizione indagini geotecniche – Area logistica L2 – Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione delle indagini.....	18
Figura 7 – Assetto geologico – Stralcio Carta Geologica 1:50.000, Foglio 223 Ravenna, Regione Emilia Romagna	20
Figura 8 – Assetto idrogeologico – Schema stratigrafico e suddivisione stratigrafico-sequenziale dei depositi plio-quadernari dell’area romagnola con indicazioni delle unità idrostratigrafiche	23
Figura 9 – Assetto idrogeologico – Stralcio della “Carta delle acque superficiale – carta del drenaggio” (B.2.1, 2000). In nero sono segnate le aree di progetto	23
Figura 10 – Assetto idrogeologico – Stralcio della “Carta delle acque sotterranee-carta delle isofreatiche” (B.2.2.a, 2000). In nero sono segnate le aree logistiche, le casse di colmata, le banchine oggetto di intervento del Progetto Esecutivo.....	24
Figura 11 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [15] e [16]	25
Figura 12 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [19]	26
Figura 13 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [21].....	27
Figura 14 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22].....	27
Figura 15 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif.[14]	28
Figura 16 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [19]	29
Figura 17 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e della sezione stratigrafica da doc. rif. [21].....	30
Figura 18 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2019 – Sezione stratigrafica F-F’ da doc. rif. [21].....	30
Figura 19 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 - Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc.rif.[22].....	31
Figura 20 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [14]	32
Figura 21 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3: C. Baiona/C. Candiano – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [18]	33
Figura 22 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3: L. Trattaroli/C. Baiona – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [18]	34
Figura 23 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3: L. Trattaroli – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [18]	35

Figura 24 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21].....	36
Figura 25 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche E-E'/D-D' da doc. rif. [21].....	36
Figura 26 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22].....	37
Figura 27 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [13]	38
Figura 28 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [17]	39
Figura 29 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21].....	40
Figura 30 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2019 – Sezione stratigrafica C-C' da doc. rif. [21].....	40
Figura 31 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22].....	41
Figura 32 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [12] e [13]	42
Figura 33 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5: Marcegaglia – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [17]	43
Figura 34 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5: Marcegaglia – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [17].....	44
Figura 35 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21].....	45
Figura 36 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche A-A' e B-B' da doc. rif.[21].....	45
Figura 37 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22].....	46
Figura 38 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Curve granulometriche	48
Figura 39 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Prove di sedimentazione in colonna: altezza dell'interfaccia acqua-fango in funzione del tempo	49
Figura 40 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Curve granulometriche	50
Figura 41 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata cu in rapporto al contenuto d'acqua w	50
Figura 42 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata cu in rapporto all'indice di liquidità IL.....	51
Figura 43 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Prove di compressibilità edometrica.....	51
Figura 44 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Calibrazione modello CS2 sulla base dei risultati delle prove sperimentali sul campione R6	53
Figura 45 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione dell'altezza del riempimento nel tempo nella cassa NADEP.....	54
Figura 46 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione del Bulking Factor nella cassa NADEP	54
Figura 47 – Aree logistiche – Misure di falda nei piezometri S13Pz (area S3) e S14Pz (area L2).....	57
Figura 48 – Considerazioni generali di progetto – Stabilità delle banchine esistenti	62
Figura 49 – Considerazioni generali di progetto – Stabilità delle banchine esistenti – Sezioni darsena S. Vitale	63

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte	28
Tabella 2 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte	31
Tabella 3 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte	37
Tabella 4 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte	41
Tabella 5 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte	46
Tabella 6 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto di sostanza organica	47
Tabella 7 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto d’acqua	47
Tabella 8 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori dei limiti di Atterberg	47
Tabella 9 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del peso specifico dei granuli	47
Tabella 10 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del contenuto d’acqua.....	49
Tabella 11 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori dei limiti di Atterberg	49
Tabella 12 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del coefficiente di compressibilità sul ramo di carico vergine delle prove edometriche.....	51
Tabella 13 – Area logistica S3 – Stratigrafia media Comparto Nord e Sud	55
Tabella 14 – Area logistica S3 – Modello geotecnico Comparto Nord e Sud	55
Tabella 15 – Area logistica L1/L2 – Stratigrafia media comparto Nord.....	56
Tabella 16 – Area logistica L1/L2 – Stratigrafia media comparto Sud	56
Tabella 17 – Area logistica L1/L2 – Modello geotecnico Comparto Nord	56
Tabella 18 – Area logistica L1/L2 – Modello geotecnico Comparto Sud.....	56
Tabella 19 – Area logistica L2 – Modello geotecnico Comparto Sud.....	57

1 PREMESSA

Il Piano Regolatore Portuale 2007 del Porto di Ravenna, acquisito il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto n. 129 del 29.10.2008 e la Valutazione Ambientale Strategica con delibera della giunta regionale Emilia-Romagna n. 14796 del 12.10.2009, è stato approvato con delibera di Giunta provinciale n. 3 del 03.12.2010 in virtù della delega conferita a tale Ente dalla Legge Regionale n. 3 del 21.04.1999 "Riforma del sistema regionale e locale".

Successivamente, in data 19.03.2010, è stata attivata presso il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e gli altri Enti competenti la procedura di Valutazione di Impatto Ambientale delle opere previste in Piano, che è proseguita con le pubblicazioni di legge ed il parere favorevole di compatibilità ambientale della Commissione Tecnica per la Verifica dell'Impatto Ambientale - VIA e VAS in data 17.06.2011. Il Decreto congiunto di V.I.A. del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e del Ministro per i Beni e le Attività Culturali n. 6 del 20.01.2012 ha sancito la compatibilità ambientale del P.R.P. 2007 per l'attuazione delle opere connesse nel rispetto di alcune condizioni e prescrizioni.

Il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, di concerto col Ministro dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, con decreto n. 215 del 07.08.2017 ha prorogato per dieci anni, a decorrere dalla data di scadenza, i termini di validità del Decreto di compatibilità ambientale prot. DVA-DEC-2012-6 del 20 gennaio 2012 relativo al "Piano Regolatore Portuale – Attuazione delle opere connesse" del Porto di Ravenna, ovvero sino al 18 maggio 2027.

L'Autorità di Sistema Portuale ha sviluppato il progetto preliminare di "Approfondimento canali Candiano e Baiona, adeguamento banchine operative esistenti, nuovo terminal in penisola Trattaroli e utilizzo materiale estratto in attuazione al P.R.P. vigente 2007", istruito dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti in quattro stralci consecutivi ma singolarmente funzionali, ed approvato dal C.I.P.E. con delibera n. 98 del 26 ottobre 2012 (G.U.R.I. n. 136 del 12 giugno 2013) per i primi due.

Il Porto di Ravenna è costituito da un canale principale, Candiano, e due secondari, Baiona e Piombone. Nel complesso sono attualmente presenti 24 km di banchine disponibili, di cui 18.5 km operative. Le merci trattate dai terminalisti privati sono principalmente rinfuse, liquidi, container.

A seguito delle analisi del traffico e degli scenari futuri, il PRP del 2007 ha fissato come priorità per lo sviluppo del Porto l'approfondimento dei fondali per permettere l'ingresso di navi di dimensioni maggiori rispetto alle attuali, oltre alla realizzazione di un nuovo Terminal Container.

Le opere dei primi due stralci, oggetto del presente progetto, consistono nella realizzazione del nuovo Terminal Container e in un primo step di approfondimento dei fondali, oltre al conseguente adeguamento strutturale di parte delle banchine esistenti.

In data 20.01.21, con verbale di avvio alla progettazione, l'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico centro settentrionale (AdSP), ha limitato l'inizio delle attività di progettazione esecutiva (PE) agli interventi di adeguamento funzionale e strutturale delle banchine ed allo svuotamento delle casse di colmata Nadep e Centro Direzionale. Nell'ambito delle attività di PE oggetto del richiamato verbale rientrano anche le attività connesse allo svuotamento della cassa di colmata Trattaroli (per la parte incidente con le lavorazioni previste nel cantiere N2), nonché le attività di conferimento dei materiali provenienti dalle casse di cui sopra nelle aree logistiche L2 ed S3 e nella cava "La Bosca".

In data 11.10.21 l'AdSP ha proceduto alla consegna della progettazione esecutiva delle operazioni di dragaggio e di gestione dei sedimenti.

Si riporta di seguito la sintesi del contenuto di ciascun capitolo del presente rapporto.

Il capitolo 2 contiene l'oggetto e lo scopo del rapporto, mentre il capitolo 3 elenca la Normativa ed i documenti di riferimento.

Le aree di dragaggio di progetto e le rispettive quote sono contenute nel capitolo 4, mentre le indagini geotecniche pregresse e di progetto sono descritte al capitolo 5 sia per le aree di dragaggio che per le aree logistiche di conferimento del sedimento dragato a terra.

L'assetto geologico ed idrogeologico dell'intera area di studio è presentato al capitolo 6.

Il capitolo 7 contiene la descrizione dei sedimenti da dragare in termini sia di assetto stratigrafico che di caratterizzazione geotecnica. In particolare, a supporto del Progetto Esecutivo sono state eseguite specifiche prove sperimentali di sedimentazione, in scala reale presso il laboratorio *GEEG (Geotechnical and Environmental Engineering Group)*, spin-off dell'Università di Roma "La Sapienza".

Sulla base di queste prove è stata condotta dalla E&G s.r.l. a firma del Prof. Ing. Quintilio Napoleoni la modellazione del comportamento delle volumetrie dei sedimenti durante le attività di escavo e nei siti di riutilizzo nelle logistiche ed in cava "La Bosca".

Come noto, i parametri intrinseci principali che regolano le volumetrie dei materiali di escavo nelle fasi di movimentazione e di collocazione a riutilizzo nel destino finale sono rappresentati dal "bulking factor" (fattore di rigonfiamento), dalla densità relativa [correlata al contenuto del materiale secco "in situ" (TDM Ton Dry Matter)] e dalla granulometria del sedime. A ciò si aggiungano i processi di consolidamento/cedimento nel sito di riutilizzo.

Il capitolo 8 riporta le informazioni relative alle aree logistiche in termini sia di assetto stratigrafico che di caratterizzazione geotecnica e di soggiacenza della falda freatica tramite misure piezometriche dedicate. Si fornisce inoltre il calcolo del cedimento atteso dei terreni di fondazione sotto il carico trasmesso dal materiale conferito nelle aree logistiche L2 e S3.

I valori assunti dal presente progetto di "bulking factor" sulla base della sperimentazione condotta dalla GEEG e sulla esperienza acquisita durante il dragaggio [di tipo meccanico ovvero di tipo idraulico] di sedimenti analoghi in relazione alla specifica tipologia di materiale "in situ" (limoso debolmente sabbioso non addensato), sono riportati nel capitolo 9 sia per le aree logistiche che per cava "La Bosca".

Il capitolo 10 riporta considerazioni di progetto relative sia alla geometria delle scarpate di dragaggio che della possibile interazione tra queste e le banchine esistenti, secondo i criteri definiti dal Progetto Definitivo.

Le conclusioni sono elencate al capitolo 11.

2 OGGETTO E SCOPO

L'oggetto del presente documento sono i lavori di dragaggio del *"Progetto Esecutivo di approfondimento dei Canali Candiano e Baiona, adeguamento banchine operative esistenti, nuovo terminal in Penisola Trattaroli e riutilizzo del materiale estratto in attuazione al P.R.P vigente 2007 – I Fase – Porto di Ravenna"*.

Lo scopo è quello di descrivere le caratteristiche geotecniche dei sedimenti che hanno condizionato la scelta della metodologia di dragaggio e di gestione e trasporto dei sedimenti, e di fornire una caratterizzazione dei terreni di fondazione delle aree a terra di deposito dei materiali dragati.

3 DOCUMENTI E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La Normativa di riferimento è:

- D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”;
- Circolare 02/01/2019 n.7 C.S.LL.PP. recante le istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”;
- EN 1997 Eurocode 7: Geotechnical Design;
- AGI (1997) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. Associazione Geotecnica Italiana;
- AGI (1994) Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio. Associazione Geotecnica Italiana.

I documenti di riferimento di Progetto Definitivo (Novembre 2019) sono:

- [1] CAR.B-a - Caratterizzazione lotto S.Vitale: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [2] CAR.C-a - Caratterizzazione lotto Marcegaglia: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [3] CAR.D-a - Caratterizzazione lotto Largo Trattaroli: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [4] CAR.E-a - Caratterizzazione lotto Trattaroli-Baiona: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [5] CAR.F-a - Caratterizzazione lotto Baiona-Candiano: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [6] CAR.G-a - Caratterizzazione lotto Avamporto: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [7] CAR.H-a - Caratterizzazione lotto canale marino: Relazione-fotografie-stratigrafie
- [8] CAR.M - Relazione conclusiva
- [9] CAR.01-a – Planimetria punti di prelievo: Darsena San Vitale – Largo Trattaroli
- [10] CAR.01-b – Planimetria punti di prelievo: Largo Trattaroli – Avamporto
- [11] CAR.01-c – Planimetria punti di prelievo: Canaletta navigabile di ingresso al porto
- [12] CAR.02-a – Planimetria delle sezioni litologiche: Darsena San Vitale
- [13] CAR.02-b – Planimetria delle sezioni litologiche: Marcegaglia – Trattaroli
- [14] CAR.02-c – Planimetria delle sezioni litologiche: Trattaroli - Avamporto
- [15] CAR.02-d – Planimetria delle sezioni litologiche: canale marino parte 1
- [16] CAR.02-e – Planimetria delle sezioni litologiche: canale marino parte 2
- [17] CAR.03-a – Sezioni geolitologiche lotti: S.Vitale – Marcegaglia – Trattaroli
- [18] CAR.03-b – Sezioni geolitologiche lotti: Trattaroli/Baiona – Baiona/Candiano
- [19] CAR.03-c – Sezioni geolitologiche lotti: Avamporto – Canale marino
- [20] GEN.02 – Cantierizzazione e sequenza delle lavorazioni

Il documento di riferimento per la nuova indagine di aggiornamento della caratterizzazione dei fondali Candiano e Baiona (Dicembre 2019) è:

- [21] Ambiente spa – Prog. 1716 – Servizio di aggiornamento della caratterizzazione dei fondali Candiano e Baiona – Piano di caratterizzazione – Relazione tecnica

I documenti di riferimento di Progetto Esecutivo sono:

- [22] 1114-E-DRX-GEN-RG-02-0 – Dragaggi e gestione sedimenti – Proposte e alternative di dragaggio e gestione dei sedimenti rispetto al PD
- [23] 1114-P-DRX-GEN-RG-01-0 – Gestione dei materiali di dragaggio di approfondimento del canale Candiano, della darsena Baiona, del bacino di evoluzione in avamporto e delle darsene a servizio del traffico crocieristico destinati a riutilizzo nelle aree logistiche a terra (L1, L2 e S3) ed in Cava “La Bosca” – Relazione generale
- [24] 1114-P-DRI-GEN-RG-01-0 – Gestione dei materiali di dragaggio di approfondimento di parte del canale Candiano (zona accesso al porto e darsena Baiona) e dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico destinati a riutilizzo nelle aree logistiche a terra (L2 e S3 Nord) – Relazione generale

- [25] 1114-P-DRI-DRA-SZ-01-0 – Gestione dei materiali di dragaggio di approfondimento di parte del canale Candiano (zona accesso al porto e darsena Baiona) e dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico destinati a riutilizzo nelle aree logistiche a terra (L2 e S3 Nord) – Quaderno delle sezioni di dragaggio
- [26] 1114-E-DR2-GEN-RG-02-0 – Gestione dei materiali di dragaggio di approfondimento di parte del canale Candiano (zona accesso al porto e darsena Baiona) e dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico destinati a riutilizzo nelle aree logistiche a terra (L2 e S3 Nord) – Relazione di caratterizzazione geotecnica
- [27] 1114-E-LG3-TRL-RG-03-0A – Area logistica S3 – Relazione generale
- [28] 1114-E-LG2-TRL-RG-01-0A – Area logistica L2 – Relazione generale
- [29] 1114-E-LG4-TRL-RG-01-0A – Cava Bosca – Relazione generale
- [30] 1114-E-SIN-GEO-RT-01-1 – Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica
- [31] 1114-E-SIN-GTC-RT-01-1 – Relazione geotecnica delle banchine
- [32] 1114-E-SIN-GTC-RT-02-1 – Relazione geotecnica delle casse e delle aree logistiche

4 AREE E QUOTE DI DRAGAGGIO

La planimetria in Figura 1 riporta le aree oggetto di dragaggio, secondo la suddivisione delineata nel progetto definitivo:

- Zona 1: area del canale marino esterna alle dighe foranee e area di una limitata porzione di canale marino tra le dighe foranee;
- Zona 2: area di avamperto compresa tra i moli guardiani e l'imboccatura delle dighe foranee;
- Zona 3: area di canale Candiano tra i moli guardiani, darsena Baiona e largo Trattaroli;
- Zona 4: area di canale Candiano di largo Trattaroli e tratti di sotto banchine zona 3;
- Zona 5: area di canale Candiano tra largo Trattaroli e le darsene San Vitale.

Al fine di consentire in tempi quanto più brevi possibili la piena fruibilità e navigabilità in sicurezza dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico e di due zone del Canale Candiano, il progetto di dragaggio di una porzione limitata delle zone 2 e 3, denominato "*l stralcio esecutivo*", è stato redatto anticipatamente rispetto al presente stralcio progettuale e precisamente nell'Ottobre 2021. Tale progetto ha riguardato il dragaggio di un volume in banco pari a 197.500 m³.

Si evidenzia che la porzione della Zona 2 ubicata nel "settore canale di accesso" (da progr. 5+191,44 a progr. 5+587,44), che nell'ambito del "*l stralcio esecutivo*" è stata dragata a quota -12,50 m s.l.m.m., sarà sottoposta ad un nuovo approfondimento nell'ambito del presente stralcio e portata alla quota di progetto di -13,50 m s.l.m.m..

Il volume complessivo di sedimenti in banco da dragare nelle suddette 5 zone nell'ambito del presente stralcio, al netto del volume di sedimenti che verrà movimentato nel "*l stralcio esecutivo*", risulta pari a circa 4.483.000 m³. Per la sintesi dei volumi di sedimento dragati in ciascuna zona, si rimanda al paragrafo seguente.

Si evidenzia che il dragaggio del canale marino, nella porzione di Zona 1 esterna alle dighe foranee, verrà eseguito in due diverse campagne, in quanto i sedimenti da dragare in alcune aree dovranno essere sottoposti a nuova caratterizzazione, in conformità a quanto prescritto da ARPAE in base agli esiti delle indagini di caratterizzazione eseguite nel periodo 2019-2020.

Le quote di dragaggio variano per le suddette n.5 Zone e sono pari a:

- -13,5 m slm per Zona 1;
- -10/-12,5/-13,5 m slm per Zona 2;
- -12,5 m slm per Zona 3;
- -12,5 m slm per Zona 4;
- -11,5/-12,5 m slm per Zona 5.

Ne deriva che le altezze di scavo sono comprese tra 1 m e 4 m in funzione delle quote dei fondali; si sono adottate pendenze delle scarpate di dragaggio pari a 4/1. Si rimanda alle sezioni di dragaggio di progetto per un maggior dettaglio.

5 DESCRIZIONE INDAGINI GEOTECNICHE

5.1 INDAGINI NELLE AREE DI DRAGAGGIO

Le indagini geotecniche a mare per la caratterizzazione dei terreni da dragare sono le seguenti:

1. Indagine 2014 a supporto del Progetto Definitivo a base di gara;
2. Indagine 2019 per l'aggiornamento della caratterizzazione di Progetto Definitivo in ottemperanza al D.M. Ambiente n.173 del 15 luglio 2016;
3. Indagine 2020/2021 a supporto del Progetto Esecutivo.

Si riporta di seguito la descrizione delle attività svolte durante le suddette indagini.

5.1.1 Indagine 2014

L'indagine è stata svolta da C.R.S.A. MED-Ingegneria e da GeoPolaris nel 2014 a supporto del Progetto Definitivo a base di gara, utilizzando per il campionamento una sonda vibrocore, montata su motonave con posizionamento dei punti di indagine tramite sistema GPS-RTK e misura della quota del fondale dei punti di indagine tramite ecoscandaglio single-beam.

Il diametro della fustella in acciaio del vibrocore è Φ 101 mm, al cui interno è stato inserito un liner in polietilene con Φ 90 mm.

Il numero complessivo dei sondaggi, eseguiti sull'intera area del progetto "Hub portuale di Ravenna I fase", è pari a n. 517 con prelievo di 1.124 campioni (si veda Figura 2 tratta dal doc. rif. [8]).

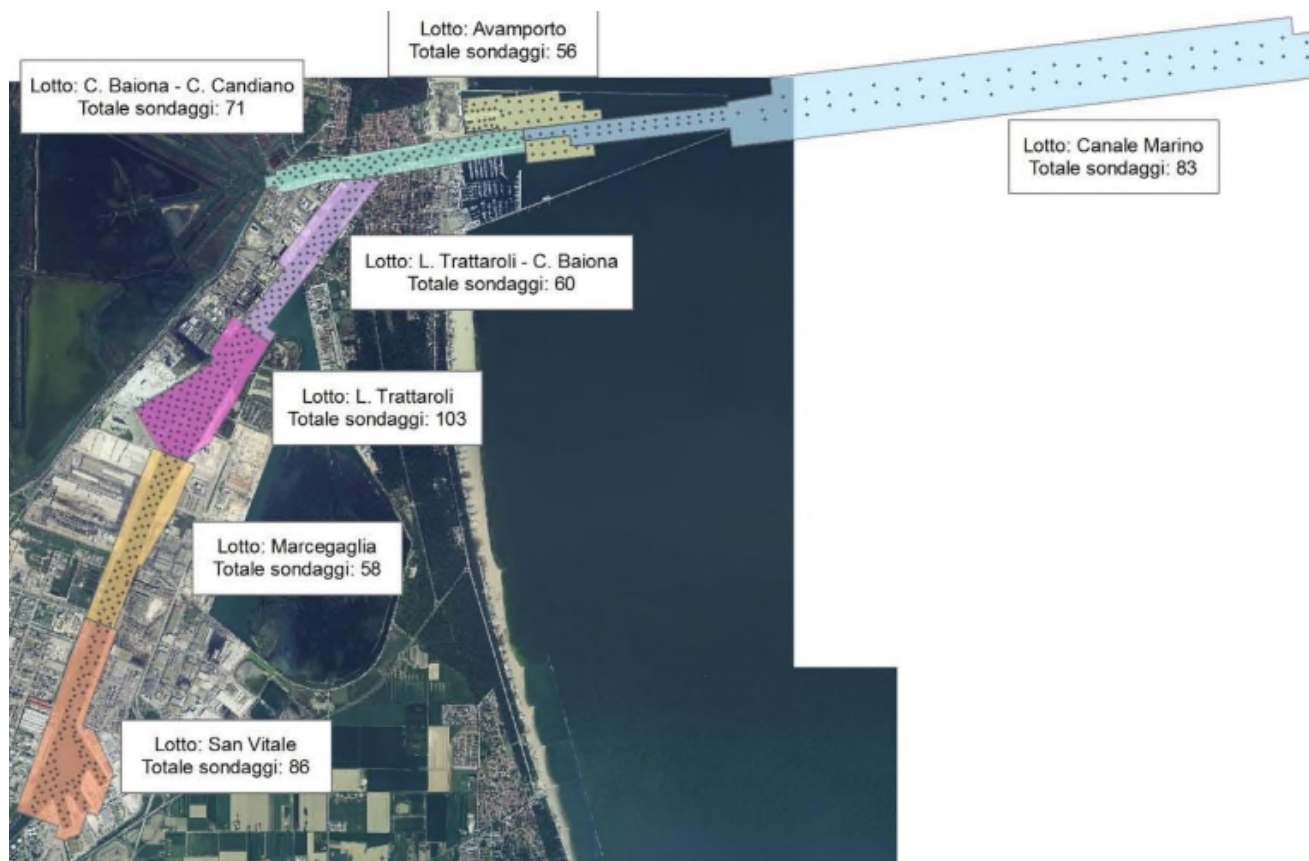


Figura 2 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione dei n.517 sondaggi da doc. rif.[8]

La lunghezza dei sondaggi varia da un minimo di 1 m ad un massimo di 8 m in funzione delle profondità di dragaggio per le diverse aree. Il numero e la quota di prelievo dei campioni per ciascun sondaggio dipendono dalla sua lunghezza.

Ciascun sondaggio è corredato da documentazione fotografica e scheda stratigrafica con profondità dei campioni prelevati, sui quali sono state eseguite in laboratorio sia le determinazioni dei parametri fisici (descrizione macroscopica, granulometria, contenuto d'acqua, peso specifico) che le analisi chimico-ambientali. Visto l'elevato numero di campioni le granulometrie sono state determinate con granulometro laser, distinguendo le frazioni sabbia, limo ed argilla.

5.1.2 Indagine 2019

L'indagine è stata svolta da Ambiente s.p.a. nel 2019 su Commissione della Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico centro settentrionale, al fine di integrare la caratterizzazione dei sedimenti da dragare del progetto definito alla luce del nuovo D.M. Ambiente n.173 del 15 luglio 2016.

Sono stati realizzati n. 402 sondaggi sull'intera area di dragaggio del progetto "Hub portuale di Ravenna I fase" (si veda Figura 3) impiegando per il campionamento una sonda vibrocore con liner interno in policarbonato, montata su motonave con posizionamento dei punti di indagine tramite sistema GPS-RTK.

Sono stati inoltre eseguiti n.18 sondaggi con carotiere terrestre lungo l'argine del canale Candiano in penisola Trattaroli.

La lunghezza dei sondaggi varia da un minimo di 1 m ad un massimo di 4 m in funzione delle profondità di dragaggio per le diverse aree. Il numero e la quota di prelievo dei campioni per ciascun sondaggio dipendono dalla sua lunghezza.

Ciascun sondaggio è corredato da documentazione fotografica e scheda stratigrafica con profondità dei campioni prelevati, sui quali sono state eseguite in laboratorio solamente le analisi chimico-ambientali.



Figura 3 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2019 – Planimetria di ubicazione dei n. 402 sondaggi da doc. rif. [24]

5.1.3 Indagine 2020-2021

L'indagine è stata svolta da Ambiente s.p.a. nel 2020 ed è composta dalla esecuzione di n. 10 sondaggi sull'intera area di dragaggio del progetto "Hub portuale di Ravenna I fase" (si veda Figura 4) impiegando per il campionamento una sonda vibrocore con liner interno in policarbonato, montata su motonave con posizionamento dei punti di indagine tramite sistema GPS-RTK.

La distribuzione dei punti di indagine è tale da raccogliere informazioni per tutte le n. 5 zone di dragaggio.

Le lunghezze di infissione sono state in media di 1 m, per ciascun punto di indagine sono stati prelevati sia campioni disturbati che indisturbati.



Figura 4 – Descrizione indagini geotecniche – Aree di dragaggio – Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione dei n. 10 sondaggi da doc. rif. [22]

Le prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica dei terreni di dragaggio sono state condotte sia su campioni disturbati che indisturbati presso il laboratorio GEEG (Geotechnical and Environmental Engineering Group), start-up dell'Università di Roma la Sapienza.

Sui campioni disturbati ed indisturbati sono state fatte le seguenti prove:

- Granulometria ed aerometria;
- Contenuto naturale d'acqua;
- Limiti di Atterberg;
- Peso specifico dei grani;
- Contenuto di sostanza organica.

Su un numero rappresentativo di campioni per ciascuna zona di dragaggio sono state eseguite:

- Prove di sedimentazione in colonna;
- Prove di resistenza non consolidata non drenata cu in funzione del contenuto d'acqua;
- Prove edometriche.

I risultati delle prove sperimentali di laboratorio sono stati utilizzati per tarare un modello di previsione del comportamento dei sedimenti una volta refluiti all'interno delle casse di colmata temporanee secondo quanto previsto dal Progetto Definitivo. Il modello è stato elaborato dalla E&G s.r.l. a firma del Prof. Ing. Quintilio Napoleoni.

I dati raccolti dalla presente indagine per il Progetto Esecutivo, anche se in numero inferiore rispetto a quelli delle indagini del Progetto Definitivo, sono da considerarsi di qualità superiore in rapporto alla natura delle prove di laboratorio svolte sui campioni prelevati; pertanto, sono di riferimento per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti da dragare.

5.2 INDAGINI NELLE AREE LOGISTICHE

Il presente capitolo riporta la descrizione delle indagini che sono state effettuate nel corso del 2020 – 2021 nelle aree logistiche S3 ed L2 a supporto del Progetto Esecutivo.

5.2.1 Indagine Area logistica S3

A livello di Progetto Definitivo non vi erano indagini geognostiche di riferimento, pertanto nel corso del Progetto Esecutivo, per caratterizzare da un punto di vista geotecnico il comparto S3 Nord e Sud, sono state realizzate le seguenti indagini:

- n.1 sondaggio (S12Pz/20) nella zona S3-Nord, L = 15 m, con prelievo di campioni rimaneggiati ed indisturbati, con relative prove di laboratorio. Il foro di sondaggio è stato strumentato con piezometro a tubo aperto;
- n.1 prova penetrometrica statica tipo CPTU (SCPTu12/20) nella zona S3-Sud, L = 30 m;
- n.7 stendimenti di tomografia geoelettrica (da PEL 1/20 a PEL7/20), suddivisi in n.4 allineamenti nell'area S3-Nord e n.3 allineamenti nell'area S3-Sud.

La Figura 5 riporta l'ubicazione delle suddette indagini.

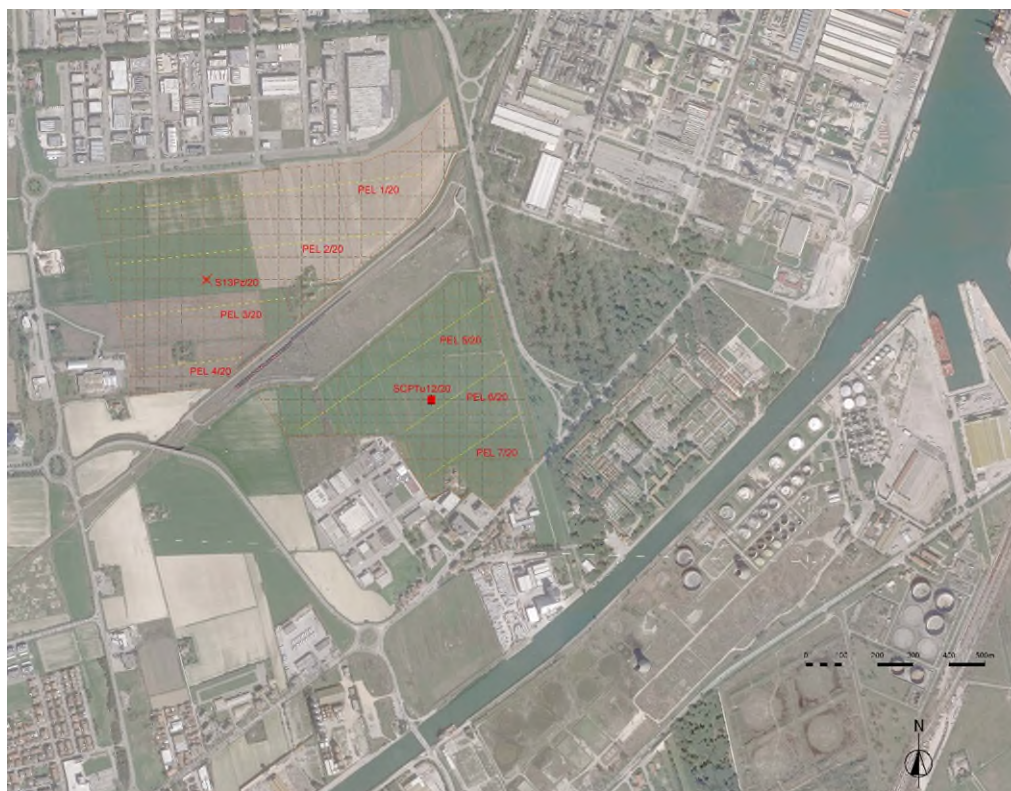


Figura 5 – Descrizione indagini geotecniche – Area logistica S3 - Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione delle indagini

5.2.2 Indagine Area logistica L2

A livello di Progetto Definitivo non vi erano indagini geognostiche di riferimento. Per caratterizzare da un punto di vista geotecnico l'area logistica L2 sono state realizzate, durante il Progetto Esecutivo, le seguenti indagini:

- sondaggio S14Pz/20 nel comparto Sud di L2, L = 15 m, con prelievo di campioni rimaneggiati ed indisturbati, con relative prove di laboratorio. Il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto;
- prova penetrometrica statica dinamica SCPTu13/20 nel comparto Nord di L2, L = 30 m;
- n.3 stendimenti di tomografia geoelettrica (da PEL 13/20 a PEL15/20).

La Figura 6 riporta l'ubicazione delle suddette indagini.



Figura 6 – Descrizione indagini geotecniche – Area logistica L2 – Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione delle indagini

6 GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

6.1 ASSETTO GEOLOGICO

Il territorio del comune di Ravenna è assimilabile ad un piano debolmente inclinato in direzione N-NE, con lievi ondulazioni che si manifestano con depressioni a fondo sub-pianeggiante separate da zone in rilievo di forma allungata.

L'evoluzione morfologico-sedimentaria della pianura costiera romagnola è conseguenza dell'interazione di processi fluviali, marini costieri e tidali che hanno caratterizzato la dinamica deposizionale del Quaternario.

Le successioni dell'attuale pianura romagnola sono il risultato di avanzamenti e arretramenti della linea di costa dati dalla variazione del livello eustatico, in particolare nella parte finale del Quaternario.

Durante l'ultima glaciazione (regressione Würmiana 60.000-70.000 anni fa) il livello del mare si era abbassato rispetto a quello attuale di un centinaio di metri spostando la linea di costa a sud di Ancona, favorendo la deposizione di limi argillosi con intercalazioni di argille e sabbie corrispondenti ad un ambiente di piana alluvionale.

Successivamente seguì una fase trasgressiva, corrispondente alla trasgressione Flandriana (circa 17.000 anni fa), che favorì l'ingressione marina e un arretramento della linea di costa di circa 16-20 km ad ovest della costa attuale all'altezza di Ravenna. Tale evento è rappresentato da depositi di sabbie fini con intercalazioni limose-argillose corrispondenti ad un ambiente costiero di alta energia che interagiva con lo sfociare di fiumi locali quali Lamone, Montone, Ronco e Savio.

Seguì una fase di regressione normale (Tardo Olocene) che si è verificata sulla costa dell'alto Adriatico, non più indotta da variazioni eustatiche ma di tipo deposizionale, che causò lo spostamento della vecchia linea di costa verso est, fino alla posizione attuale, dando luogo alla formazione dei depositi olocenici recenti.

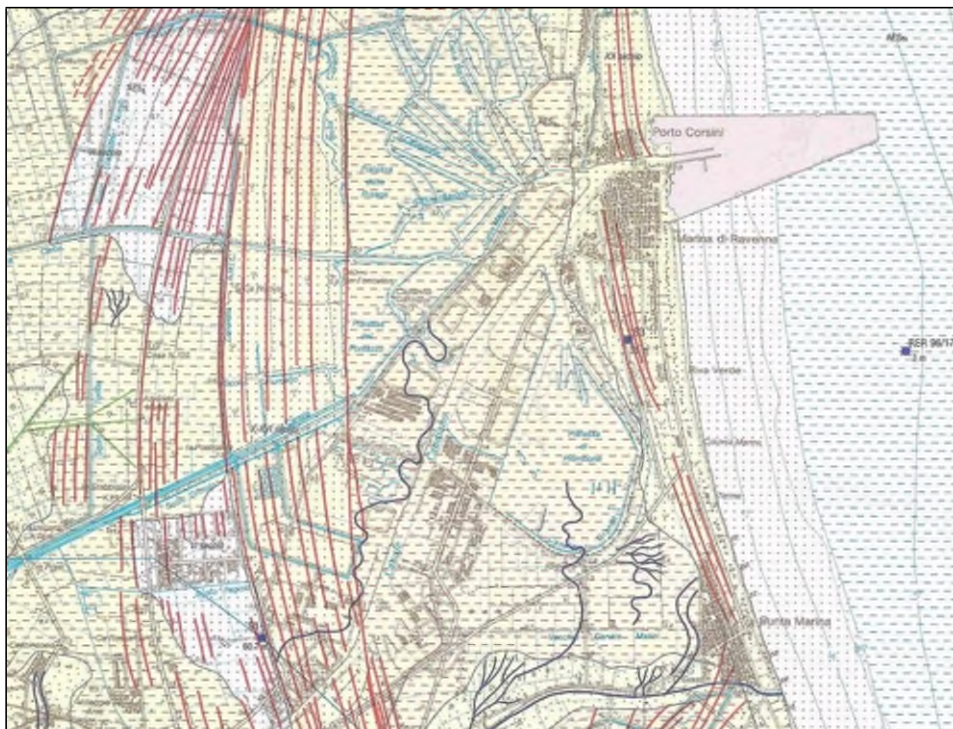
Il nuovo "Foglio Geologico 223 – Ravenna" del CARG riporta per la zona di Ravenna l'affioramento dei sedimenti quaternari del Subsistema di Ravenna, AES8 (Pleistocene Medio- Olocene) afferente al Sistema Emiliano Romagnolo Superiore – AES (si veda Figura 7).

L'AES8 risulta prevalentemente composto da corpi lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi di spessore plurimetrico di sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale o di ambiente deltizio e litorale.

Il limite inferiore risulta inconforme e marcato da una superficie di discontinuità, mentre il limite superiore corrisponde al piano topografico; lo spessore dell'unità è compreso tra 20 e 30 m.

Nella parte sommitale del Subsistema di Ravenna viene distinta un'unità di rango inferiore, l'Unità di Modena (AES8a) di età post-romana (IV-VI sec. d.C. - Attuale), costituita da sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale e deltizio-litorale. Il limite inferiore è inconforme e marcato da superfici di erosione fluviale mentre quello superiore coincide con il piano topografico ed è definito da un suolo calcareo. Lo spessore di questa unità è compreso tra 0 e 5.5 m.

I depositi sono ulteriormente suddivisi in funzione della loro genesi in depositi litorali di spiaggia e duna eolica (sabbie fini e medie) e in depositi di laguna e palude salmastra (argille e limi). Questi depositi sono localmente sormontati da depositi alluvionali sabbiosi.



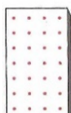
Legenda:



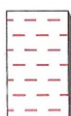
Unità di Modena

Costituisce la parte sommitale del Subsistema di Ravenna. Si tratta di sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale, deltizio e litorale, organizzati in corpi sedimentari lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi, di spessore plurimetrico. Il limite inferiore è inconforme ed è marcato da una superficie di erosione fluviale con resti archeologici di età dal Neolitico al Romano. Il limite superiore coincide con il piano topografico. (AES8a)

DEPOSITI DELTIZI E LITORALI



Sabbie prevalentemente fini e medie, subordinatamente finissime, con abbondanti bioclasti e biosomi di molluschi. Depositi di cordone litorale (spiaggia e duna eolica). Formano un corpo sedimentario complesso a geometria cuneiforme. Fanno transizione laterale e verso il basso a depositi di prodelta e transizione alla piattaforma; verso l'alto passano a depositi lagunari e di palude salmastra.



Argille limose, argille, torbe e limi argillosi, in strati da molto sottili a medi, alternati a sabbie finissime con conchiglie in strati da sottili a spessi. Si tratta di depositi di palude salmastra e laguna (retro cordone). Formano corpi sedimentari a geometria prevalentemente nastriforme con spessore massimo di 2-3 metri. Passano lateralmente e verso il basso a depositi di cordone litorale. In prossimità dell'area portuale a causa di accumuli di sabbie legate all'attività antropica non sono presenti o comunque poco rappresentativi.

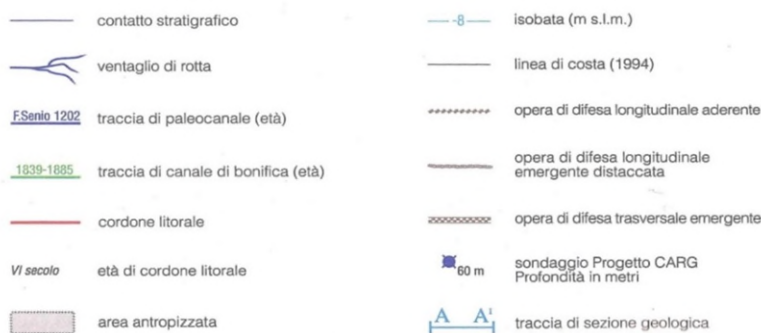


Figura 7 – Assetto geologico – Stralcio Carta Geologica 1:50.000, Foglio 223 Ravenna, Regione Emilia Romagna

6.2 ASSETTO STRATIGRAFICO

L'integrazione delle informazioni tratte dall'indagine di Progetto Definitivo con le indagini di Progetto Esecutivo ha permesso di dettagliare l'assetto stratigrafico dell'area di studio, che è risultato essere uniforme in rapporto ai meccanismi deposizionali.

Di seguito si riporta la descrizione delle principali unità stratigrafiche, che sono state definite sulla base della interpretazione delle indagini e che si susseguono dall'alto verso il basso nell'area di studio.

Non sussistono pertanto importanti differenze nell'assetto stratigrafico delle aree interessate dai dragaggi o di quelle dove sono presenti le casse di colmata, le aree logistiche e la cava "La Bosca".

L'unica differenza degna di nota è la presenza nelle aree logistiche alla sommità della sequenza stratigrafica di depositi afferenti all'Unità Paleoalveo, che non sono stati ritrovati nei settori delle casse di colmata o in quelli interessati dai dragaggi.

Depositi antropici (Unità "R")

I terreni di riporto sono estremamente diffusi e sono rappresentati da terreni a granulometria variabile prevalentemente sabbie e sabbie limose. La loro presenza è diffusa nell'intera area delle banchine portuali.

Depositi alluvionali (Unità "Paleoalveo")

I terreni sono costituiti da sabbie e sabbie limose addensate appartenenti a depositi di canale, argine, rotta fluviale. Sono presenti esclusivamente in settori limitati delle aree logistiche.

Depositi di palude salmastra (Unità "P")

Quest'unità è caratterizzata da geometrie cuneiformi e lenticolari, pertanto non è sempre presente in tutta l'area di studio, in particolare è assente laddove sono presenti i dossi associati ai depositi litorali.

È costituita prevalentemente da argille con abbondanti frammenti di legni e resti vegetali, localmente sono presenti intercalazioni di sabbie e limi; lo spessore è compreso tra 1 m e 3 m.

L'abbondanza di resti vegetali e la presenza di argille nere e di torba suggeriscono che la deposizione di questa unità avveniva in ambienti ad energia molto bassa quali paludi salmastre e laghi costieri con intermittente connessione con il mare, posizionati nelle zone di retro cordone litorale.

Depositi di cordone litorale (Unità "S")

Questa unità è composta da sabbie medio-fini nella porzione inferiore e da sabbie medio-grossolane in quella superiore. Lo spessore è tra 5 m e 15 m e deriva dalla giustapposizione di cordoni litorali lateralmente continui, la cui formazione è legata alla progradazione di un sistema deltizio dominato dall'azione delle onde e relativo all'antico delta del Po. Tali cordoni sono interpretati come depositi di fronte deltizia e di piana di sabbia; la presenza di cordoni litorali a profondità via via minori, muovendosi da ovest verso est, documenta la migrazione verso mare della linea di costa durante la progradazione del delta, determinando la migrazione dei cordoni ed il successivo isolamento di lagune poco profonde e paludi salmastre, comprese tra cordoni litorali successivi.

Depositi di prodelta e transizione alla piattaforma (Unità "M")

Questa unità è di tipo coesivo e presenta una marcata geometria cuneiforme con uno spessore variabile da 9 a 16 metri e comprende due litofacies: quella inferiore è caratterizzata dall'alternanza ritmica, decimetrica, di argille e argille limose grigie con sabbie finissime. In essa sono abbondanti i macrofossili, in genere gasteropodi marini, concentrati in livelli stratigrafici ben definiti.

La litofacies sovrastante costituisce invece la parte intermedia e sommitale dell'associazione di facies, presenta caratteristiche litologiche simili a quella inferiore, differendo da essa per un maggiore contenuto in argilla e per la presenza di frammenti di legno e resti vegetali.

L'unità è stata deposta in un ambiente marino relativamente poco profondo di transizione alla piattaforma.

Depositi di barriera trasgressiva (Unità "T")

Nella zona in esame, l'associazione di facies T è costituita un orizzonte inferiore conchigliare di 5-30 centimetri di spessore che passa verso l'alto a sabbie fini e finissime fossilifere, con subordinate intercalazioni di argille limose. Lo spessore complessivo dell'unità è di 1-2 m.

La deposizione delle sabbie è avvenuta in un ambiente litorale ad elevata energia, probabilmente di spiaggia sommersa inferiore.

Questa unità appoggia direttamente con contatto erosivo (superficie di ravinement) sui sottostanti depositi alluvionali pleistocenici (associazione di facies A) senza interposizione dei depositi trasgressivi di retro barriera (litofacies B), costituendo così la base del Sintema di Ravenna. Verso l'alto, un graduale incremento delle intercalazioni limose segna la transizione alle argille di prodelta e transizione alla piattaforma (facies M).

L'orizzonte fossilifero, situato al di sopra del contatto erosivo, marca una superficie di disconformità formatasi in seguito al processo di arretramento della spiaggia; nel complesso, l'unità riflette la migrazione verso terra di una barriera, avvenuta nel corso della trasgressione olocenica.

Depositi di piana alluvionale (Unità "A")

Si tratta di depositi alluvionali pleistocenici composti da un livello superiore fine limoso-argilloso consistente e da un livello inferiore granulare sabbioso addensato (depositi di canale fluviale) con intercalazioni fini (depositi di esondazione).

Lo spessore non è stato definito con precisione in quanto l'unità si estende al di sotto delle massime profondità di indagine.

6.3 ASSETTO IDROGEOLOGICO

Analizzando il territorio provinciale dal punto di vista idrogeologico si rileva la presenza di un acquifero che può essere assimilato a scala regionale ad un sistema unico multistrato, strettamente connesso alla stratigrafia presente della pianura emiliana.

Ciascun acquifero risulta idraulicamente separato da quelli sovrastanti e sottostanti per la presenza di livelli argillosi impermeabili sviluppati a scala regionale, denominati "barriere di permeabilità regionali".

L'area del progetto è inquadrata all'interno dell'unità stratigrafica del "gruppo A", corrispondente al Sintema Emiliano Romagnolo Superiore quindi a depositi alluvionali, come indicato nello schema idrostratigrafico di Figura 8.

In particolare, la falda superficiale freatica dell'area in studio è inclusa nei terreni granulari costituiti dalle sabbie e sabbie limose dei cordoni litorali (associazione di facies "S"), fino a profondità di circa 15 metri e limitata inferiormente da terreni argilloso-limosi impermeabili e corrispondenti alle argille e limi di prodelta appartenenti alle facies di tipo "M".

La falda superficiale è alimentata dall'infiltrazione diretta delle precipitazioni, dall'irrigazione, dalle perdite del reticolo idrografico ed è regimata dalla rete di canali e scoli consorziali, per lo più controllati da impianti idrovori e soggetta a modesti emungimenti ubicati in Figura 9.

Il livello "M", invece, separa verso il basso un sistema di acquiferi multistrato con falde in pressione costituite da orizzonti permeabili sabbiosi isolati da livelli argillosi. Tale acquifero ha maggiori potenzialità di quello superficiale in quanto risulta alimentato dalla retrostante pianura con un'alimentazione dalla fascia pedecollinare dei conoidi.

In Figura 10 si riporta uno stralcio della "Carta delle isofreatiche" della falda superficiale, che permette di individuare la direzione di drenaggio con le frecce più grosse e la direzione di deflusso con quelle fini.

Sulla base di questa carta è possibile definire per le aree logistiche un livello di falda, che si trova ad una quota di -1/-2 m slm, tenuto artificialmente al di sotto del piano campagna attraverso il sistema di canali di bonifica e di idrovore, in quanto l'assetto geomorfologico dell'area e la vicinanza al mare imporrebbero un livello attorno allo 0 m slm.

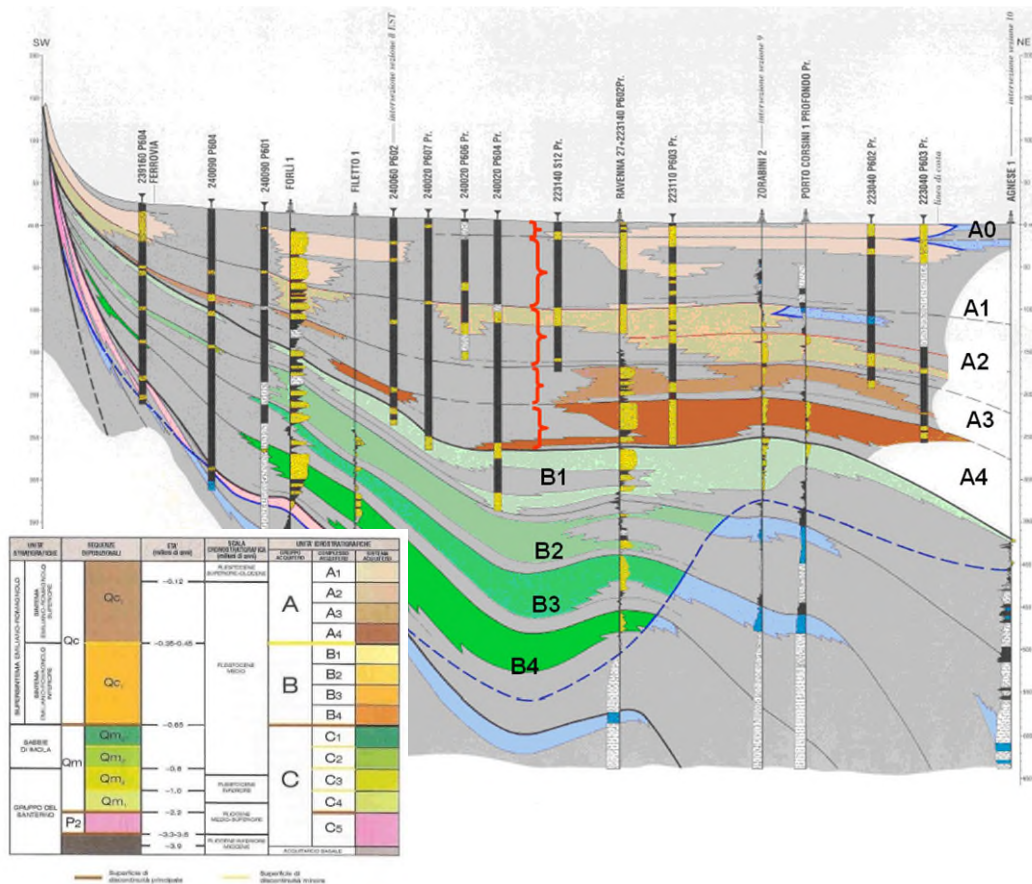


Figura 8 – Assetto idrogeologico – Schema stratigrafico e suddivisione stratigrafico-sequenziale dei depositi plio-quadernari dell'area romagnola con indicazioni delle unità idrostratigrafiche

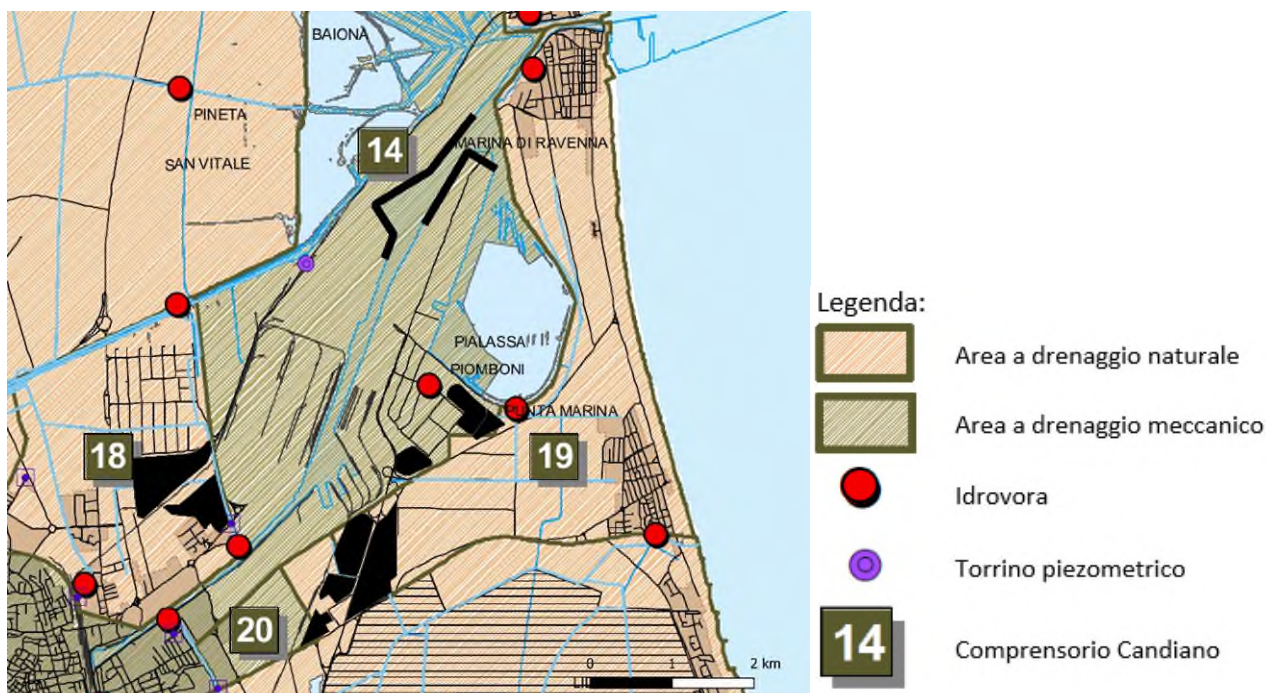
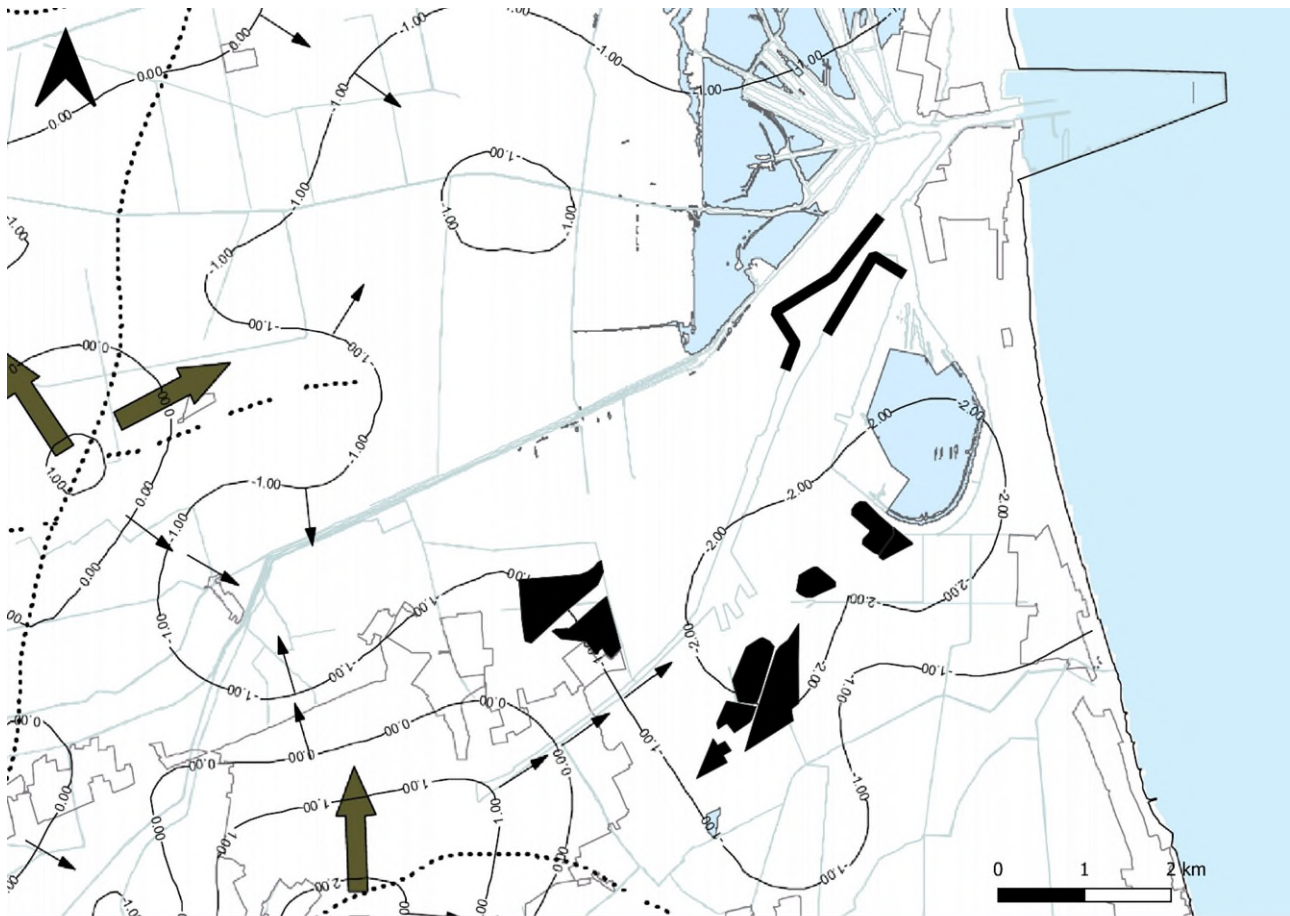


Figura 9 – Assetto idrogeologico – Stralcio della “Carta delle acque superficiali – carta del drenaggio” (B.2.1, 2000). In nero sono segnate le aree di progetto



Legenda:


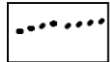

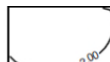
-  Direzione di drenaggio
-  Spartiacque sotterranei
-  Direzione di deflusso
-  Isofreatiche (quota medio mare)

Figura 10 – Assetto idrogeologico – Stralcio della “Carta delle acque sotterranee-cartà delle isofreatiche” (B.2.2.a, 2000).
In nero sono segnate le aree logistiche, le casse di colmata, le banchine oggetto di intervento del Progetto Esecutivo

7.1.1.2 Indagine 2019

L'indagine del 2019 non riporta sezioni stratigrafiche per la Zona 1 di dragaggio, la Figura 13 riporta l'ubicazione dei punti di indagine.

Le schede stratigrafiche dei sondaggi indicano come prevalenti i limi argillosi/argille limose con locali lenti di limi sabbiosi/sabbie limose soprattutto in corrispondenza dell'avamporto.



Figura 13 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [21]

7.1.1.3 Indagine 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 14; la stratigrafia delle n.2 verticali realizzate è la seguente:

- verticale R10: limo argilloso/limo con argilla
- verticale R9: limo argilloso/limo con argilla

Sulla base di queste verticali l'area è composta da limi argillosi/limi con argilla.

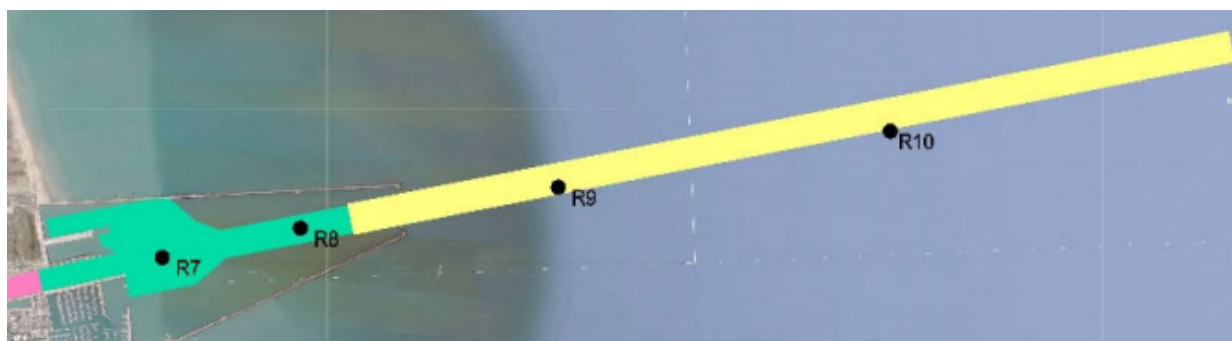


Figura 14 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22]

7.1.1.4 Confronto

La Tabella 1 riporta per la Zona di dragaggio 1 l'assetto stratigrafico in funzione delle informazioni derivanti dalle diverse indagini geognostiche svolte.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 indicano generalmente una riduzione della granulometria rispetto all'indagine del 2014 con prevalenza della frazione limoso - argillosa su quella limoso – sabbiosa.

Tabella 1 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 1 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico
2014	Limo sabbioso/limo sabbioso argilloso
2019	Limo argilloso/argille limose
2020/2021	Limo argilloso/limo con argilla

7.1.2 Zona 2

7.1.2.1 Indagine 2014

La Figura 15 riporta uno stralcio del doc. rif. [14] della planimetria di ubicazione delle indagini e delle n.2 sezioni stratigrafiche (colore rosso) della Zona 2 o Avamporto.

La stratigrafia delle n.2 sezioni, riportate in Figura 16 e contenute nel doc. rif [19], è descritta di seguito:

- Sezione 1: sabbia limosa/limo sabbioso/limo argilloso
- Sezione 2: limo sabbioso e secondariamente limo sabbioso argilloso/limo argilloso

La granulometria prevalente in funzione degli spessori degli strati è quella del limo sabbioso/sabbia limosa e secondariamente del limo sabbioso argilloso/limo argilloso.



Figura 15 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif.[14]

7.1.2.2 Indagine 2019

La Figura 17 riporta uno stralcio del doc. rif. [21] della planimetria di ubicazione delle indagini e della n.1 sezione stratigrafica (colore rosso), riportata in Figura 18, dove si nota come la granulometria prevalente sia quella limosa.

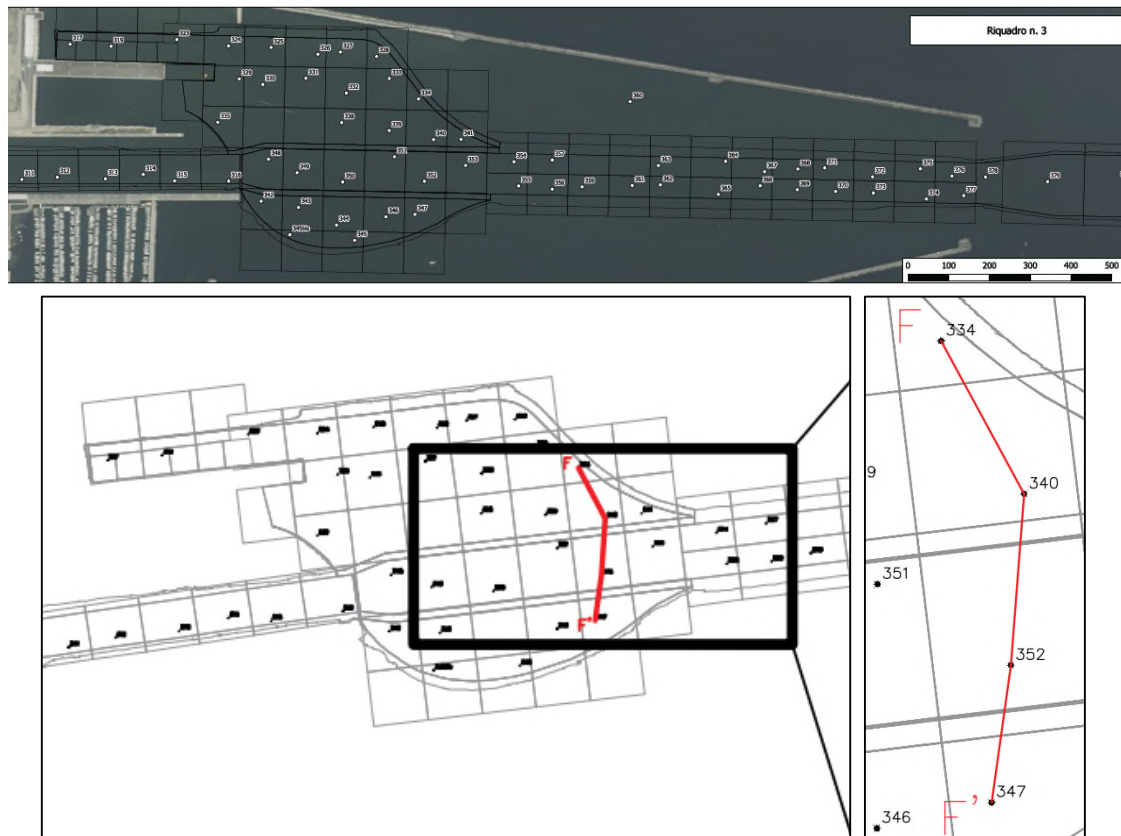


Figura 17 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e della sezione stratigrafica da doc. rif. [21]

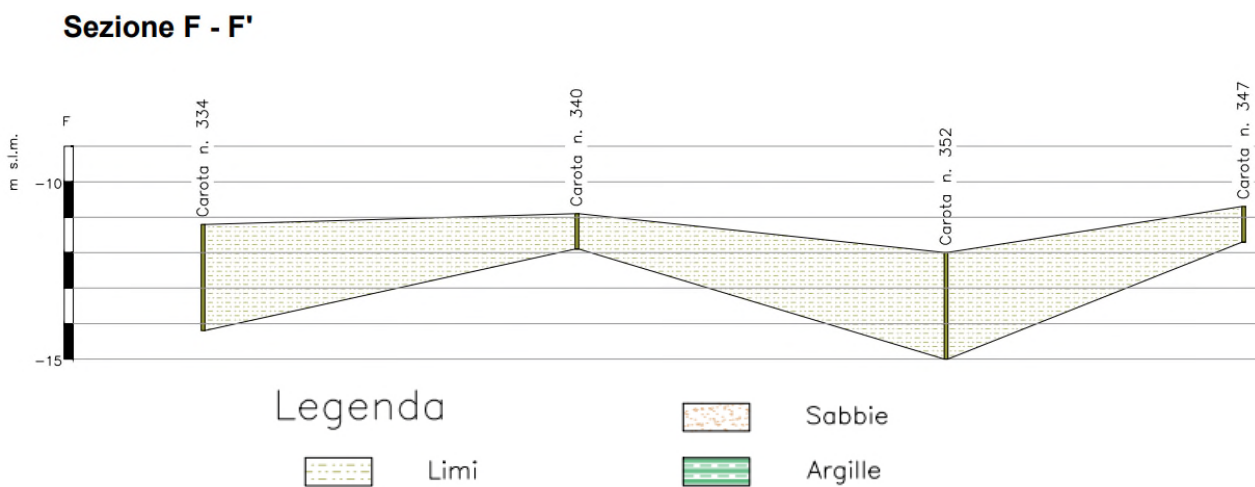


Figura 18 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Indagine 2019 – Sezione stratigrafica F-F' da doc. rif. [21]

7.1.2.3 Indagine 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 19, la stratigrafia delle n.2 verticali realizzate è la seguente:

- verticale R8: limo argilloso
- verticale R7: limo argilloso

Sulla base di queste verticali l'area è composta da limi argillosi.

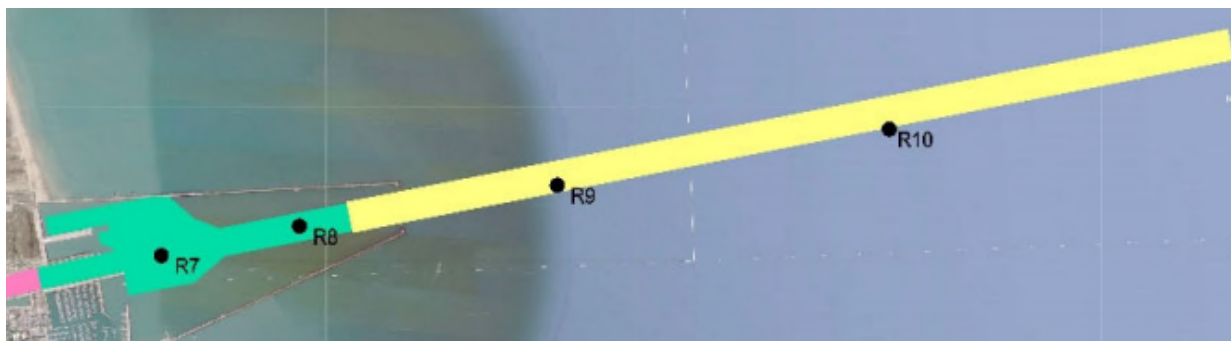


Figura 19 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 - Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc.rif.[22]

7.1.2.4 Confronto

La Tabella 2 riporta per la Zona di dragaggio 2 l'assetto stratigrafico in funzione delle informazioni derivanti dalle diverse indagini geonostiche svolte.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 indicano generalmente una riduzione della granulometria rispetto all'indagine del 2014 con prevalenza della frazione limoso – argillosa su quella limoso – sabbiosa.

Tabella 2 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 2 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico
2014	Limo sabbioso/sabbia limosa e secondariamente limo sabbioso argilloso
2019	Limo
2020/2021	Limo argilloso

7.1.3 Zona 3

7.1.3.1 Indagine 2014

La Figura 20 riporta uno stralcio del doc. rif. [14] della planimetria di ubicazione delle indagini e delle n.8 sezioni stratigrafiche (colore rosso) della Zona 3.

Sono presenti n.3 sezioni nel tratto Canale Candiano/Canale Baiona, n.3 sezioni nel tratto Canale Baiona/Largo Trattaroli, n.2 sezioni nel tratto Largo Trattaroli.

La stratigrafia delle sezioni, riportate in Figura 21, Figura 22, Figura 23 e contenute nel doc. rif. [18], è descritta di seguito:

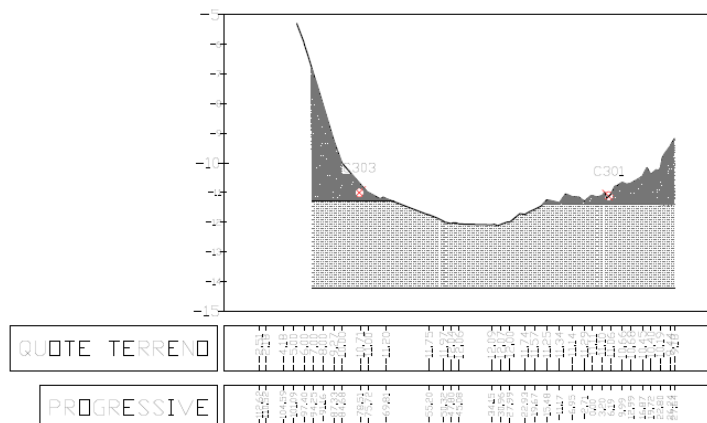
- Sezione 1 C. Candiano/C. Baiona: limo sabbioso e secondariamente sabbia limosa
- Sezione 2 C. Candiano/C. Baiona: limo sabbioso
- Sezione 3 C. Candiano/C. Baiona: limo sabbioso/ sabbia limosa/ limo sabbioso argilloso
- Sezione 1 C. Baiona/L. Trattaroli: limo sabbioso/sabbia fine
- Sezione 2 C. Baiona/L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso
- Sezione 3 C. Baiona/L. Trattaroli: limo sabbioso/sabbia limosa
- Sezione 1 L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso
- Sezione 2 L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso

La granulometria prevalente in funzione degli spessori degli strati è quella del limo sabbioso e secondariamente del limo sabbioso argilloso e della sabbia limosa.

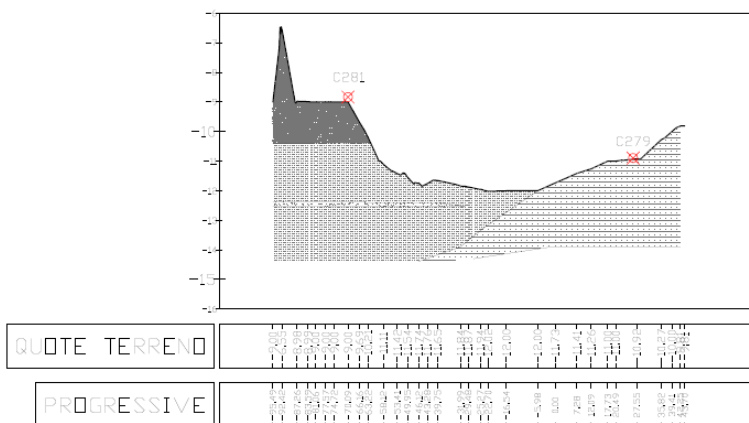


Figura 20 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [14]

Sez 1 L.Trattaroli-C.Baiona



Sez 2 L.Trattaroli-C.Baiona



Sez 3 L.Trattaroli-C.Baiona

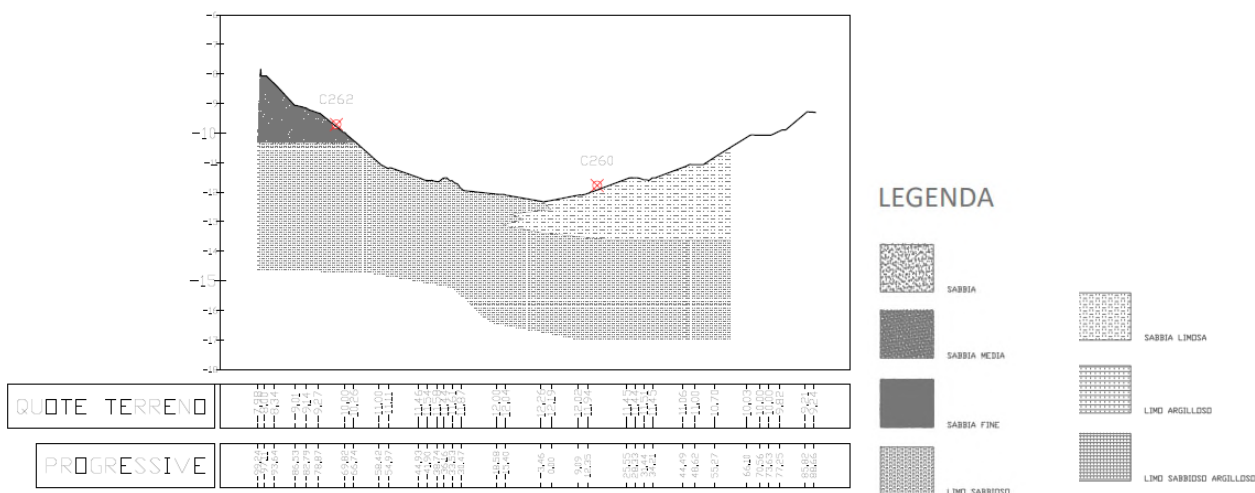
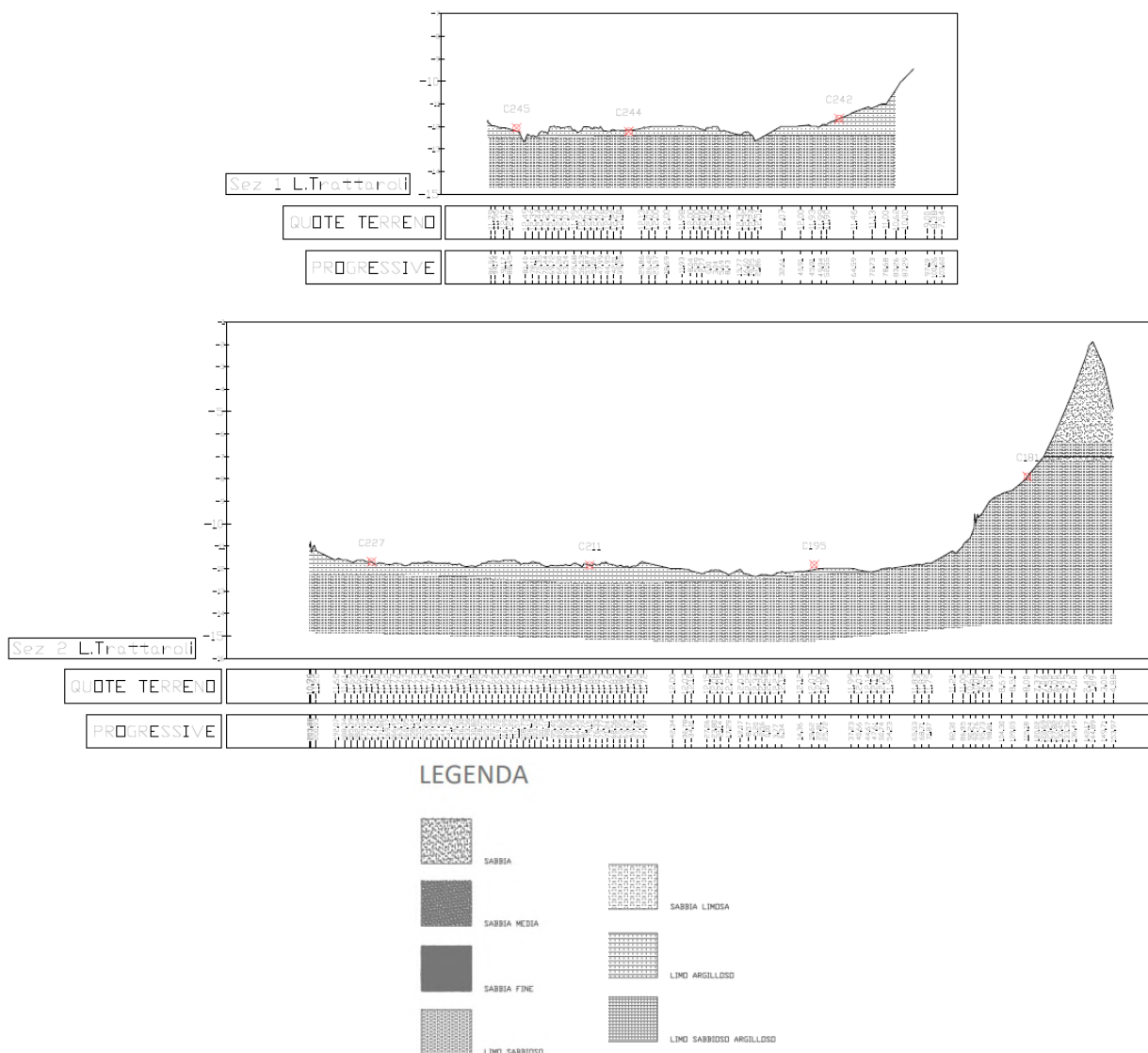


Figura 22 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3: L. Trattaroli/C. Baiona – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [18]



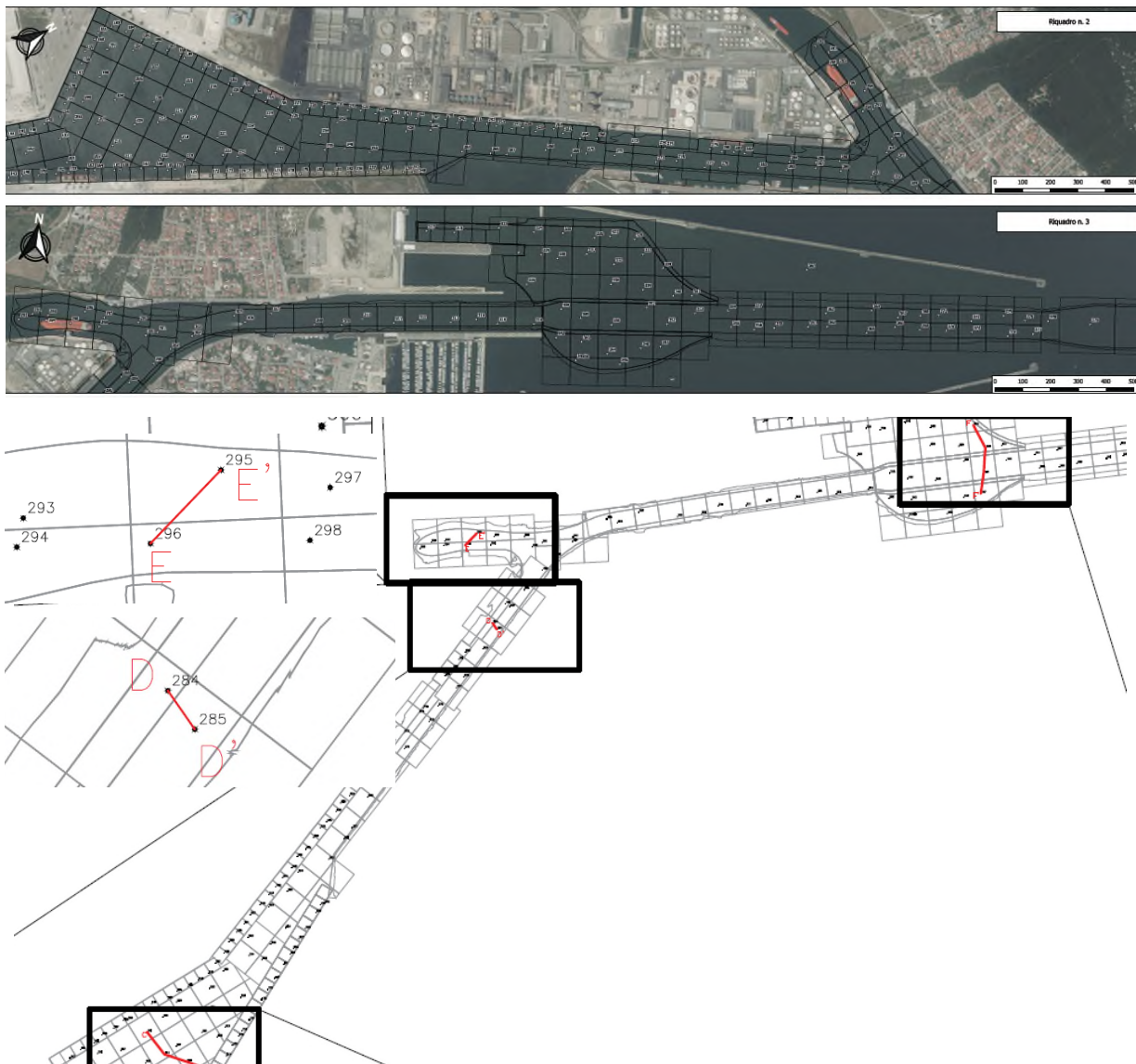


Figura 24 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21]

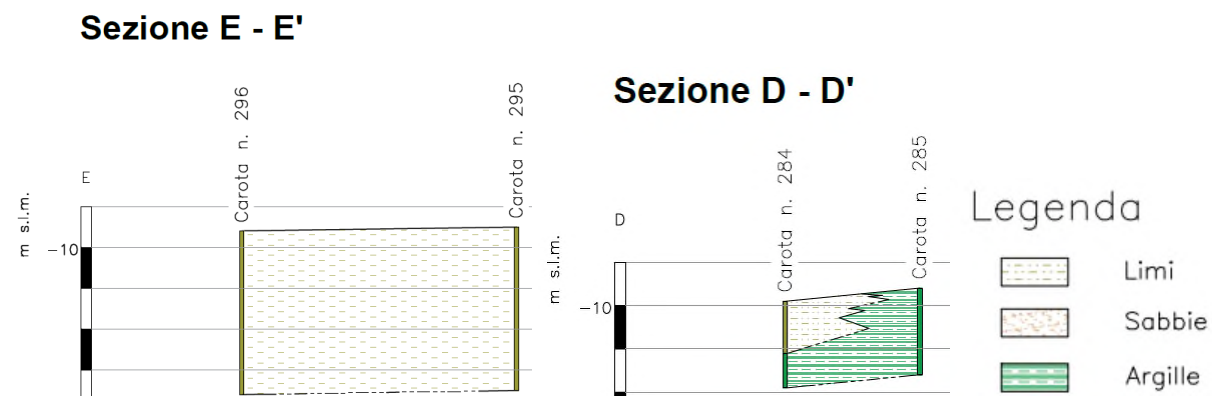


Figura 25 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche E-E'/D-D' da doc. rif. [21]

7.1.3.3 Indagine 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 26, la stratigrafia delle n.2 verticali realizzate è la seguente:

- verticale R6: limo argilloso
- verticale R5: limo argilloso

Sulla base di queste verticali l'area è composta da limi argillosi.



Figura 26 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22]

7.1.3.4 Confronto

La Tabella 3 riporta per la Zona di dragaggio 3 l'assetto stratigrafico in funzione delle informazioni derivanti dalle diverse indagini geognostiche svolte.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 indicano generalmente una riduzione della granulometria rispetto all'indagine del 2014 con prevalenza della frazione limoso - argillosa su quella limoso – sabbiosa.

Tabella 3 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 3 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico
2014	Limo sabbioso e secondariamente limo sabbioso argilloso/sabbia limosa
2019	Limi ed Argille
2020/2021	Limo argilloso

7.1.4 Zona 4

7.1.4.1 Indagine 2014

La Figura 27 riporta uno stralcio del doc. rif. [13] della planimetria di ubicazione delle indagini e delle n.3 sezioni stratigrafiche (colore rosso) della Zona 3.

La stratigrafia delle n.3 sezioni, riportate in Figura 28 e contenute nel doc. rif. [17], è descritta di seguito:

- Sezione 1 L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso
- Sezione 2 L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso
- Sezione 3 L. Trattaroli: limo sabbioso/limo sabbioso argilloso/sabbia fine

La granulometria prevalente in funzione degli spessori degli strati è quella del limo sabbioso/limo sabbioso argilloso e secondariamente della sabbia fine.



Figura 27 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [13]

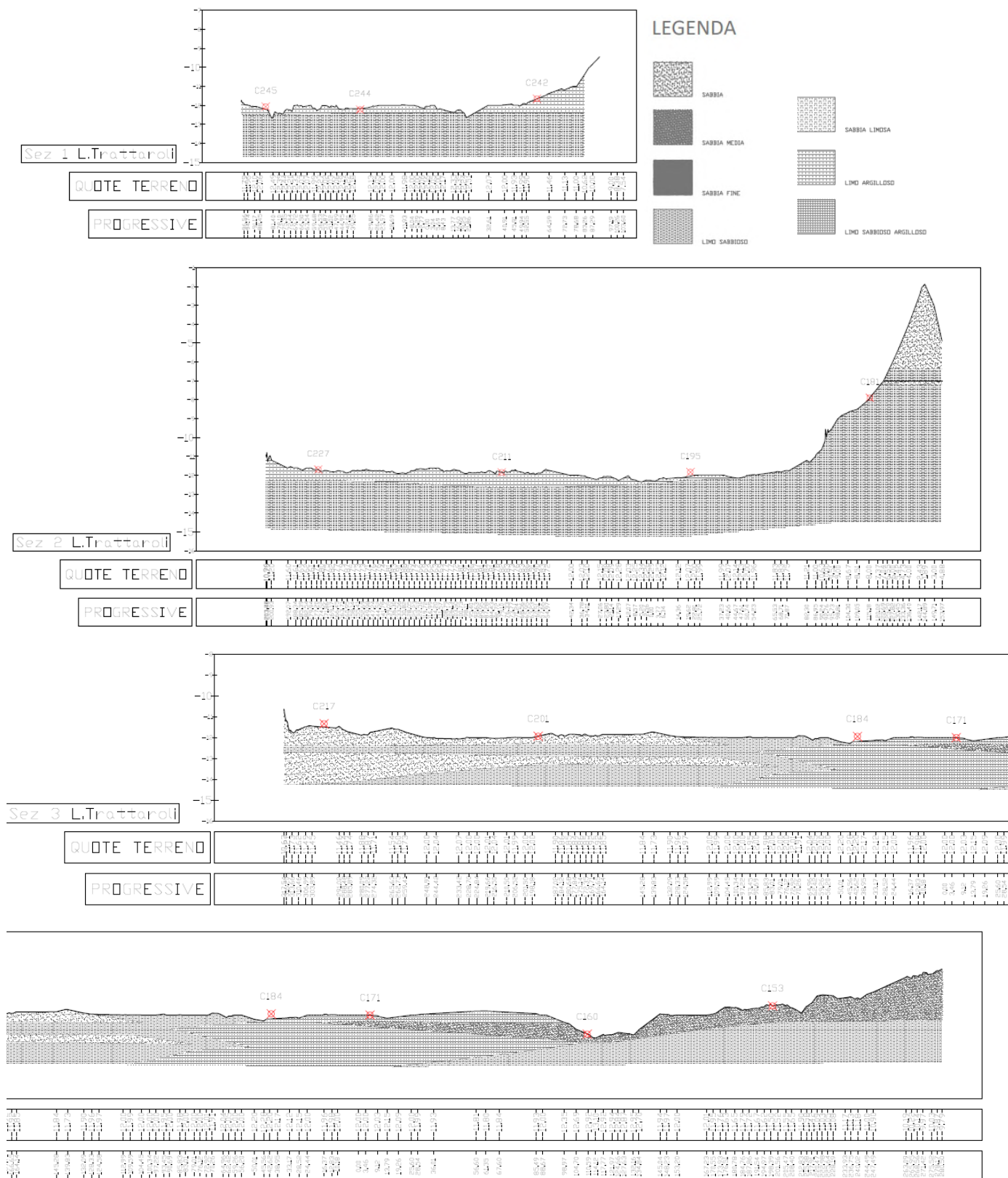


Figura 28 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif. [17]

7.1.4.2 Indagine 2019

La Figura 29 riporta uno stralcio del doc. rif. [21] della planimetria di ubicazione delle indagini e della n.1 sezione stratigrafica (colore rosso), riportata in Figura 30, dove si nota come la granulometria prevalente sia quella limosa e secondariamente quella sabbiosa.

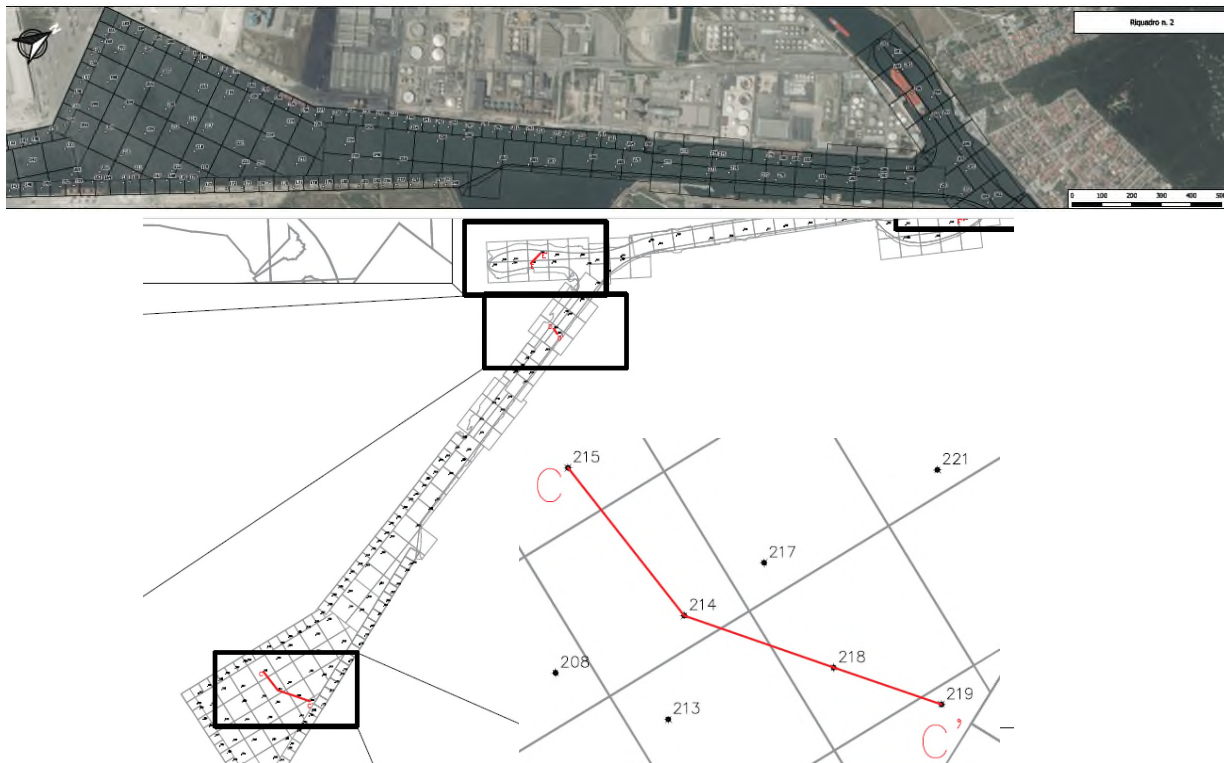


Figura 29 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21]

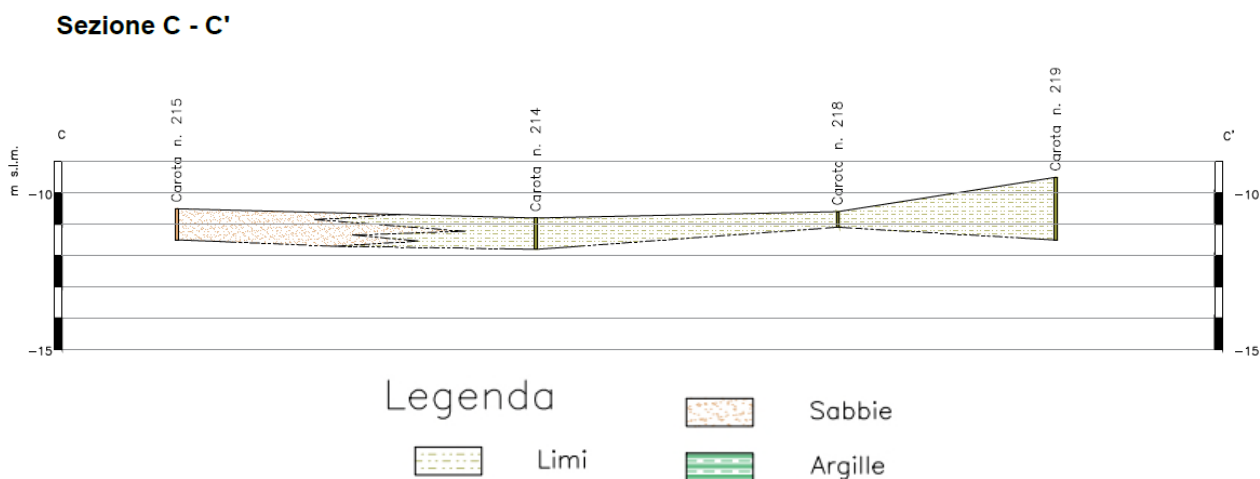


Figura 30 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2019 – Sezione stratigrafica C-C' da doc. rif. [21]

7.1.4.3 Indagine 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 31, è presente la sola verticale R4 nella Zona 4 di dragaggio, che indica una granulometria limoso-argillosa.



Figura 31 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22]

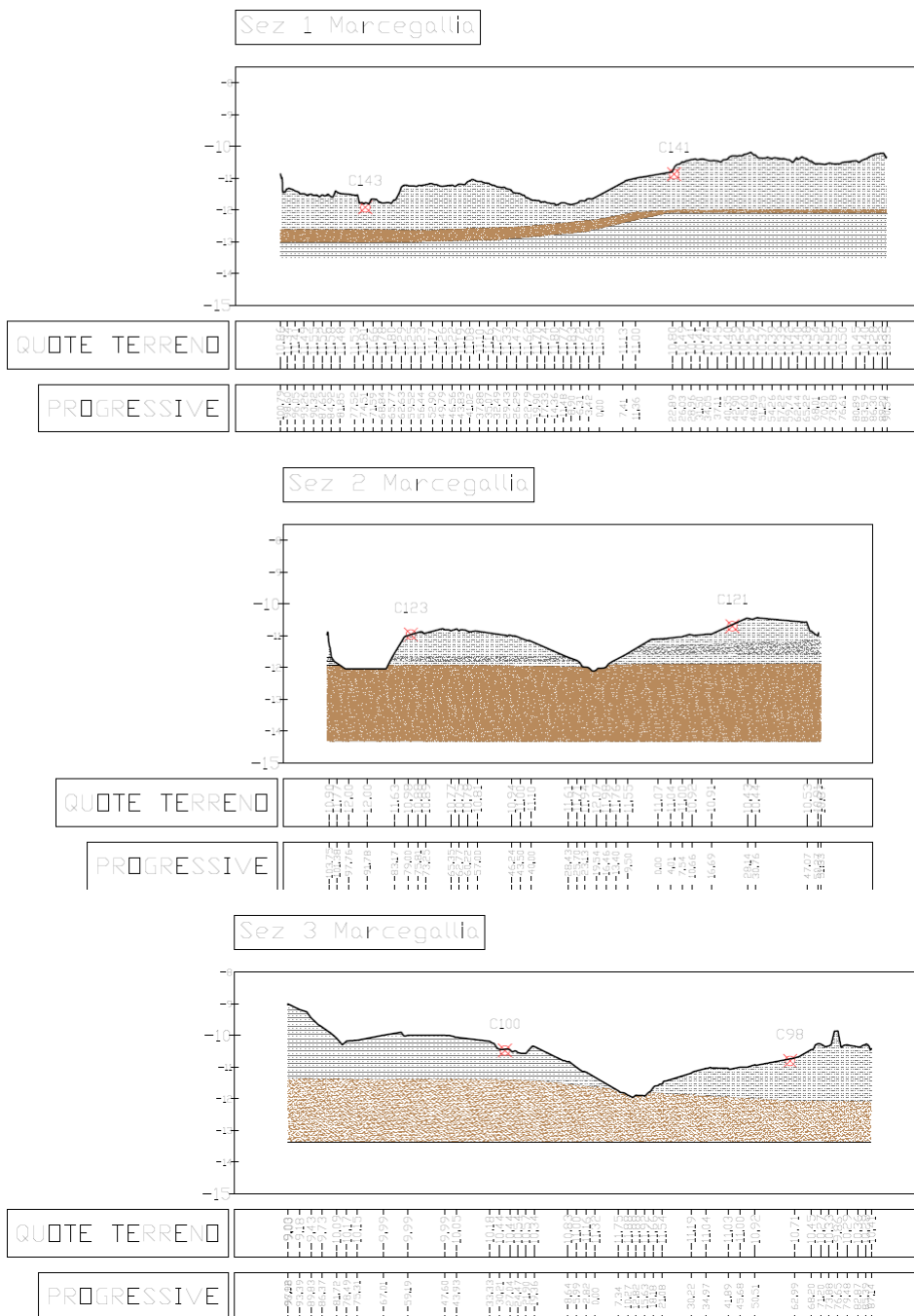
7.1.4.4 Confronto

La Tabella 4 riporta per la Zona di dragaggio 4 l'assetto stratigrafico in funzione delle informazioni derivanti dalle diverse indagini geognostiche svolte.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 indicano generalmente una riduzione della granulometria rispetto all'indagine del 2014 con prevalenza della frazione limoso - argillosa su quella limoso – sabbiosa.

Tabella 4 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 4 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico
2014	Limo sabbioso/Limo sabbioso argilloso
2019	Limo
2020/2021	Limo argilloso



LEGENDA

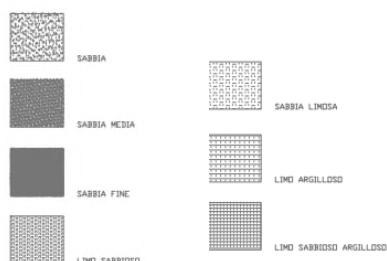


Figura 33 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5: Marcegallia – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc. rif.

[17]

7.1.5.2 Indagine 2019

La Figura 35 riporta uno stralcio del doc. rif. [21] della planimetria di ubicazione delle indagini e delle n.2 sezioni stratigrafiche (colore rosso), riportata in Figura 36, dove si nota come la granulometria prevalente sia quella limosa e sabbiosa.

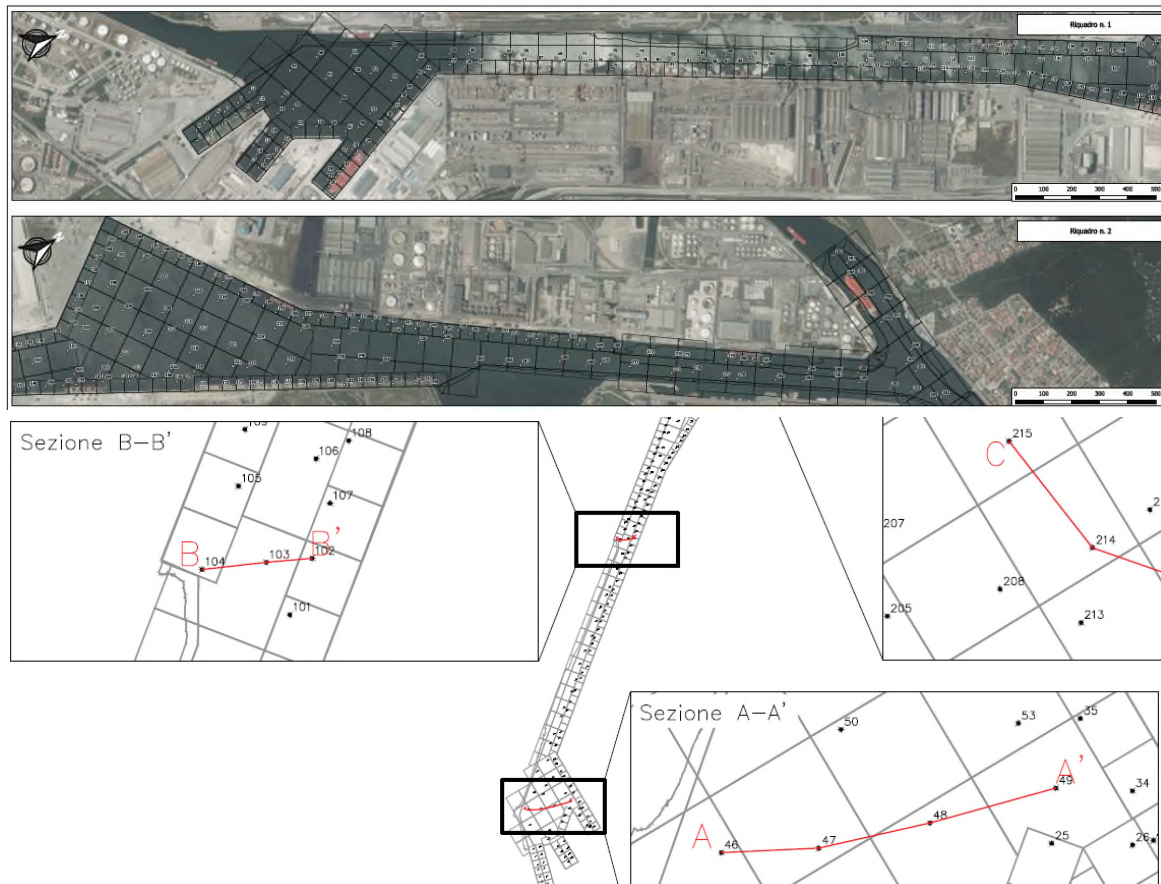


Figura 35 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle indagini e delle sezioni stratigrafiche da doc. rif. [21]

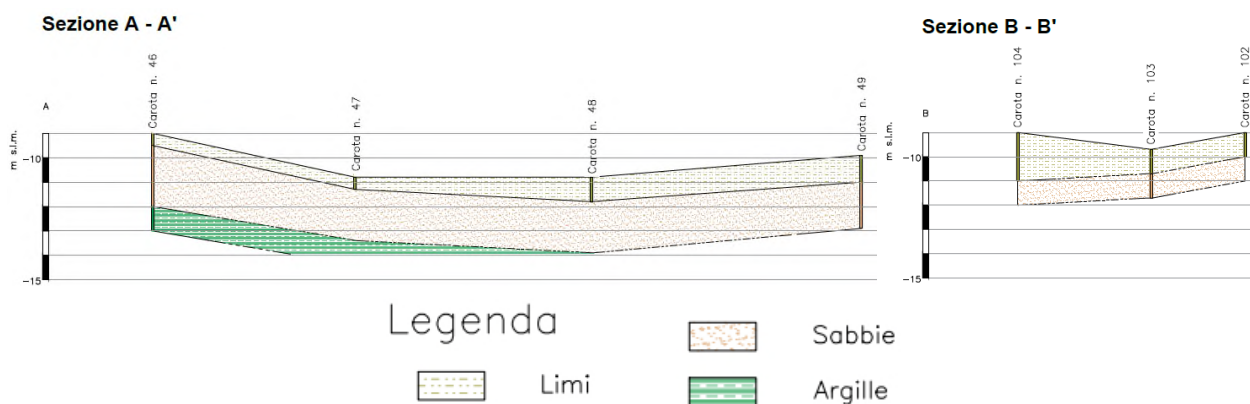


Figura 36 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche A-A' e B-B' da doc. rif.[21]

7.1.5.3 Indagine 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 37, sono presenti le verticali R1, R2 e R3 nella Zona 5 di dragaggio, caratterizzate da una granulometria limoso-argillosa.



Figura 37 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle indagini da doc. rif. [22]

7.1.5.4 Confronto

La Tabella 5 riporta per la Zona di dragaggio 5 l'assetto stratigrafico in funzione delle informazioni derivanti dalle diverse indagini geognostiche svolte.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 indicano generalmente una riduzione della granulometria rispetto all'indagine del 2014 con prevalenza della frazione limoso - argillosa su quella limoso – sabbiosa.

Tabella 5 – Assetto stratigrafico – Zona dragaggio 5 – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico
2014	Limo sabbioso/Sabbia
2019	Limo e secondariamente sabbia
2020/2021	Limo argilloso

7.2 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Il presente paragrafo riporta i risultati delle prove di laboratorio dell'indagine del 2020/2021 a supporto del Progetto Esecutivo, contenute nel doc. rif. [22]. Le prove sono state eseguite presso il laboratorio GEEG (Geotechnical and Environmental Engineering Group) start-up dell'Università di Roma la Sapienza.

Sono state eseguite n.10 verticali di indagine R1÷R10 (n.4 carote per ciascuna verticale) con prelievo di campioni disturbati in R1÷R10 e di campioni indisturbati in R1÷R8. Le prove eseguite sia sui campioni disturbati che indisturbati sono: contenuto d'acqua, distribuzione granulometrica e limiti di Atterberg, misura di resistenza non drenata cu con vane-test e fall-cone test in funzione del contenuto d'acqua. Le prove eseguite solo sui campioni disturbati sono: peso specifico dei grani e contenuto di sostanza organica, sedimentazione in colonna. Sono state quindi eseguite delle prove di compressibilità edometrica su campioni indisturbati.

7.2.1 Campioni disturbati

7.2.1.1 Prove di classificazione

I valori del contenuto d'acqua w_n sono compresi tra 45 e 82%, si veda Tabella 7, e risultano essere in funzione della presenza o meno della frazione sabbiosa. Sono tuttavia presenti dei valori molto elevati $w_n = 60 - 82\%$, che non possono dipendere solo dalla natura granulometrica dei sedimenti e dalla presenza di sostanza organica, Tabella 6, e che quindi potrebbero essere determinati anche dalla locale presenza di idrocarburi, che determinano un maggior contenuto di acqua nei sedimenti.

I limiti di Atterberg sono riportati in Tabella 8 con il limite liquido LL tra 25 e 44% e quello plastico LP tra 20 e 28%; l'indice di plasticità IP è compreso tra 5-16%. Si tratta pertanto di limi/argille di media compressibilità/plasticità.

Il contenuto d'acqua è prossimo o superiore al LL, indicando la scarsa consistenza dei sedimenti.

Il peso specifico dei grani G_s vale circa 2.7, come indicato in Tabella 9.

Tabella 6 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto di sostanza organica

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
TOC (g _c /kg _{suolo})	4.90	4.03	3.18	6.94	6.95	4.55	4.05	< 3.00	9.21	3.31

Tabella 7 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto d'acqua

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
w (%)	45.07	50.59	56.10	81.93	79.38	60.61	76.00	49.20	51.41	50.08

Tabella 8 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori dei limiti di Atterberg

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
w_L (%)	25.04	24.81	28.07	41.80	43.62	33.87	44.35	27.50	34.50	40.78
w_p (%)	-	19.93	21.41	26.20	28.62	23.14	26.44	20.40	23.59	24.22
IP (-)	-	4.88	6.66	15.60	15.00	10.73	17.91	7.10	10.91	16.56

Tabella 9 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del peso specifico dei granuli

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
γ_s (kN/m ³)	27.08	27.04	26.93	26.72	26.68	26.99	26.89	26.95	26.94	26.84

La curva granulometrica dei campioni rimaneggiati è visibile in Figura 38: si nota come la granulometria prevalente sia quella del limo argilloso con la frazione argillosa che aumenta procedendo dal Canale Candiano al Canale Marino. La frazione sabbiosa prevale su quella limosa solo per i campioni prelevati nella parte più meridionale del Canale Candiano nell'area di dragaggio denominata Zona 5.

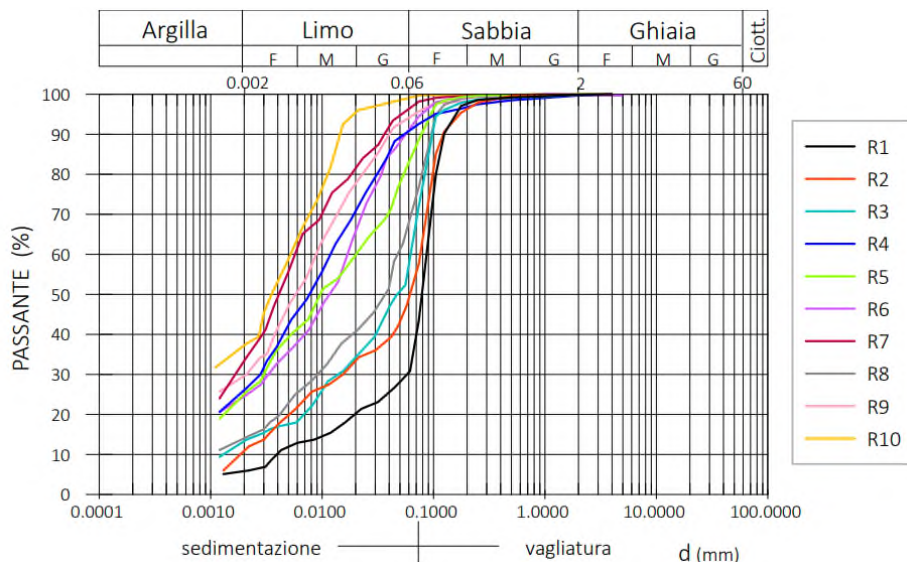


Figura 38 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Curve granulometriche

7.2.1.2 Prove di sedimentazione in colonna

Le prove sono state eseguite su n.6 campioni di terreno R3, R4, R5, R6, R7, R10, andando a misurare il livello dell'interfaccia acqua-fango, la torbidità ed i solidi sospesi totali (TSS).

La Figura 39 riporta per ciascun campione l'altezza dell'interfaccia acqua-fango in funzione del tempo: si nota un buon allineamento di tutte le curve in accordo con l'uniformità delle granulometrie ad eccezione del campione R3, caratterizzato da una frazione argillosa trascurabile.

Si nota come dopo un intervallo di tempo di 2000 ore, pari a 83 gg, la maggior parte delle curve sia caratterizzata da una interfaccia acqua-fango pari a circa 1.25 m su di una altezza iniziale della colonna di prova di 2 m, indicando che la sedimentazione non è ancora terminata.

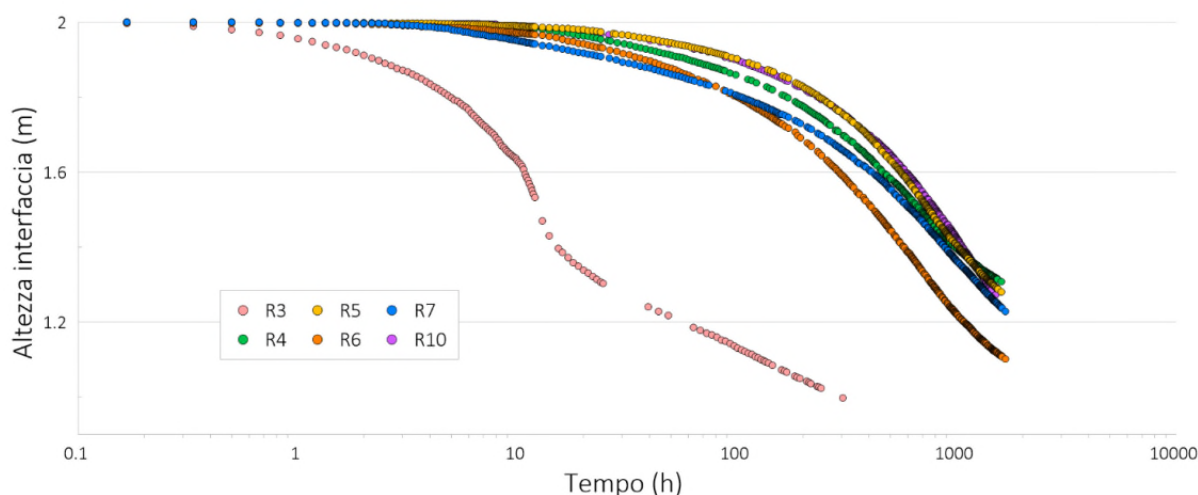


Figura 39 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Prove di sedimentazione in colonna: altezza dell'interfaccia acqua-fango in funzione del tempo

7.2.2 Campioni indisturbati

7.2.2.1 Prove di classificazione

La Tabella 10 riporta per i campioni indisturbati i contenuti d'acqua, misurati per ciascun campione in tre punti (sommità/mezzeria/fondo) per tener conto delle eterogeneità del sedimento. I valori di w_n sono sempre pari o superiori al LL, se ne deduce la scarsa consistenza dei sedimenti.

Tabella 10 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del contenuto d'acqua

misura	Campione R1			Campione R2			Campione R3			Campione R4		
	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)
1	40,22	44,20	47,37	52,76	48,19	50,86	74,28	79,48	32,12	63,24	98,94	50,58
2	38,46	47,43	44,47	44,94	50,36	61,54	76,67	74,68	33,84	81,62	98,53	50,15
3	39,14	41,05	47,39	48,21	51,76	55,67	69,74	93,79	32,85	89,07	79,04	79,09
media	39,27	44,23	46,41	48,64	50,10	56,02	73,56	82,65	32,94	77,98	92,17	59,94

misura	Campione R5			Campione R6			Campione R7			Campione R8		
	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)	w_{top} (%)	w_{center} (%)	w_{bottom} (%)
1	77,71	76,05	37,08	79,54	43,07	39,99	75,00	38,68	64,58	35,46	51,26	46,24
2	79,24	77,73	34,51	71,58	43,21	40,10	62,94	36,56	62,78	35,58	50,87	51,75
3	86,26	85,04	37,29							39,49	43,63	26,96
media	81,07	79,61	36,29	75,56	43,14	40,04	68,97	37,62	63,68	36,84	48,59	41,65

I limiti di Atterberg sono riportati in Tabella 11, dove si vede come in media LL è pari al 25-50%, LP varia tra 18 e 29% ed IP tra 9 e 24%; si tratta pertanto di limi/argille di media compressibilità/plasticità.

Tabella 11 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori dei limiti di Atterberg

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
w_L	(%)	-	27.60	15.00	47.10	50.80	32.64	48.15	30.05
w_p	(%)	-	18.34	-	27.78	28.75	19.21	24.22	19.90
IP	(-)	-	9.26	-	19.32	22.05	13.43	23.93	10.15

La curva granulometrica dei campioni è visibile in Figura 40: si nota come la granulometria prevalente è quella del limo argilloso con la frazione argillosa che aumenta procedendo dal Canale Candiano al Canale Marino.

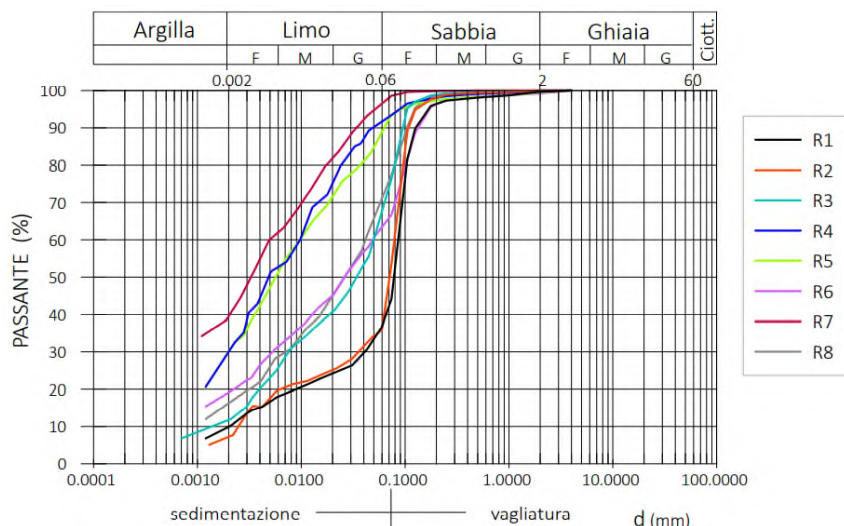


Figura 40 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Curve granulometriche

La frazione sabbiosa prevale su quella limosa solo per i campioni prelevati nella parte più meridionale del Canale Candiano all'interno della zona di dragaggio Zona 5. I risultati delle prove sui campioni indisturbati sono congruenti con quelli dei campioni disturbati.

7.2.2.2 Misura della c_u in funzione del contenuto d'acqua

Sono state eseguite sia per i campioni disturbati che per quelli indisturbati delle misure della resistenza non consolidata non drenata c_u in funzione del contenuto d'acqua tramite vane-test e fall-cone test. I risultati sono illustrati in Figura 41, dove si nota che i valori di resistenza non drenata c_u per un contenuto d'acqua tra 50 e 75%, pari a quello del sedimento in sito, sono tutti molto bassi ed inferiori a 0.2 KPa con valori minimi di 0.05-0.1 KPa, confermando la consistenza molto bassa dei sedimenti. I valori di c_u assumono dei valori significativi per un contenuto d'acqua inferiore al 30%. I risultati delle prove rapportati all'Indice di Liquidità IL confermano lo stesso comportamento e sono in linea con i dati di letteratura (Mitchell, 1976) – si veda Figura 42.

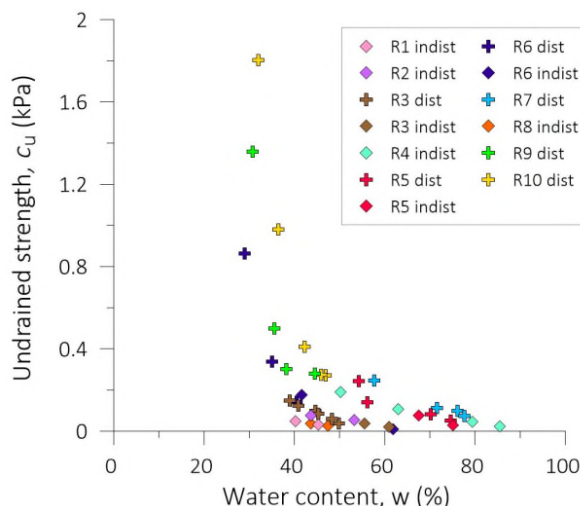


Figura 41 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata c_u in rapporto al contenuto d'acqua w

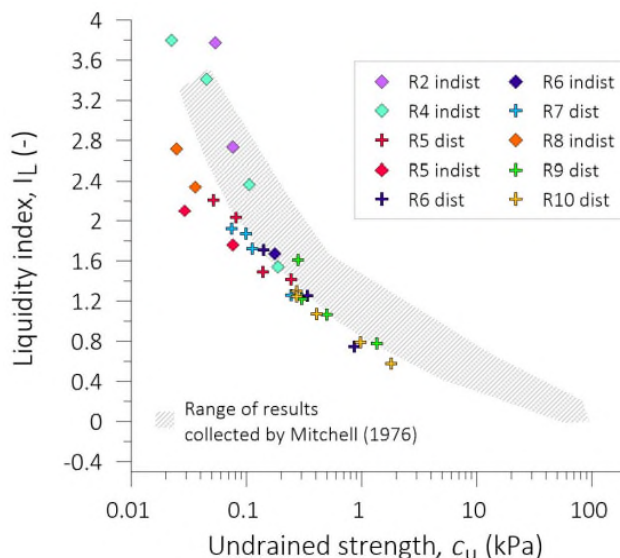


Figura 42 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata c_u in rapporto all'indice di liquidità IL

7.2.2.3 Prove di compressibilità edometrica

Sono state eseguite su alcuni campioni indisturbati (R1, R4, R5, R6, R7, R8) delle prove edometriche con un solo ciclo di carico, che hanno mostrato un comportamento molto compressibile anche a carichi molto bassi a causa dell'elevato indice dei vuoti, dovuto allo stato tensionale in sito del sedimento (si veda Figura 43).

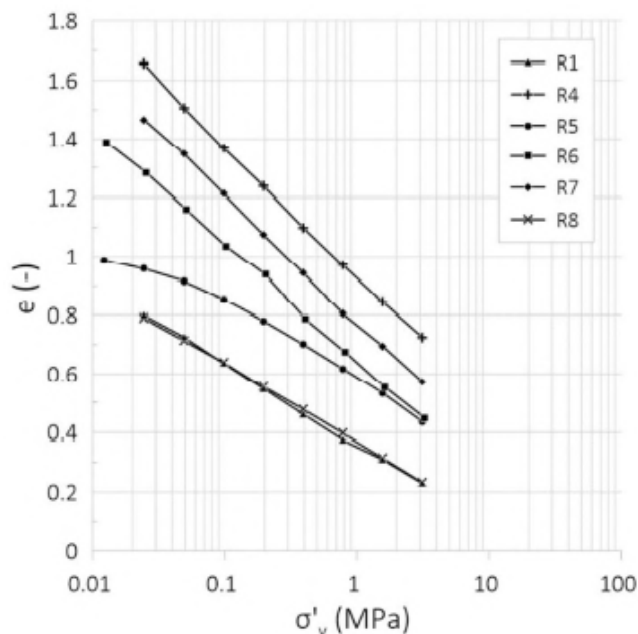


Figura 43 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Prove di compressibilità edometrica

L'indice dei vuoti e_0 varia tra 0.8 e 1.7, mentre il coefficiente di compressibilità C_c è compreso tra 0.26 e 0.42, si veda Tabella 12, a conferma della scarsa consistenza dei sedimenti.

Tabella 12 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del coefficiente di compressibilità sul ramo di carico vergine delle prove edometriche

	R1	R4	R5	R6	R7	R8
c_c (-)	0.26	0.42	0.33	0.38	0.42	0.28

7.3 MODELLO DEI FENOMENI DI SEDIMENTAZIONE

Il presente paragrafo riporta i risultati dell'attività di modellazione, condotta dalla E&G s.r.l., del comportamento dei sedimenti collocati nelle casse di colmata temporanee a seguito del loro dragaggio con draga idraulica tipo TSHD secondo le indicazioni del Progetto Definitivo.

7.3.1 Cenni teorici

Il modello della consolidazione a grandi deformazioni adottato è quello di T. Vergote e P. Mengé, 2015 "*Application of large strain consolidation theory in soft soil reclamation*".

La consolidazione di un fango sotto il proprio peso deve tener conto che le tensioni verticali totali dipendono dalla densità iniziale e corrispondono alla pressione della miscela.

La tensione verticale efficace è nulla all'inizio del processo e la sovrappressione interstiziale è massima e pari alla tensione verticale efficace finale.

Il modello tiene conto delle condizioni fisiche descritte, facendo variare la compressibilità e la permeabilità durante il processo di consolidazione.

Il modello CS2 adottato permette di suddividere il terreno in sotto-livelli, all'interno dei quali l'indice dei vuoti, la tensione verticale efficace, la permeabilità, la sovrappressione interstiziale e la densità vengono calcolati in ogni istante del processo di consolidazione.

Il modello adotta due relazioni costitutive per la variazione della permeabilità k e dell'indice dei vuoti e_0 quindi della compressibilità.

7.3.2 Calibrazione del modello

Dal momento che non è possibile misurare la variazione di k ed e_0 con una prova di sedimentazione in colonna, i valori dei due parametri devono essere ricavati indirettamente tramite una procedura di best-fitting delle prove sperimentali.

Le correlazioni che descrivono la variazione di k ed e_0 durante la consolidazione possiedono dei coefficienti empirici, che vengono modificati fino a quando la simulazione delle prove di sedimentazione approssimi il più possibile i risultati sperimentali.

La calibrazione del modello tiene conto anche delle prove di compressibilità edometrica, che permettono la misura dell'indice dei vuoti e della permeabilità in funzione dello stato tensionale.

Per simulare le prove di sedimentazione, è stato costruito un modello con caratteristiche analoghe ovvero una colonna alta 2 m e riempita da una miscela avente densità di 1.25 t/m^3 .

La calibrazione del modello è avvenuta usando tutte le prove effettuate, a titolo esemplificativo si riporta in Figura 44 quanto ottenuto per il campione R6 in termini di:

- variazione nel tempo dell'interfaccia acqua-fango;
- variazione nel tempo della densità media;
- variazione dell'indice dei vuoti con la tensione efficace;
- variazione della permeabilità con l'indice dei vuoti.

Si rimanda allo studio della E&G s.r.l. per un maggior dettaglio in merito ai valori assunti per i parametri empirici delle leggi di variazione di k ed e_0 .

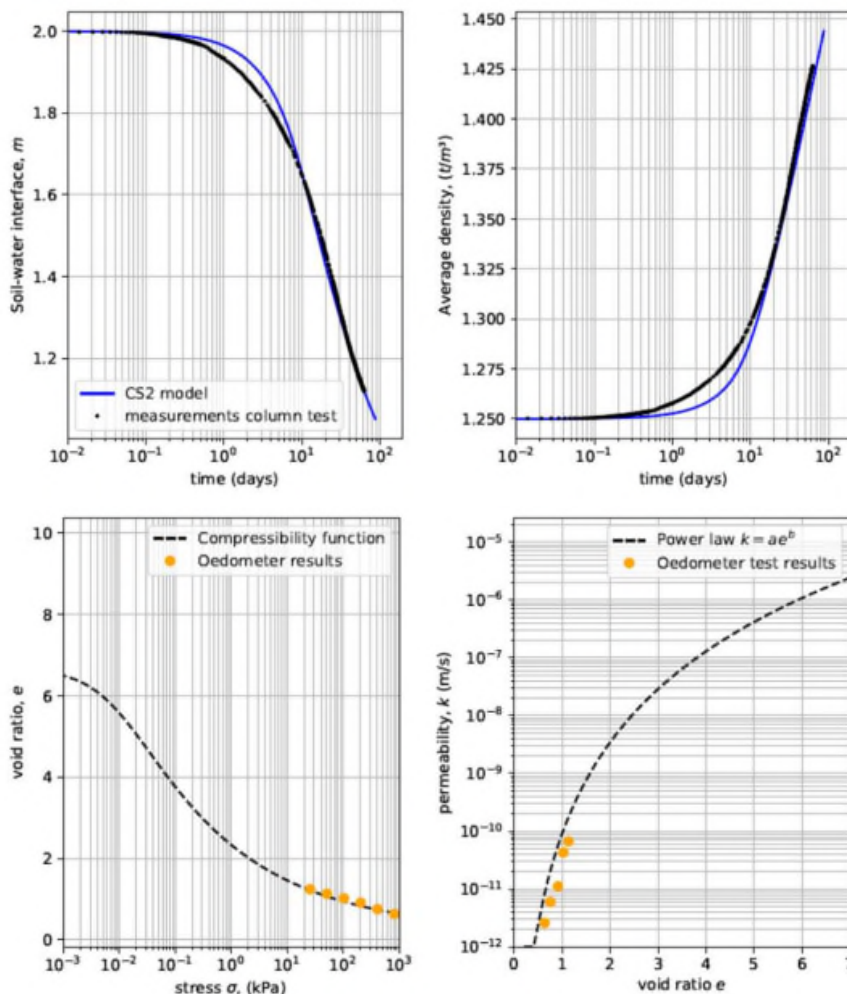


Figura 44 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Calibrazione modello CS2 sulla base dei risultati delle prove sperimentali sul campione R6

7.3.3 Risultati del modello

Il modello, una volta calibrato, è stato usato per simulare il riempimento della cassa NADEP con materiale dragato idraulicamente.

Si considera come fase iniziale del modello una colonna di terreno di altezza H in fase di consolidazione sotto il peso proprio (condizione analoga alla prova di sedimentazione in colonna), che rappresenta il terreno inizialmente sversato dentro la cassa, alla quale si aggiungono strati successivi di terreno in testa alla colonna in funzione della produzione della draga.

La simulazione ha considerato per la cassa NADEP una volumetria di circa 1.200.000 m³, che può essere riempita in circa 40gg impiegando una draga TSHD.

Si è assunto che l'unico contorno drenante nel modello sia quello superiore in quanto la cassa NADEP non presenta uno strato drenante di base, come indicato nel Progetto Definitivo.

La Figura 45 mostra la variazione dell'altezza del riempimento nel tempo con un consolidamento di circa 2-3 m in un periodo di 2000 giorni.

Il modello indica che dopo 3 mesi dalla fine del refluito idraulico il BF è di 2.25, mentre dopo 2000 giorni (durata simulata nelle analisi) raggiunge valori di 1.25-1.5 per i campioni limoso-argillosi (Zone di dragaggio 2, 3 e 4) e di 1.15 (Zona di dragaggio 5) per il campione limoso-sabbioso R3.

Questi valori devono essere considerati come indicativi di un sedimento fine, che, se dragato con draga idraulica, è caratterizzato da tempi di consolidazione molto lunghi e superiori a quanto assunto nel Progetto Definitivo a base di gara, dove con la stessa tecnologia di dragaggio si assume un B.F. di 0.8 dopo 3 mesi dalla fine del refluento idraulico in cassa di colmata.

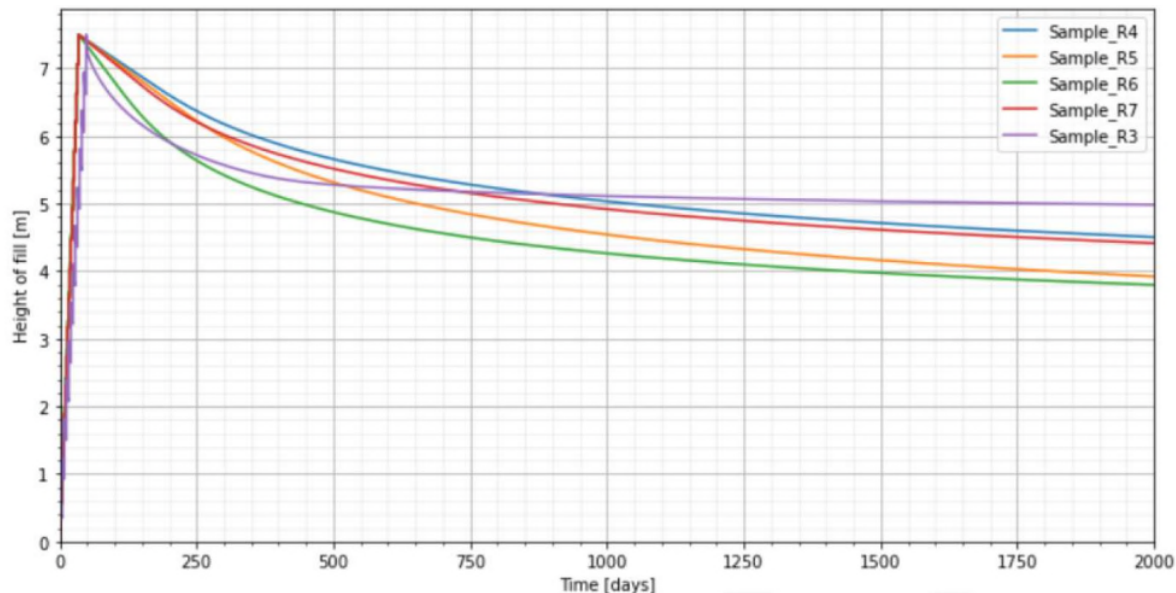


Figura 45 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione dell'altezza del riempimento nel tempo nella cassa NADEP

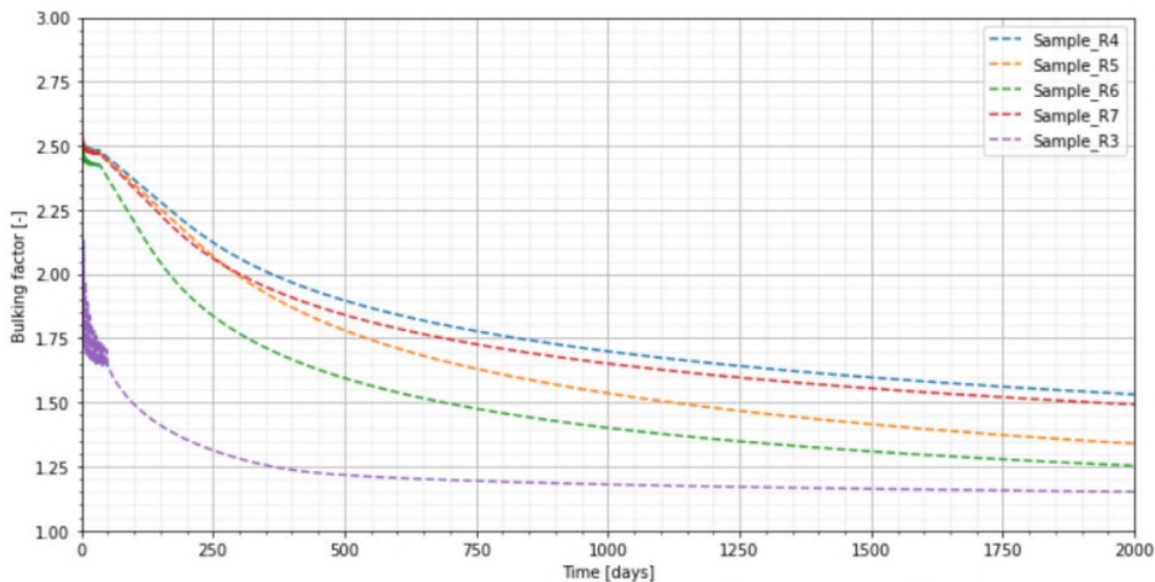


Figura 46 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione del Bulking Factor nella cassa NADEP

8 AREE LOGISTICHE

8.1 ASSETTO STRATIGRAFICO E CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

L'interpretazione unitaria di tutte le indagini svolte ha permesso di definire un quadro generale uniforme nell'intera area di progetto Ravenna HUB. L'assetto stratigrafico delle aree logistiche è stato confermato dalla interpretazione dei sondaggi e delle prove penetrometriche i cui risultati sono stati estesi con gli stendimenti di geoelettrica. Le unità stratigrafico – geotecniche individuate sono elencate di seguito dall'alto verso il basso della sequenza a partire dal piano campagna:

- unità R: terreni di riporto
- unità P: depositi di palude salmastra
- unità S: sabbie fini di cordone litorale
- unità M: depositi di prodelta
- unità T: strati sabbiosi trasgressivi
- unità A: depositi di piana alluvionale

8.1.1 Area logistica S3

L'assetto stratigrafico dell'area S3 è riportato in Tabella 13: come si evince l'area presenta l'unità S in condizioni di affioramento/subaffioramento con la mancanza dell'unità P e la presenza discontinua di un sottile strato di riporto. Lo spessore medio dell'unità S è pertanto pari a 12 m, l'unità M si trova al di sotto di -12 m slm.

Tabella 13 – Area logistica S3 – Stratigrafia media Comparto Nord e Sud

Terreno	Z _{in} [m s.l.m.]	Z _{fin} [m s.l.m.]	Spessore [m]
Unità R	+0.5	+0.0	0.5
Unità S	+0.0	-12.0	12.0
Unità M	-12.0	-22.0	10.0

La caratterizzazione geotecnica è riportata nella Tabella 14.

Tabella 14 – Area logistica S3 – Modello geotecnico Comparto Nord e Sud

Unità	Tipologia Terreno	da [m s.l.m.]	a [m s.l.m.]	γ/γ' [kN/m ³]	ν [-]	OCR [-]	e_0 [-]	C _c [-]	C _R [-]	c_v [m ² /s]	D _R [%]	ϕ'_k [°]	c'_k [kPa]	$c_{u,k}$ [kPa]	V _s [m/s]	G ₀ [MPa]	r [-]	M [MPa]
R	Incoerente	0,5	0	19/9	0,25	-	-	-	-	-	-	30	-	-	125	30	2	10
S	Incoerente	0	-12	20/10	0,25	-	-	-	-	-	40	34	-	-	160	47	2	15
M	Coesivo	-12	-19	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	2,0E-07	-	29	5	30	175	62	4	6
M	Coesivo	-19	-25	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	4,0E-07	-	30	5	45	225	95	4	8

8.1.2 Aree logistiche L1/L2

L'assetto stratigrafico dell'area L1/L2 è riportato in Tabella 15 e Tabella 16 rispettivamente per il comparto Nord e Sud.

La successione stratigrafica è infatti variabile: nella zona Nord al di sotto dello strato superficiale (Unità R), che assume uno spessore pari a circa 0.5 ÷ 1.0 m, il banco di sabbia (Unità S) è coperto da circa 3.0 m di depositi palustri ed alluvionali (Unità P); nella zona Sud lo strato sabbioso è coperto da circa 5.0 m di terreni

incoerenti costituiti da sabbie fini e sabbie limose compatte appartenenti a depositi di canale, argine o rotta fluviale (considerati appartenenti all' Unità S). Al di sotto del banco sabbioso si incontrano i depositi di prodelta (unità M) a partire da -15 m slm.

Tabella 15 – Area logistica L1/L2 – Stratigrafia media comparto Nord

Terreno	Z _{in} [m s.l.m.]	Z _{fin} [m s.l.m.]	Spessore [m]
Unità R	+1.0	+0.0	1.0
Unità P	+0.0	-3.0	3.0
Unità S	-3.0	-15.0	12.0
Unità M	-15.0	-23.0	8.0

Tabella 16 – Area logistica L1/L2 – Stratigrafia media comparto Sud

Terreno	Z _{in} [m s.l.m.]	Z _{fin} [m s.l.m.]	Spessore [m]
Unità R	+1.0	+0.0	1.0
Unità S	+0.0	-5.0	5.0
Unità S	-5.0	-15.0	10.0
Unità M	-15.0	-23.0	8.0

La caratterizzazione geotecnica è riportata nelle Tabella 17 e Tabella 18 per i comparti Nord e Sud.

Tabella 17 – Area logistica L1/L2 – Modello geotecnico Comparto Nord

Unità	Tipologia Terreno	da [m s.l.m.]	a [m s.l.m.]	γ/γ' [kN/m ³]	ν [-]	OCR [-]	e_0 [-]	C _c [-]	C _R [-]	c_v [m ² /s]	D _R [%]	ϕ'_k [°]	c'_k [kPa]	$c_{u,k}$ [kPa]	V _s [m/s]	G ₀ [MPa]	r [-]	M [MPa]
R	Incoerente	1	0	19/9	0,25	-	-	-	-	-	-	32	-	-	140	38	2	15
P	Coesivo	0	-3	18/8	0,30	1	-	-	-	-	-	28	2,5	25	150	41	4	5
S	Incoerente	-3	-15	20/10	0,25	-	-	-	-	-	40	34	-	-	160	52	2	15
M	Coesivo	-15	-19	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	2,0E-07	-	29	5	30	175	58	4	6
M	Coesivo	-19	-25	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	4,0E-07	-	30	5	45	225	95	4	8

Tabella 18 – Area logistica L1/L2 – Modello geotecnico Comparto Sud

Unità	Tipologia Terreno	da [m s.l.m.]	a [m s.l.m.]	γ/γ' [kN/m ³]	ν [-]	OCR [-]	e_0 [-]	C _c [-]	C _R [-]	c_v [m ² /s]	D _R [%]	ϕ'_k [°]	c'_k [kPa]	$c_{u,k}$ [kPa]	V _s [m/s]	G ₀ [MPa]	r [-]	M [MPa]
R	Incoerente	1	0	19/9	0,25	-	-	-	-	-	-	32	-	-	140	38	2	15
S	Incoerente	0	-5	20/10	0,25	-	-	-	-	-	40	34	-	-	160	47	2	15
S	Incoerente	-5	-15	20/10	0,25	-	-	-	-	-	40	34	-	-	160	52	2	15
M	Coesivo	-15	-19	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	2,0E-07	-	29	5	30	175	58	4	6
M	Coesivo	-19	-25	18,5/8,5	0,30	1	0,95	0,16	0,04	4,0E-07	-	30	5	45	225	95	4	8

8.2 LETTURE DI FALDA

Il piezometro S13Pz è ubicato nell'area logistica S3, mentre S14Pz si trova nell'area L2 ed è di riferimento anche per L1. Le quote di scavo di progetto delle aree logistiche sono pari a:

- S3 comparto N: comparti principali -1,7 m slm e comparti secondari -0,8 m slm
- S3 comparto S: comparti principali -0,94 m slm e comparti secondari -0,8 m slm
- L2: comparti principali -1,7 m slm e comparti secondari -0,0 m slm

Le letture di falda eseguite fino ad oggi sono inferiori rispetto alle quote di scavo suddette (si veda Figura 47); la soggiacenza misurata della falda è influenzata dalla rete dei canali scolmatori e dall'azione delle idrovore.

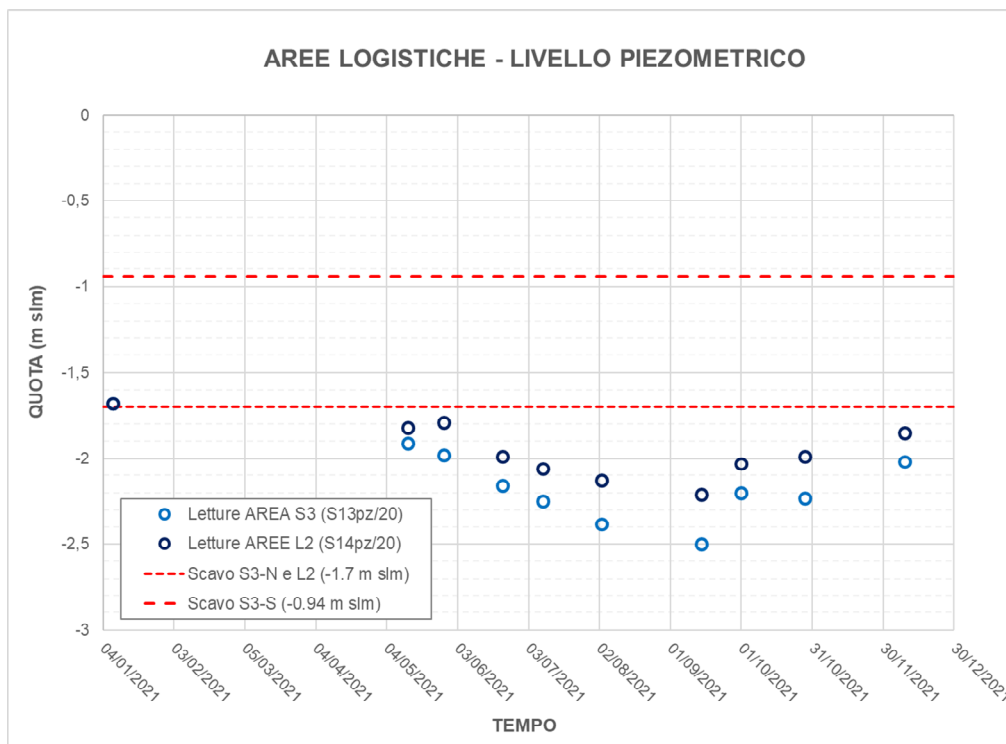


Figura 47 – Aree logistiche – Misure di falda nei piezometri S13Pz (area S3) e S14Pz (area L2)

La Tabella 19 mostra per i piezometri S13Pz e S14Pz i valori delle n.10 letture di Progetto Esecutivo fatte dal 08/01/2021 al 09/12/2021 nell'arco dell'intero ciclo meteorologico.

Tabella 19 – Area logistica L2 – Modello geotecnico Comparto Sud

Opera	Sond. (n.)	08/01/2021	13/05/2021	28/05/2021	22/06/2021	09/07/2021	03/08/2021	14/09/2021	01/10/2021	28/10/2021	09/12/2021
		quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)	quota (m slm)
S3	S13pz/20	-1,68	-1,91	-1,98	-2,16	-2,25	-2,38	-2,5	-2,2	-2,23	-2,02
L2	S14pz/20	-1,68	-1,82	-1,79	-1,99	-2,06	-2,13	-2,21	-2,03	-1,99	-1,85

8.3 CEDIMENTI ATTESI

A seguito dell'accumulo del materiale dragato nelle aree logistiche S3 e L2 ci sarà un cedimento dei terreni naturali di fondazione, che deve essere stimato, al fine di verificare i volumi complessivi di materiale che può essere conferito nelle aree logistiche. Il cedimento è calcolato con i moduli edometrici dei terreni di fondazione e considerando una altezza dei rilevati di $H = 2,5$ m ed un peso di volume del materiale conferito di $\gamma = 17$ KN/m³. La correlazione è quella della teoria della elasticità:

$$s = q \times H / M \quad (\text{m})$$

s: cedimento (m)

q: carico applicato (KPa)

H: spessore dello strato che cede

M: modulo edometrico terreno di fondazione (KPa)

Lo spessore medio dell'unità S è di 12 m ed $M = 15.000$ (KPa), pertanto il suo cedimento è:

$$s = ((2,5 \times 17) \times 12) / 15.000 = 0.034 \text{ (m)}$$

Lo spessore medio dell'unità P è di 3 m, dove presente, ed $M = 5.000$ (KPa), pertanto il suo cedimento è:

$$s = ((2,5 \times 17) \times 3) / 5.000 = 0.025 \text{ (m)}$$

Lo spessore medio dell'unità M superiore è di 5 m ed $M = 6.000$ (KPa), pertanto il suo cedimento è:

$$s = ((2,5 \times 17) \times 5) / 6.000 = 0.035 \text{ (m)}$$

Lo spessore medio dell'unità M inferiore, che concorre al cedimento, è di 10 m ed $M = 8.000$ (KPa), pertanto il suo cedimento è:

$$s = ((2,5 \times 17) \times 10) / 8.000 = 0.053 \text{ (m)}$$

Il cedimento totale è dunque pari a $s_{\text{tot}} = 0.15$ m.

9 BULKING FACTOR DI PROGETTO

Le indagini geotecniche integrative eseguite propedeuticamente al Progetto Esecutivo hanno permesso di meglio valutare le proprietà geotecniche dei sedimenti da dragare sulla base anche di una specifica sperimentazione di laboratorio, come discusso al capitolo di riferimento.

Le indagini di supporto al Progetto Definitivo, infatti, pur essendo in numero maggiore, non forniscono le informazioni necessarie per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti, in quanto finalizzate prevalentemente a valutare le analisi granulometriche dei sedimenti stessi e solo in alcuni casi è stato determinato anche il contenuto d'acqua w_n in sito.

In particolare, si è riscontrato che i sedimenti da dragare, rispetto a quelli dragati in precedenza e posti nelle casse NADEP e Centro Direzionale, possiedono una granulometria più fine, passando da terreni a matrice limoso-sabbiosa a terreni a matrice limoso-argillosa.

Pertanto, sulla base di tali caratteristiche geotecniche e della suddetta sperimentazione di laboratorio, che ha correlato i tempi di consolidazione dei sedimenti post dragaggio con le diverse metodologie di dragaggio di tipo idraulico e/o meccanico, in sede di Progetto Esecutivo sono stati definiti dei valori diversi di bulking factors. Il bulking factor B.F. (fattore di rigonfiamento) esprime il rapporto volumetrico tra il sedimento in sito e quello a seguito di dragaggio e refluitamento.

Tale fattore varia durante il processo di dragaggio, di refluitamento e di messa a destinazione del materiale, in relazione alle modalità esecutive e a come queste inducono una variazione del contenuto d'acqua nel sito di riutilizzo.

Ne deriva che il B.F. dipende dal contenuto d'acqua (w_n), che influisce sulla porosità e quindi sul peso di volume, ovvero maggiore è il contenuto d'acqua del sedimento e minore sarà il suo peso di volume.

Se si considerano i dati della indagine di Progetto Esecutivo del 2020-2021, si ha che il terreno in sito ha un contenuto d'acqua medio pari a $w_n = 60\%$ (media di tutti i valori di w_n), che rappresenta la condizione di partenza con B.F. = 1.0.

In base alle suddette caratteristiche si è valutato più opportuno attuare un dragaggio prevalentemente di tipo meccanico, al fine di non incrementare il contenuto d'acqua, riducendo notevolmente i volumi di sedimento ed acqua da trasportare e gestire nei siti di riutilizzo.

In dettaglio, il materiale dragato con benna avrà un lieve incremento del contenuto d'acqua, che porterà inizialmente il B.F. a circa 1.1 ma che si ridurrà nuovamente a 1 a seguito della movimentazione del materiale in banchina dapprima all'interno delle vasche di deposito intermedio e successivamente nelle aree logistiche ed in cava "La Bosca".

Nelle aree logistiche la riduzione di B.F. avverrà per azione sia della evapotraspirazione, facilitata da una consistente movimentazione del materiale, che della consolidazione per peso proprio.

In cava "La Bosca" la riduzione avverrà per la sola consolidazione per peso proprio, visto che in questo caso il materiale verrà interamente depositato sottofalda a ripristino della conformazione morfologica del sito utilizzato per estrazione di inerti.

La riduzione di B.F. sarà maggiore in cava "La Bosca" rispetto alle aree logistiche, in quanto lo spessore di sedimento accumulato è pari a 15 m (sotto falda) in cava anziché i 2-3 m delle logistiche e tale da determinare uno stato tensionale che mediamente sarà superiore di 6-7 volte quello in sito del terreno naturale sul fondale.

Ne deriva che, sulla base delle indagini integrative eseguite e di esperienze simili con sedimenti con caratteristiche analoghe, nel Progetto Esecutivo sono stati assunti i seguenti valori di B.F. nei siti di riutilizzo:

- 0.875 per le aree logistiche: ovvero 1 m³ di materiale in sito, prima del dragaggio, viene convertito in 0.875 m³ a destinazione;

- 0.85 per cava "La Bosca": ovvero 1 m³ di materiale in sito, prima del dragaggio, viene convertito in 0.85 m³ a destinazione.

È bene specificare che questi valori derivano dall'assunzione che B.F. = 1 con $w_n = 60\%$, pertanto, vista la variabilità dei valori di w_n , che raggiungono anche valori del 70%, i valori finali effettivi di B.F. dovranno essere

oggetto di controllo durante i lavori di dragaggio in rapporto ai reali contenuti d'acqua del sedimento nelle diverse aree di dragaggio, tramite un costante controllo del bilancio di massa tra il volume dragato e quello trasportato e posto in opera.

In particolare, la variabilità dei valori di w_n deriva dalla condizione particolare del sedimento che, essendo prossimo al fondale, è soggetto all'azione di rimobilizzazione continua da parte delle correnti e delle navi in transito nei canali navigabili, che determina valori di w_n variabili ed elevati.

Si evidenzia che nel 2014 i valori di w_n sono sensibilmente inferiori a quelli rilevati nell'indagine del 2020-2021 e mediamente compresi tra 30-40%.

Peraltro, tali valori sono abbinati ad una granulometria decisamente più grossolana del sedimento, come discusso in precedenza, infatti l'indagine del 2014 descrive i sedimenti da dragare come dei limi sabbiosi/sabbie limose, mentre le indagini del 2020-2021 come dei limi argillosi/limi argilloso sabbiosi.

La riduzione della granulometria è confermata anche dalle indagini svolte all'interno delle casse di colmata Nadep e Centro Direzionale, dove il materiale è di fatto un limo argilloso/limo argilloso sabbioso con delle lenti/livelli di sabbie limose.

I sedimenti sono stati depositati all'interno delle casse da più di 5 anni, pertanto la consolidazione per peso proprio del sedimento stesso è di fatto avvenuta. Il contenuto d'acqua è risultato essere compreso nella maggior parte dei casi tra 40-50% con valori inferiori per i livelli sabbioso limosi. Questi valori sono compresi tra il limite plastico e quello liquido a conferma dell'avvenuta consolidazione e risultano essere inferiori rispetto ai valori di w_n del sedimento da indagine 2020-2021 ma superiori ai valori di w_n dell'indagine 2014.

Quanto detto ha portato a considerare per il B.F. iniziale = 1 i valori di w_n derivanti dalla indagine del 2020-2021 e non quelli dell'indagine del 2014.

10 CONSIDERAZIONI GENERALI DI PROGETTO

10.1 SCARPATE DI DRAGAGGIO

Le scarpate di dragaggio di Progetto Esecutivo hanno una pendenza 4/1 (orizzontale/verticale), che ne assicura la stabilità sia in condizioni statiche che sismiche in rapporto alle caratteristiche dei sedimenti da dragare. Le profondità medie di dragaggio variano fra 1 e 2 m (Zona 1, 3 e 5) ed nelle Zone 2 e 4 intorno a 1.5 – 2 m nella porzione centrale e di 3 – 4 m presso in corrispondenza delle scarpate di dragaggio; pertanto l'altezza massima di dragaggio sarà pari a circa 4-4.5 m e non sono previste banche intermedie.

10.2 STABILITÀ DELLE BANCHINE ESISTENTI

Il documento di Progetto Definitivo "1114.DRA.B_Rev.1 - Relazione sul dragaggio ed interferenze con banchinamenti" riporta la verifica della interazione tra le banchine esistenti e le scarpate di dragaggio secondo un criterio geometrico.

Definito il volume significativo antistante le paratie tirantate delle banchine esistenti come il volume del cuneo passivo o il volume all'interno del quale ricade una possibile superficie di scivolamento, il Progetto Definitivo ha verificato la presenza o meno delle scarpate di dragaggio all'interno di tale volume significativo, andando a confrontare la quota di dragaggio di progetto con quella del fondale di calcolo delle banchine esistenti.

Sulla base del suddetto criterio sono presenti due situazioni distinte:

1. La distanza tra la banchina e le scarpate di dragaggio è sufficiente per escludere un effetto sulle strutture di banchina;
2. La distanza tra la banchina e le scarpate di dragaggio non è sufficiente per escludere l'interferenza, pertanto è necessario:
 - esaminare la nuova configurazione del fondale prospiciente la banchina in relazione alle configurazioni di calcolo e di collaudo dell'opera;
 - valutare eventuali interventi a tutela dell'opera esistente.

Il Progetto Definitivo ha verificato le condizioni più critiche in relazione sia alla consistenza dei banchinamenti che alla distanza tra l'escavo di progetto e le banchine esistenti, arrivando a definire le seguenti sezioni:

- n.10 sezioni nel tratto tra le banchine YARA ed IFA;
- n.13 sezioni nel tratto tra le banchine ENEL e MOLI GUARDIANI;
- n.4 sezioni nel tratto del canale BAIONA.

L'analisi ha portato a classificare le banchine esistenti in n.3 casi:

- caso A: banchine per le quali l'effetto dello scavo può essere ritenuto trascurabile (ad esempio, per la grande distanza dell'escavo del canale dalla banchina o per la piccola entità dell'escavo);
- caso B: banchine per le quali l'escavo modifica significativamente la configurazione attuale conducendo:
 - B1 ad una configurazione del fondale uguale o del tutto confrontabile a quella di progetto, per banchine collaudate di recente;
 - B2 ad una configurazione più gravosa dello stato attuale, ma significativamente inferiore a quella per la quale l'opera è stata originariamente progettata e collaudata, per banchine realizzate da lungo tempo;
 - B3 ad una configurazione più gravosa dello stato attuale e uguale o del tutto confrontabile con quella per la quale l'opera è stata originariamente progettata e collaudata, per banchine realizzate da lungo tempo;
- caso C: banchine per le quali l'escavo del canale modifica la configurazione attuale e conduce ad una configurazione più gravosa di quella del progetto originale e di collaudo dell'opera.

Per le banchine rientranti nel caso A non si prevede l'esecuzione di alcun intervento collegato all'escavo. Una fattispecie particolare di caso A, definita A1, si verifica quando le banchine risultano avere già oggi un fondale

superiore a quello richiesto dall'escavo e contemporaneamente risulta che tale fondale è anche superiore al fondale di progetto: si tratta di banchine che hanno subito uno scalzamento e che necessiterebbero se mai di un intervento per ripristinare la geometria prevista.

Per le banchine rientranti nel caso B si tratta sostanzialmente di eseguire l'escavo (o una parte dell'escavo) per cui erano state progettate. Pertanto l'intervento può essere visto come un completamento del progetto originale. È di fatto un caso usuale dato che l'escavo viene spesso commissionato separatamente dal lavoro di costruzione dell'opera, mentre il collaudo è conseguito realizzando un escavo parziale o una "fossa" in un'area di lunghezza limitata. Quando l'escavo avviene a distanza di molto tempo dal collaudo della banchina (situazione non prevista dalla normativa attuale), si ritiene ragionevole procedere ad una indagine conoscitiva sullo stato di consistenza delle opere per escludere situazioni di degrado delle strutture e dei materiali o stati di corrosione significativi delle componenti metalliche. Se l'indagine conoscitiva ha esito positivo si ritiene possibile procedere all'escavo controllando che l'evoluzione degli spostamenti della trave di banchina, dell'inflessione dei palancolati e del tiro agli ancoraggi sia compatibile con le previsioni di progetto per l'opera in esame. In sostanza si tratta di compiere un procedimento analogo a quello svolto per il collaudo dell'opera. Nel sottocaso B1 si prevede la sola esecuzione di monitoraggio dell'opera, nei casi B2 e B3 si gradueranno indagini sullo stato di consistenza dell'opera oltre al monitoraggio della risposta allo scavo.

Per le banchine rientranti nel caso C, l'escavo altera l'equilibrio della banchina esistente sia rispetto al suo stato attuale sia rispetto al suo stato di progetto, pertanto si ravvisano due possibili approcci:

- l'implementazione di un intervento di adeguamento alla nuova configurazione;
- la messa in campo di un intervento di protezione dell'opera così da consentire l'escavo del canale con effetti trascurabili sulla banchina; in tal caso ci si riconduce alla fattispecie A.

Si rimanda all'elaborato di Progetto Definitivo "1114.DRA.B_Rev.1 - Relazione sul dragaggio ed interferenze con banchinamenti" per la classificazione delle banchine esistenti nei casi A, B e C.

Le uniche banchine che non sono state verificate dal Progetto Definitivo sono quelle del settore meridionale della Zona 5 di dragaggio, evidenziate in azzurro nella Figura 48, per le quali sono state tracciate le due sezioni in blu, verificate secondo il criterio di Progetto Definitivo, adottando delle strutture di banchina analoghe a quelle della sezione n.3 IFA (0+400).

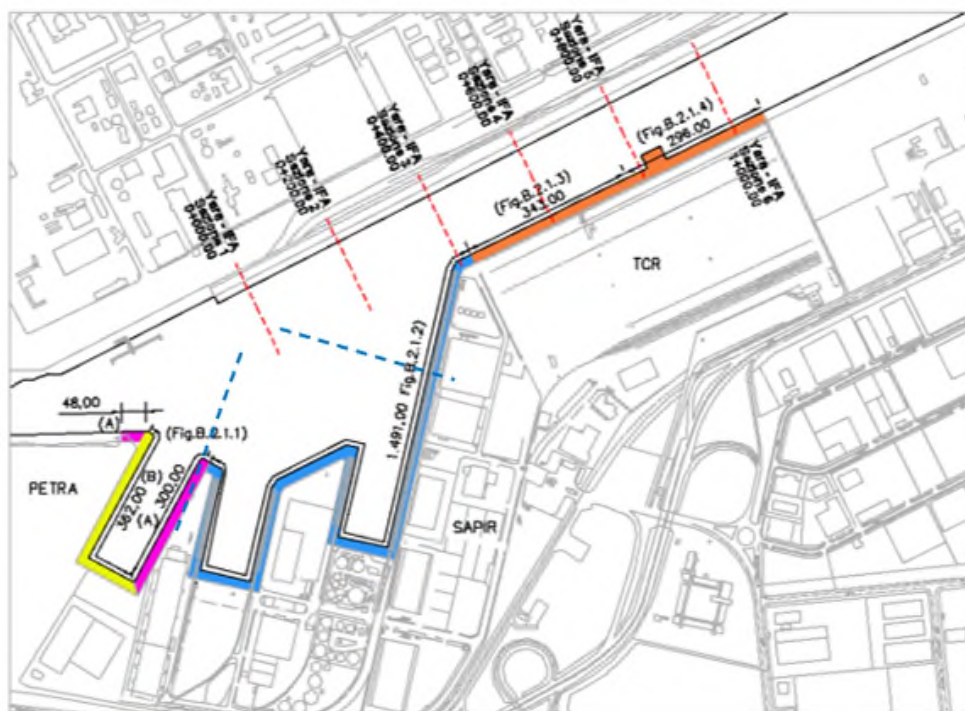
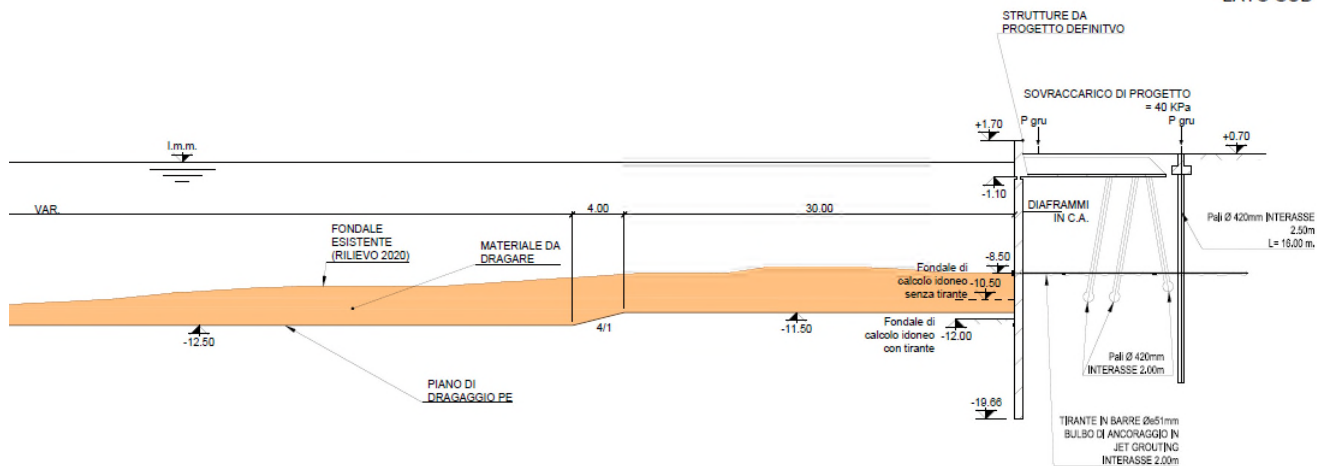


Figura 48 – Considerazioni generali di progetto – Stabilità delle banchine esistenti

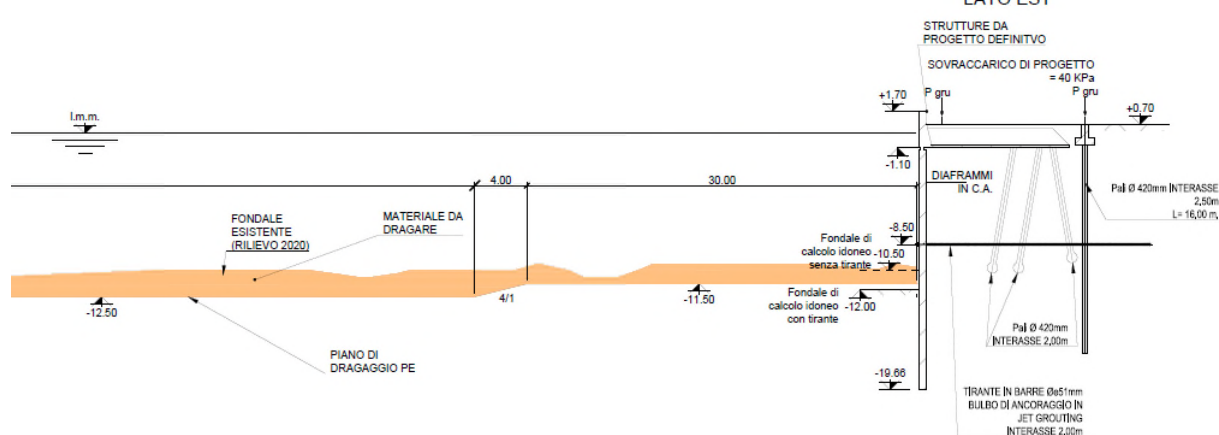
Le sezioni sono riportate in Figura 49: la quota di dragaggio è -11.5 m slm, mentre quella di calcolo delle banchine con tirante è superiore e pari alla -12 m slm, pertanto queste banchine ricadono, secondo il criterio di Progetto Definitivo, nel caso B3, trattandosi di banchine realizzate da lungo tempo con quota di dragaggio paragonabile a quella di progetto/collaudato banchina.

LATO SUD



Darsena S. Vitale lato S

LATO EST



Darsena S. Vitale lato E

Figura 49 – Considerazioni generali di progetto – Stabilità delle banchine esistenti – Sezioni darsena S. Vitale

11 CONCLUSIONI

Il progetto “*Hub portuale di Ravenna I fase*” prevede il dragaggio dei canali Candiano e Baiona per un volume in banco di circa 4,7 Mm³ con utilizzo del materiale dragato in attuazione al P.R.P. vigente 2007.

La caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei sedimenti da dragare è stata fatta sulla base delle informazioni contenute all'interno delle indagini del 2014 (Progetto Definitivo), 2019 (aggiornamento della caratterizzazione ambientale dei sedimenti del Progetto Definitivo sulla base del D.M. Ambiente n.173 del 15 luglio 2016), 2020/2021 (Progetto Esecutivo).

Le indagini del 2014 e del 2019 non forniscono una vera caratterizzazione geotecnica dei sedimenti, in quanto essendo finalizzate alla classificazione ambientale dei sedimenti, riportano solo una descrizione granulometrica degli stessi.

Si è resa pertanto necessaria l'esecuzione di una nuova indagine a supporto del Progetto Esecutivo, finalizzata alla caratterizzazione geotecnica dei sedimenti ed al loro comportamento nel caso di dragaggio con draga idraulica tipo TSHD, così come previsto dal Progetto Definitivo.

Le prove sono state eseguite presso il laboratorio GEEG (Geotechnical and Environmental Engineering Group) start-up dell'Università di Roma la Sapienza.

I dati raccolti dall'indagine di Progetto Esecutivo, anche se in numero inferiore rispetto a quelli delle indagini del Progetto Definitivo, sono da considerarsi di qualità superiore in rapporto alla natura delle prove di laboratorio svolte sui campioni prelevati ed alla luce delle conferme avute dalle ulteriori prove eseguite nelle casse di colmata sul materiale già refluito da qualche anno.

Queste ultime hanno confermato la natura e le caratteristiche del sedimento così come definite dall'indagine del 2020-2021, che pertanto sono di riferimento per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti da dragare.

L'analisi delle informazioni disponibili in tutte le indagini ha portato a caratterizzare il sedimento da dragare come un limo argilloso/limo argilloso sabbioso con locali intercalazioni di sabbie limose con un contenuto d'acqua prossimo o superiore al limite liquido ovvero molto poco consistente. Tale dato è stato confermato dalle prove di misura della resistenza non drenata c_u e dalle prove edometriche dell'indagine di Progetto Esecutivo.

Si nota che le indagini del 2019 e del 2020/2021 descrivono un materiale più fine rispetto all'indagine del 2014, passando mediamente da un limo sabbioso/sabbie limose ad un limo argilloso/limo argilloso – sabbioso.

I risultati della indagine di Progetto Esecutivo sono stati quindi usati per tarare un modello CS2 del comportamento dei sedimenti sversati nella cassa NADEP a seguito del loro dragaggio con draga idraulica tipo TSHD secondo le indicazioni del Progetto Definitivo. L'attività di calibrazione e sviluppo del modello è stata condotta dalla E&G s.r.l. a firma del Prof. Ing. Quintilio Napoleoni.

I valori di B.F. assunti nel Progetto Esecutivo sono frutto sia della suddetta sperimentazione che di esperienze simili con sedimenti con caratteristiche analoghe, nonché di considerazioni fatte in rapporto alle modalità di gestione e agli spessori di accumulo degli stessi nelle aree logistiche e in cava “La Bosca” assunti in progetto.

Al fine di ridurre i cicli di dragaggio e i volumi da trasportare di sedimento con conseguente incremento delle tempistiche e dei costi, si è deciso di optare per una draga a grappo tipo GHD anziché una draga idraulica, come da Progetto Definitivo, che di fatto impedisce l'incremento di w_n . Le modalità di accumulo temporaneo e successivo trasporto alle aree logistiche sono descritte negli elaborati specialistici di progetto.