

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 DRAGAGGIO 1° STRALCIO
ELABORATI GENERALI
RELAZIONE DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

file
1114-E-DR2-GEN-RG-02-0.doc

codice
1114-E-DR2-GEN RG-02-0

scala
-

Revisione	data	causale	redatto	verificato	approvato
0	14/10/2021	Emissione per approvazione	P- Smorqon	L. de Angelis	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

DRAGAGGI – I STRALCIO FUNZIONALE

Relazione di caratterizzazione geotecnica

14 ottobre 2021

PROGETTISTI

RTP: 

F&M
ingegneria

SISPI
engineering

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	4
2	OGGETTO E SCOPO	5
3	DOCUMENTI E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
4	AREE DI DRAGAGGIO.....	8
4.1	HUB PORTUALE DI RAVENNA I FASE	8
4.2	I STRALCIO ESECUTIVO FUNZIONALE	9
5	DESCRIZIONE INDAGINI GEOTECNICHE	10
5.1	INDAGINE 2014	10
5.2	INDAGINE 2019	11
5.3	INDAGINE 2020-2021	12
6	ASSETTO STRATIGRAFICO	14
6.1	INDAGINE 2014	14
6.2	INDAGINE 2019	17
6.3	INDAGINE 2020-2021	19
6.4	CONFRONTO.....	19
7	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	20
7.1	CAMPIONI DISTURBATI.....	20
7.1.1	PROVE DI CLASSIFICAZIONE.....	20
7.1.2	PROVE DI SEDIMENTAZIONE IN COLONNA.....	21
7.2	CAMPIONI INDISTURBATI	22
7.2.1	PROVE DI CLASSIFICAZIONE.....	22
7.2.2	MISURA DELLA CU IN FUNZIONE DEL CONTENUTO D'ACQUA.....	23
7.2.3	PROVE DI COMPRESSIBILITÀ EDOMETRICA.....	24
8	MODELLO DEI FENOMENI DI SEDIMENTAZIONE.....	25
8.1	CENNI TEORICI	25
8.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO	25
8.3	RISULTATI DEL MODELLO	26
9	CONCLUSIONI.....	28

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Aree di dragaggio (PD) – Hub portuale di Ravenna I fase – Aree di dragaggio (doc.rif.[20]).....	8
Figura 2 – Aree di dragaggio – I stralcio esecutivo funzionale – Aree di dragaggio (doc.rif.[24]).....	9
Figura 3 – Descrizione indagini geotecniche – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione dei n.517 sondaggi da doc.rif.[8].....	10
Figura 4 – Descrizione indagini geotecniche – Indagine 2019 – Planimetria di ubicazione dei n.402 sondaggi da doc.rif.[24].....	11
Figura 5 – Descrizione indagini geotecniche – Indagine 2020/2021 – Planimetria di ubicazione dei n.10 sondaggi da doc.rif.[22].....	12
Figura 6 – Assetto stratigrafico – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle sezioni stratigrafiche da doc.rif.[14] e [15].....	15
Figura 7 – Assetto stratigrafico – Indagine 2014 – Sezioni stratigrafiche da doc.rif.[18] e [19].....	16
Figura 8 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle sezioni stratigrafiche in corrispondenza delle aree di dragaggio Area 3 e Area 2a da doc.rif.[21].....	17
Figura 9 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione dei sondaggi in corrispondenza dell’area di dragaggio Area 2b da doc.rif.[21].....	18
Figura 10 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche D-D’ e F-F’ da doc.rif.[21].....	18
Figura 11 – Assetto stratigrafico – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle verticali di indagine in corrispondenza delle aree di dragaggio da doc.rif.[22].....	19
Figura 12 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Curve granulometriche.....	21
Figura 13 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Prove di sedimentazione in colonna: altezza dell’interfaccia acqua-fango in funzione del tempo.....	21
Figura 14 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Curve granulometriche.....	22
Figura 15 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata cu in rapporto al contenuto d’acqua w.....	23
Figura 16 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata cu in rapporto all’indice di liquidità IL.....	23
Figura 17 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Prove di compressibilità edometrica.....	24
Figura 18 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Calibrazione modello CS2 sulla base dei risultati delle prove sperimentali sul campione R6.....	26
Figura 19 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione dell’altezza del riempimento nel tempo nella cassa NADEP.....	27
Figura 20 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione del Bulking Factor nella cassa NADEP.....	27

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Assetto stratigrafico – Stratigrafia delle aree di dragaggio in funzione delle indagini svolte.....	19
Tabella 2 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto di sostanza organica.....	20
Tabella 3 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto d’acqua.....	20
Tabella 4 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori dei limiti di Atterberg.....	20
Tabella 5 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del peso specifico dei granuli.....	20
Tabella 6 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del contenuto d’acqua.....	22
Tabella 7 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori dei limiti di Atterberg.....	22
Tabella 8 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del coefficiente di compressibilità sul ramo di carico vergine delle prove edometriche.....	24

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. 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 a 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.

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.

Si è reso necessario avviare un "*I stralcio esecutivo funzionale*" per consentire la piena fruibilità e navigabilità in sicurezza dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico e di due zone del Canale Candiano per un volume di dragaggio in banco limitato di circa 230.000 m³.

Questo volume di materiale dragato sarà interamente riutilizzato nelle aree logistiche portuali denominate "*Logistica 2*" e "*Comparto S3 Nord*".

Questo documento fa parte del presente stralcio funzionale e riporta la descrizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni da dragare.

Si rimanda invece ai documenti di riferimento [22], [23] e [24] per la descrizione delle modalità di dragaggio, di gestione dei sedimenti nel sito di deposito temporaneo e del loro trasporto nelle aree logistiche finali.

2 OGGETTO E SCOPO

L'oggetto del presente documento sono le aree di dragaggio del "*Progetto Esecutivo - I stralcio funzionale*" per un volume di circa 230.000 m³.

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.

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 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

4 AREE DI DRAGAGGIO

4.1 HUB PORTUALE DI RAVENNA I FASE

La Figura 1 riporta le aree di dragaggio, così come definite dal progetto definitivo a base di gara:

- Zona 1: area del canale marino esterna alle dighe foranee;
- Zona 2: area di avamposto 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.

Il progetto definitivo prevede il dragaggio di 4.742.000 m³ di sedimenti in banco dalle suddette 5 zone, in particolare il materiale proveniente dalla zona 1 è stato destinato ad essere immerso in mare o portato a ripascimento, mentre il materiale dragato dalle zone 2+5 sarà messo a dimora a terra all'interno delle aree logistiche L1, L2, S3 e di cava Bosca per una loro riqualificazione.

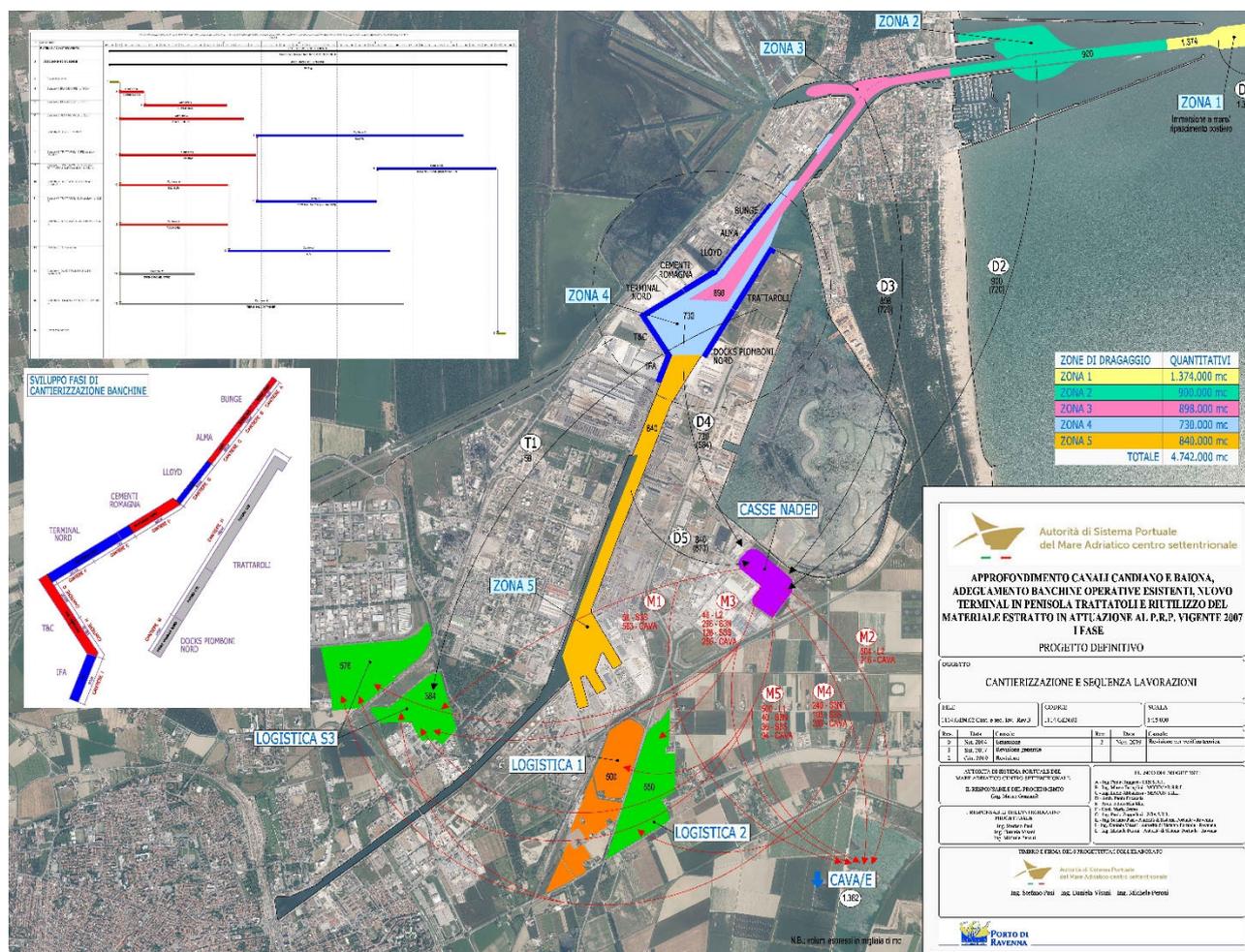


Figura 1 – Aree di dragaggio (PD) – Hub portuale di Ravenna I fase – Aree di dragaggio (doc.ref.[20])

4.2 I STRALCIO ESECUTIVO FUNZIONALE

La Figura 2 riporta l'ubicazione delle n.3 aree di dragaggio (colore bianco), facenti parte del "I stralcio esecutivo funzionale":

- Zona 3: settore canale interno tra pk 8+229.95 – 8+859.95 km
- Zona 2:
 - o Settore area terminal crociere tra pk 6+533.58 - 7+106.23 km
 - o Settore canale centrale tra pk 5+191.44 – 5+587.44 km

Il volume complessivo è di circa 230.000 m³, da destinare interamente all'interno delle aree logistiche a terra L2 e S3 nord.

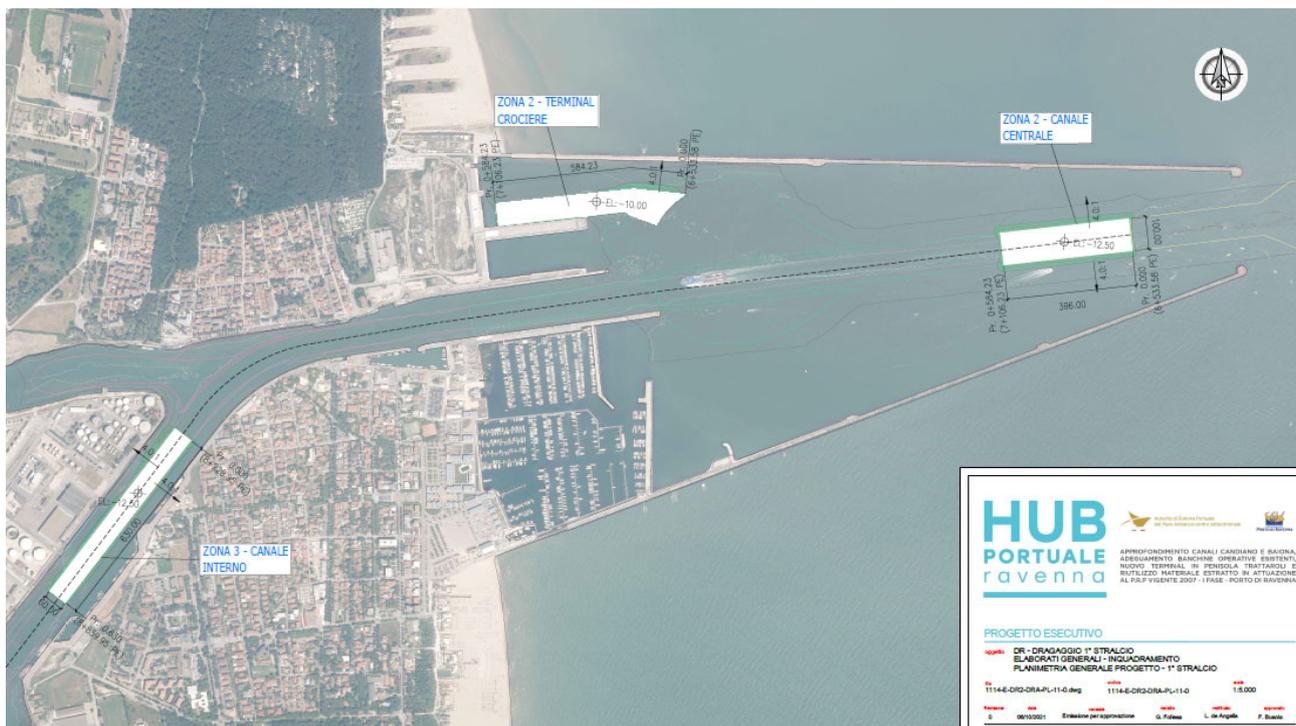


Figura 2 – Aree di dragaggio – I stralcio esecutivo funzionale – Aree di dragaggio (doc.rif.[24])

Le profondità di dragaggio variano per le suddette tre aree in funzione della quota esistente del fondale e di quella di progetto e sono pari a:

- Zona 3 pk 8+229.95 – 8+859.95 km (quota di progetto -12.5 m slm): spessore di dragaggio tra 0 – 1 m nella porzione centrale e di 1.5 – 2 m presso le scarpate;
- Zona 2 pk 6+533.58 - 7+106.23 km (quota di progetto -10 m slm): la maggior parte dell'area si trova già alla quota di progetto, pertanto il dragaggio è concentrato presso la scarpata N lato mare con spessori tra 1.5-2 m e 2-3 m;
- Zona 2 pk 5+191.44 – 5+587.44 km (quota di progetto -12.5 m slm): spessore di dragaggio tra 1.5 – 2 m nella porzione centrale e di 3 – 4 m presso le scarpate.

Si rimanda alle sezioni di dragaggio di progetto per un maggior dettaglio.

5 DESCRIZIONE INDAGINI GEOTECNICHE

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 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 di $\Phi = 101$ mm, al cui interno è stato inserito un liner in polietilene con Φ di 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 3 tratta dal doc.rif.[8].

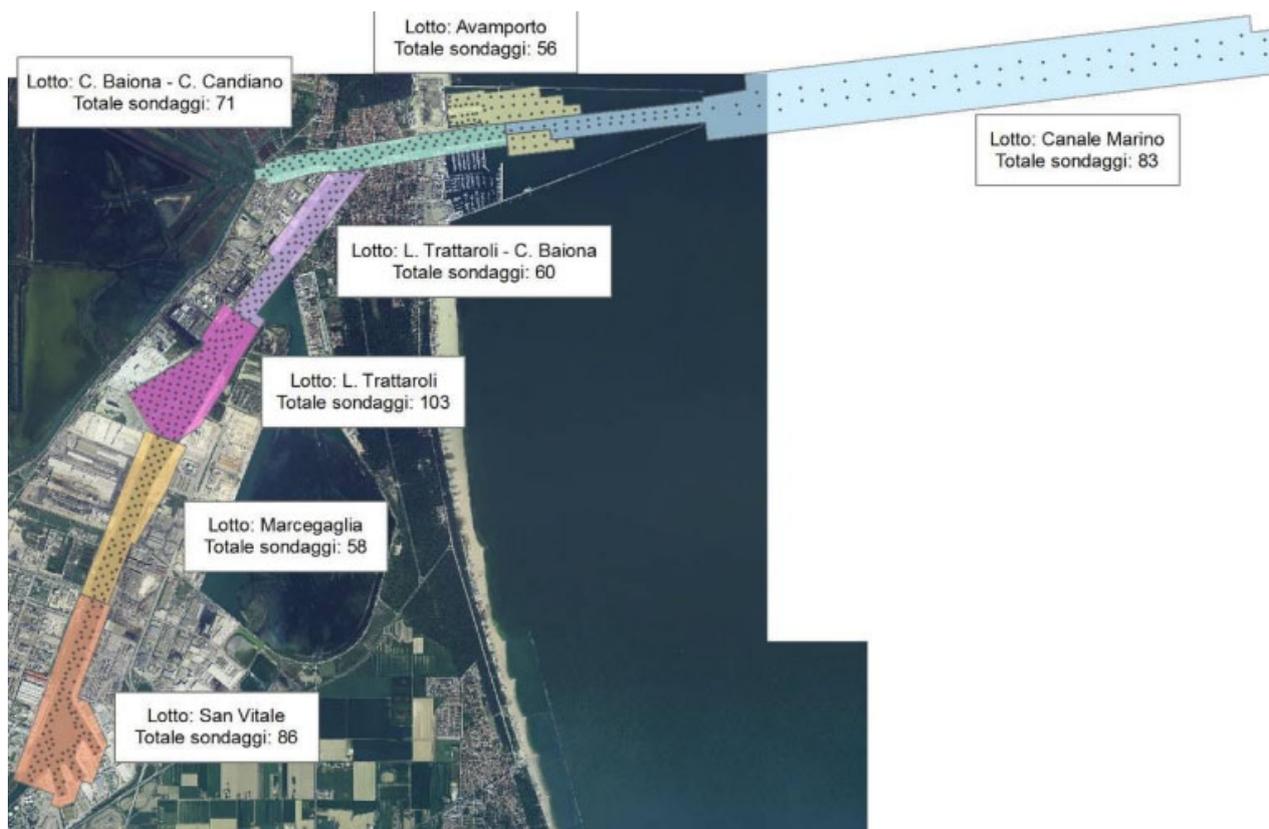


Figura 3 – Descrizione indagini geotecniche – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione dei n.517 sondaggi da doc.rif.[8]

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.

5.2 INDAGINE 2019

L'indagine è stata svolta da Ambiente spa nel 2019 su Commissione della Autorità Portuale di Ravenna, 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 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.

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

5.3 INDAGINE 2020-2021

L'indagine è stata svolta da Ambiente spa 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 5, 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 5 – Descrizione indagini geotecniche – 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 srl a firma del Prof. Ing. Quintilio Napoleoni.

6 ASSETTO STRATIGRAFICO

Il presente capitolo riporta le informazioni derivanti dalle diverse campagne di indagine sull'assetto stratigrafico delle n.3 aree di dragaggio del progetto di "I stralcio esecutivo funzionale", che sono di seguito rinominate come:

- Area 3 o Zona 3: settore canale interno tra pk 8+229.95 – 8+859.95 km
- Area 2a o Zona 2: settore area terminal crociere tra pk 6+533.58 - 7+106.23 km
- Area 2b o Zona 2: settore canale centrale tra pk 5+191.44 – 5+587.44 km

6.1 INDAGINE 2014

La Figura 6 riporta uno stralcio dei doc.rif.[14] e [15] della planimetria di ubicazione delle sezioni stratigrafiche in corrispondenza delle n.3 aree di dragaggio di progetto:

- Area 3: sezioni stratigrafiche n.1 e 2 L.Trattaroli e C.Baiona;
- Area 2a: sezione n.2 Canale Marino – Avamporto;
- Area 2b: sezione n.4 Canale Marino.

La stratigrafia delle aree di dragaggio, derivata dalle suddette sezioni stratigrafiche di Figura 7 e contenute nei doc.rif [18] e [19], è descritta di seguito:

- Area 3: limo sabbioso, limo argilloso e sabbia fine;
- Area 2a: limo sabbioso;
- Area 2b: limo sabbioso – argilloso, sabbia fine.

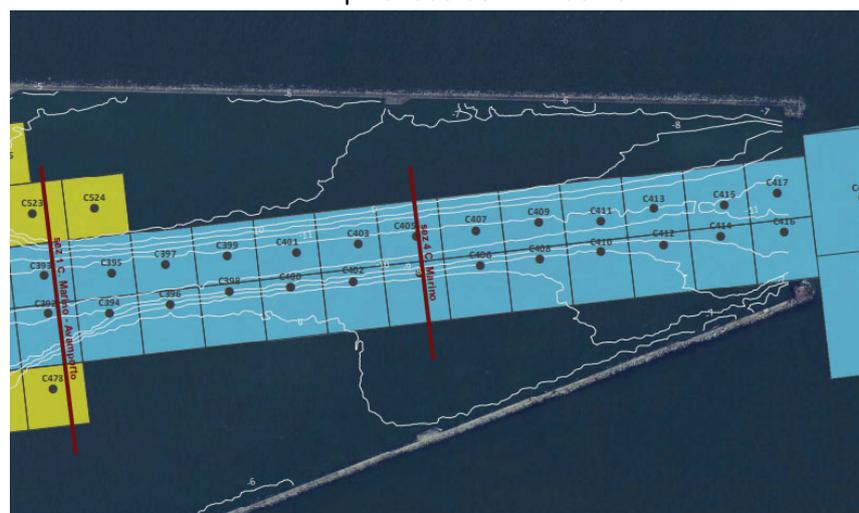
La granulometria prevalente in funzione degli spessori degli strati è quella del limo sabbioso/sabbia fine e secondariamente del limo argilloso.



Area 3 tra pk 8+229.95 – 8+859.95 km



Area 2a tra pk 6+533.58 - 7+106.23 km



Area 2b tra pk 5+191.44 – 5+587.44 km

Figura 6 – Assetto stratigrafico – Indagine 2014 – Planimetria di ubicazione delle sezioni stratigrafiche da doc.rif.[14] e [15]

6.2 INDAGINE 2019

La Figura 8 riporta uno stralcio con l'ubicazione delle sezioni stratigrafiche, contenute all'interno del doc.rif.[21], riferite alle aree di dragaggio seguenti:

- Area 3: sezione D-D';
- Area 2a: sezione F-F'.

Non sono presenti nel doc.rif.[21] sezioni esterne all'avamposto e rappresentative del Canale Marino, pertanto si farà riferimento direttamente alle stratigrafie dei sondaggi n.364÷371, che ricadono all'interno dell'area di dragaggio Area 2b, si veda Figura 9.

La Figura 10 riporta le sezioni stratigrafiche D-D' e F-F', dalle quali si evince che la stratigrafia delle aree di dragaggio è composta da:

- Area 3: limi e argille;
- Area 2a: limi.

L'analisi delle schede stratigrafiche dei sondaggi n.364÷371 indica che la stratigrafia dell'area di dragaggio Area 2b è costituita da limi argillosi/argille limose.

La granulometria prevalente è quella dei limi argillosi.

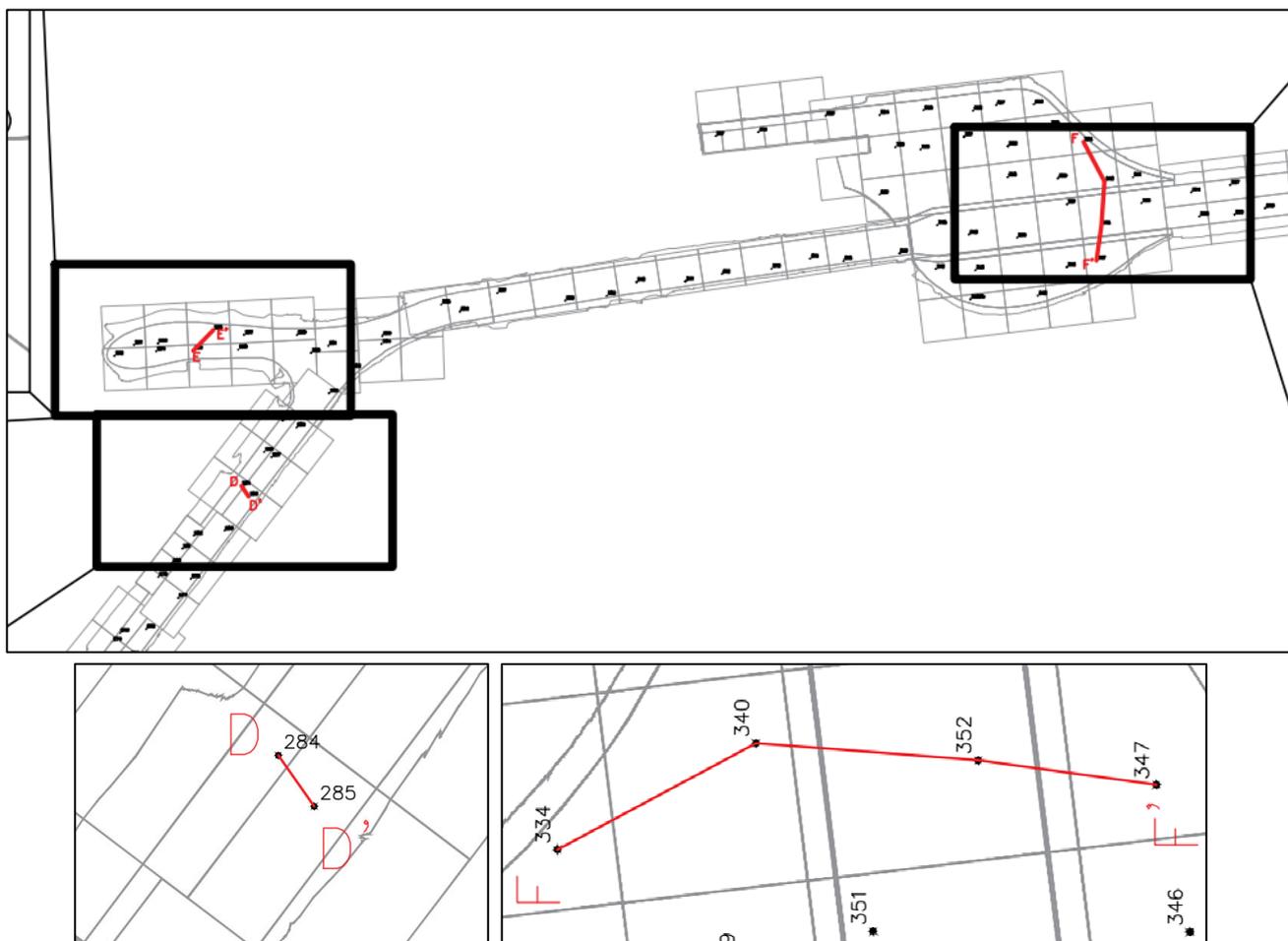


Figura 8 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione delle sezioni stratigrafiche in corrispondenza delle aree di dragaggio Area 3 e Area 2a da doc.rif.[21]

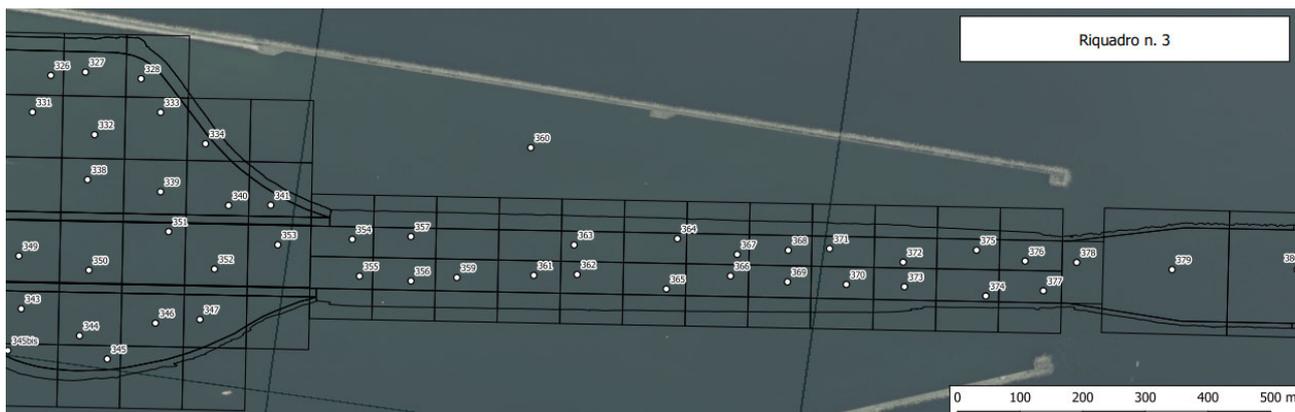
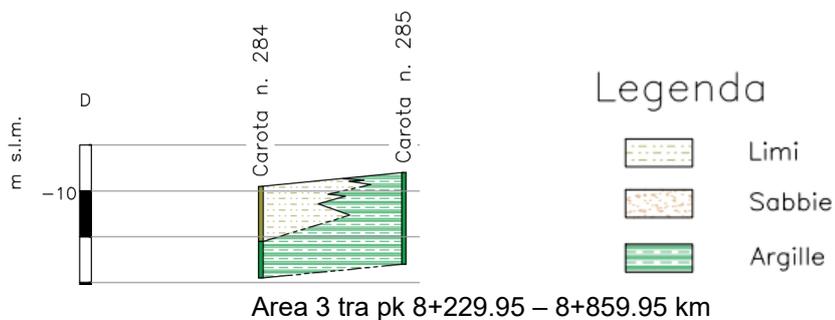


Figura 9 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Planimetria con ubicazione dei sondaggi in corrispondenza dell'area di dragaggio Area 2b da doc.rif.[21]

Sezione D - D'



Sezione F - F'

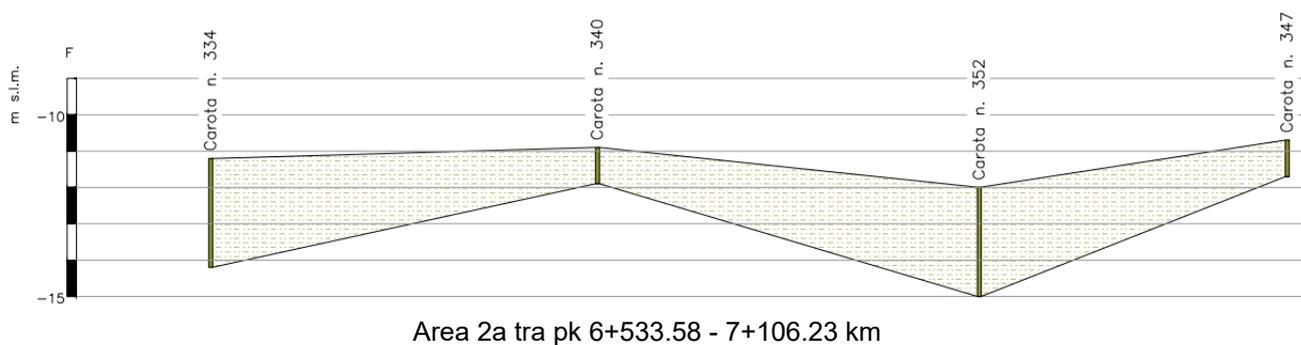


Figura 10 – Assetto stratigrafico – Indagine 2019 – Sezioni stratigrafiche D-D' e F-F' da doc.rif.[21]

6.3 INDAGINE 2020-2021

L'ubicazione dei punti di indagine è riportata in Figura 11, in particolare si ha che le aree di dragaggio sono caratterizzate dalle seguenti verticali di indagine:

- Area 3: verticale R6;
- Area 2a: verticale R7;
- Area 2b: verticale R8.



Figura 11 – Assetto stratigrafico – Indagine 2020/2021 – Planimetria con ubicazione delle verticali di indagine in corrispondenza delle aree di dragaggio da doc.rif.[22]

La stratigrafia delle aree di dragaggio, derivata dalle suddette indagini, contenute nel doc.rif [22], è descritta di seguito:

- Area 3: limo argilloso;
- Area 2a: limo argilloso;
- Area 2b: limo argilloso da sabbioso a con sabbia.

La granulometria prevalente è quella del limo argilloso/limo argilloso - sabbioso.

6.4 CONFRONTO

La Tabella 1 riporta per ciascuna area di dragaggio il relativo assetto stratigrafico, derivato dalle indagini svolte nel corso degli anni.

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 sabbiosa.

Indagine (anno)	Assetto stratigrafico		
	Area 3	Area 2a	Area 2b
2014	limo sabbioso, limo argilloso e sabbia fine	limo sabbioso	limo sabbioso – argilloso, sabbia fine
2019	limi e argille	limi	limi argillosi/argille limose
2020/2021	limo argilloso	limo argilloso	limo argilloso da sabbioso a con sabbia

7 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Il presente capitolo riporta i risultati delle prove di laboratorio della 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 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.

7.1 CAMPIONI DISTURBATI

7.1.1 Prove di classificazione

I valori del contenuto d'acqua w_n sono compresi tra 45-82%, si veda Tabella 3, 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 2, 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 4 con il limite liquido LL tra 25-44% e quello plastico tra 20-28%; 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 5.

Tabella 2 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Valori del contenuto di sostanza organica

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

Tabella 3 – 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 4 – 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 5 – 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 12, si nota come la granulometria prevalente è 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 nominata Zona 5.

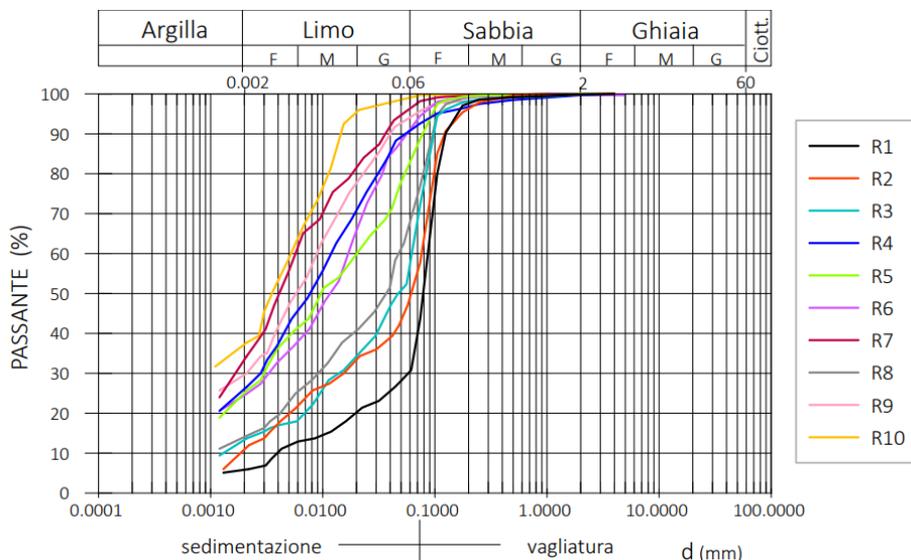


Figura 12 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Curve granulometriche

7.1.2 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 14 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 83gg, la maggior parte delle curve è 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.

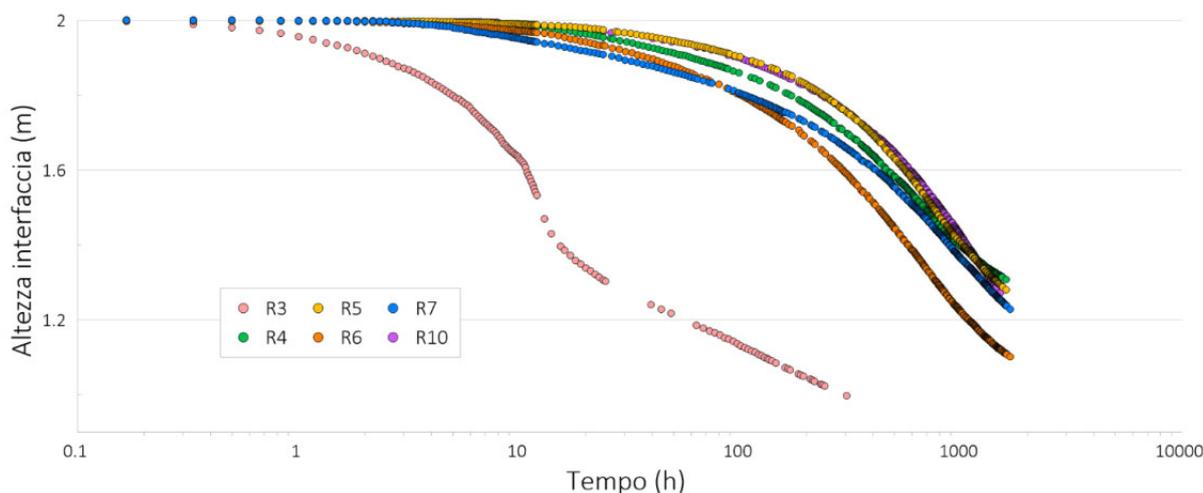


Figura 13 – Caratteristiche geotecniche – Campioni disturbati – Prove di sedimentazione in colonna: altezza dell'interfaccia acqua-fango in funzione del tempo

7.2 CAMPIONI INDISTURBATI

7.2.1 Prove di classificazione

La Tabella 6 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 6 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Valori del contenuto d'acqua

misura	Campione R1			Campione R2			Campione R3			Campione R4		
	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} (%)									
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 7, dove si vede come in media LL è pari al 25-50%, LP varia tra 18-29% ed IP tra 9-24%; si tratta pertanto di limi/argille di media compressibilità/plasticità.

Tabella 7 – 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 14, si nota come la granulometria prevalente è quella del limo argilloso con la frazione argillosa che aumenta procedendo dal Canale Candiano al Canale Marino.

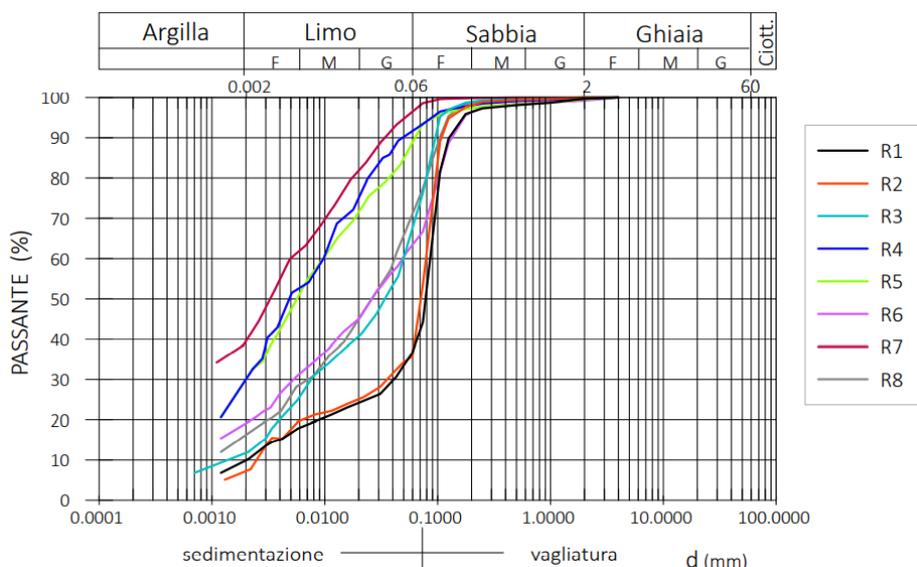


Figura 14 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Curve granulometriche

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 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 15, dove si nota che i valori di resistenza non drenata c_u per un contenuto d'acqua tra 50-75%, 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 confermano lo stesso comportamento e sono in linea con i dati di letteratura (Mitchell, 1976), si veda Figura 16.

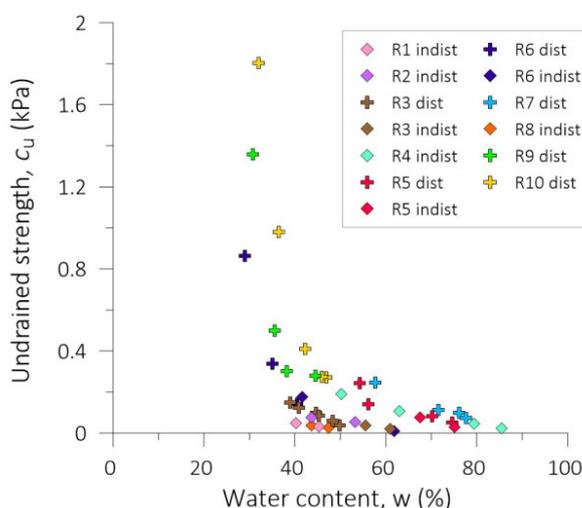


Figura 15 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata c_u in rapporto al contenuto d'acqua w

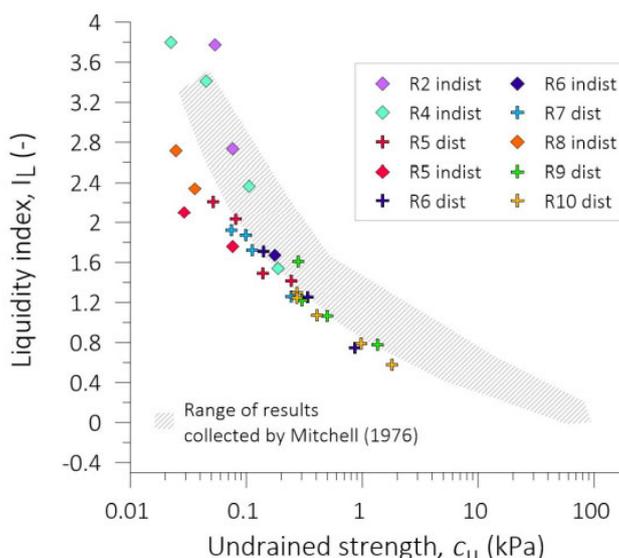


Figura 16 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati/disturbati – Variazione della resistenza non drenata c_u in rapporto all'indice di liquidità I_L

7.2.3 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 17.

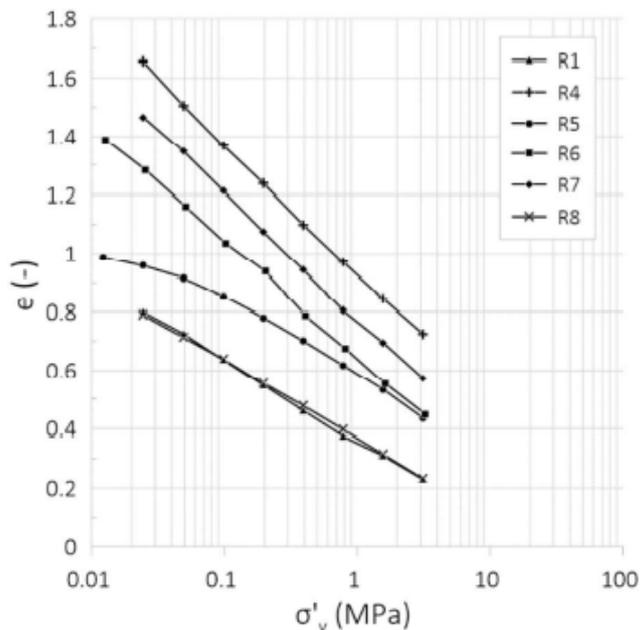


Figura 17 – Caratteristiche geotecniche – Campioni indisturbati – Prove di compressibilità edometrica

L'indice dei vuoti e_0 varia tra 0.8-1.7, mentre il coefficiente di compressibilità C_c è compreso tra 0.26-0.42, si veda Tabella 8, a conferma della scarsa consistenza dei sedimenti.

Tabella 8 – 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

8 MODELLO DEI FENOMENI DI SEDIMENTAZIONE

Il presente capitolo riporta i risultati della attività di modellazione, condotta dalla E&G srl a firma del Prof.Ing.Quintilio Napoleoni, del comportamento dei sedimenti sversati nelle casse di colmata temporanee a seguito del loro dragaggio con draga idraulica tipo TSHD secondo le indicazioni del Progetto Definitivo.

8.1 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.

8.2 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 18 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 srl per un maggior dettaglio in merito ai valori assunti per i parametri empirici delle leggi di variazione di k ed e_0 .

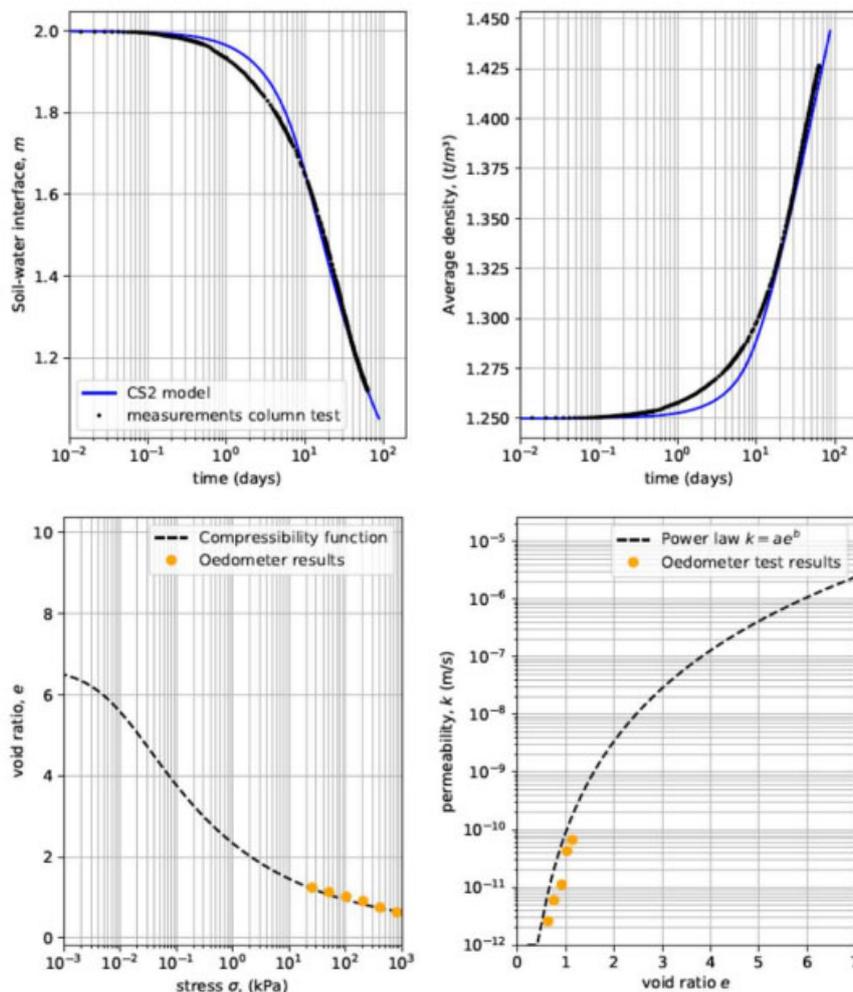


Figura 18 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Calibrazione modello CS2 sulla base dei risultati delle prove sperimentali sul campione R6

8.3 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 19 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, valore ben superiore al valore di Progetto Definitivo di 0.8.

Il BF non raggiunge mai il valore di Progetto Definitivo anche dopo 2000 giorni (durata simulata nelle analisi), quando 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 ovvero la consolidazione non è ancora terminata.

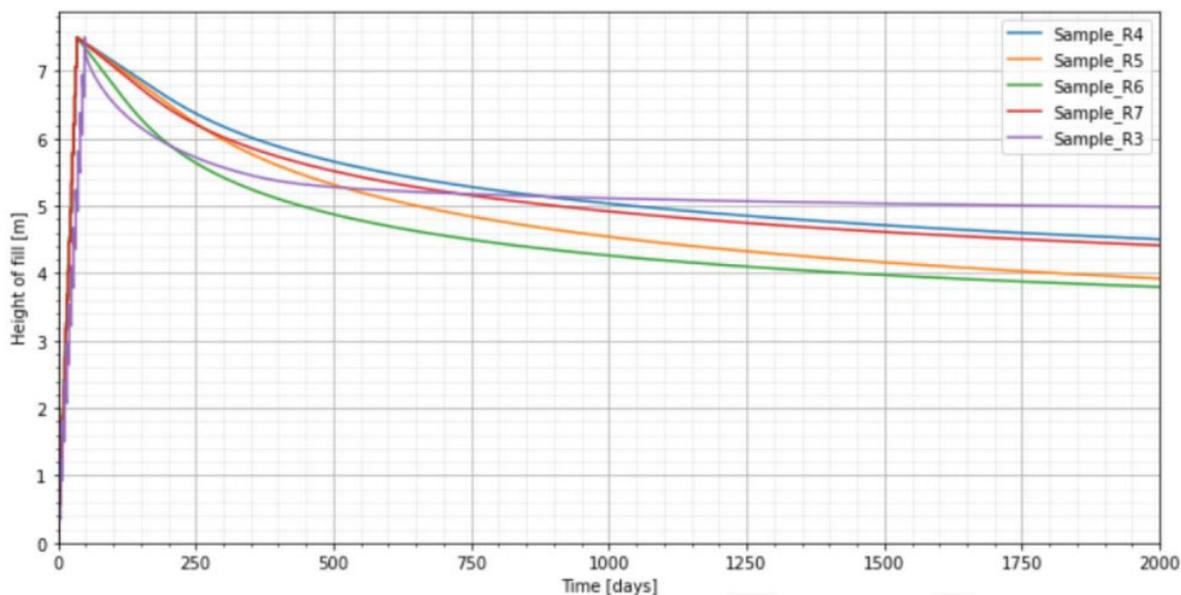


Figura 19 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione dell'altezza del riempimento nel tempo nella cassa NADEP

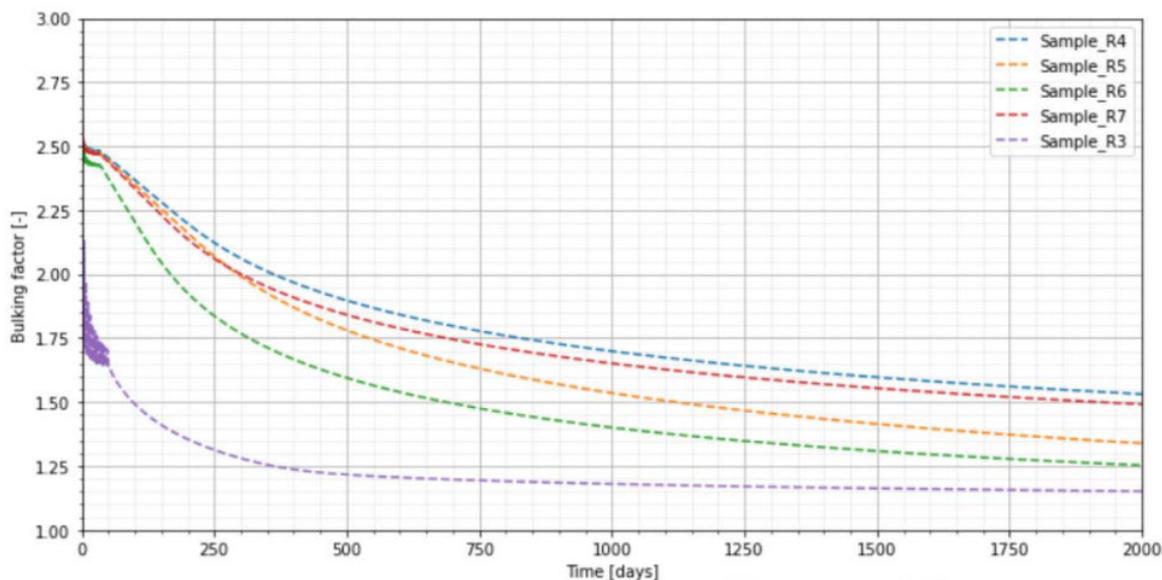


Figura 20 – Modello dei fenomeni di sedimentazione – Risultati modello CS2: evoluzione del Bulking Factor nella cassa NADEP

9 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.

Si è reso necessario avviare un “I stralcio esecutivo funzionale” per consentire la piena fruibilità e navigabilità in sicurezza dell'accosto nord a servizio del traffico crocieristico e di due zone del Canale Candiano per un volume di dragaggio in banco limitato di circa 230.000 m³.

Questo volume di materiale dragato sarà interamente riutilizzato nelle aree logistiche portuali denominate “Logistica 2” e “Comparto S3 Nord”.

La caratterizzazione geotecnica dei sedimenti da dragare in questa fase 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 idraulico 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.

L'analisi delle informazioni disponibili in tutte le indagini disponibili ha portato a caratterizzare il sedimento da dragare come un limo argilloso 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 ad un limo argilloso.

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 srl a firma del Prof.Ing.Quintilio Napoleoni.

Il modello indica che dopo 3 mesi dalla fine del refluento idraulico il Bulking Factor è $BF=2.25$, valore ben superiore a quello di Progetto Definitivo pari a 0.8.

Il BF non raggiunge mai il valore di Progetto Definitivo anche dopo 2000 giorni (durata simulata nelle analisi), quando assume in media valori di 1.25-1.5 ovvero la sedimentazione non è ancora terminata.

L'incremento stimato del BF dalla attività di sperimentazione sulla base delle caratteristiche geotecniche dei sedimenti comporterebbe un aumento importante dei cicli di dragaggio e dei volumi da trasportare con conseguente incremento delle tempistiche e dei costi.

Alla luce di questi risultati si propone di usare una draga a grappo tipo GHD per l'esecuzione dei dragaggi del “I stralcio esecutivo funzionale”. Le modalità di accumulo temporaneo e successivo trasporto alle aree logistiche sono descritte negli elaborati specialistici di progetto.