

# PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

Titolo elaborato:

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

Scala:

1
0
0
1
0
R
R
0
1
8
-
0
G
E
O

Committente:

AUTORITA' PORTUALE  
DI LIVORNO

Progettisti:

MODIMAR S.r.l.  
Prof. Ing. Alberto NOLI  
TECHNITAL S.p.A.  
SCIRO BUREAU VERITAS S.p.A.  
ACQUATECNO S.r.l.

	marzo 2013	0	EMISSIONE	A. SANZONE	A. NOLI	M. TARTAGLINI
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:

Dimensioni foglio: A4

Visto del Committente:

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale</b> <b>2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

**NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE  
DEL PORTO DI LIVORNO  
2012**

**INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO**

**INDICE**

<b>1. INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO</b>	<b>2</b>
<b>3.1. Geologia</b>	<b>2</b>
<b>3.2 Geomorfologia</b>	<b>7</b>
<b>3.3 Idrogeologia</b>	<b>7</b>
<b>3.4 Formazioni subacquee nelle aree antistanti all'area portuale in studio</b>	<b>11</b>
<b>3.5 Stratigrafia</b>	<b>11</b>
<b>4. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Orizzonti stratigrafici</b>	<b>14</b>
<b>4.2 Grandezze fisiche calcolate dagli esiti analisi laboratorio</b>	<b>16</b>
4.2.1 Analisi granulometriche	16
4.2.2 Prove edometriche	18
4.2.3 Prove triassiali consolidate drenate	18

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale</b> <b>2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

## 1. INTRODUZIONE

Il documento riporta in sintesi gli elementi conoscitivi geologici, idrogeologici, geotecnici, sulla base dei numerosi dati di base a disposizione (in particolare i dati geotecnici derivanti dalle operazioni di campagna propedeutiche al progetto della nuova Vasca di colmata, 2008).

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO

### 3.1. Geologia

La pianura dell'Arno rappresenta il prolungamento verso Sud-Est della Piana Versiliese e, dal punto di vista strutturale di quello che viene indicato come Bacino Pisano-Versiliese (MAZZANTI, R., 2000; NAGI & PASCUCCI, 2002). Il bacino Pisano-Versiliese si è impostato all'interno di un'ampia depressione tettonica subsidente di tipo semi-graben (MARIANI & PRATO, 1988; NAGI & PASCUCCI, 2002) che a partire dalla fine del Miocene superiore (Tortoniano Sup-Messiniano Inf.) si è sviluppata a partire dal margine tirrenico dell'appennino per l'attivazione di faglie a geometria diretta o listrica ad immersione occidentale connesse alla apertura del Mar Tirreno e alla rotazione antioraria della catena appenninica. Tale struttura presenta un'orientazione complessiva NordOvest-SudEst e si estende con continuità da Pontedera, a Sud, fino all'abitato di Sarzana, dove si chiude poco più a Ovest, ricomprendendo la parte terminale della piana del F. Magra.

La piana è bordata a Nord dagli alti strutturali formati dai rilievi dei Monti Pisani e dei Monti d'Oltre Serchio, prolungamento meridionale delle Alpi Apuane, dove sono presenti unità composte da formazioni litologiche di età compresa tra il Carbonifero Superiore e l'Oligocene Superiore, mentre a sud il limite della piana è rappresentato dai rilievi delle Colline Pisane e Livornesi.

Le unità geologiche che costituiscono i Monti Pisani sono strutturate in falde tettoniche deformate in grandi pieghe chilometriche e delimitate alla base da sovrascorrimenti tettonici.

Lo scollamento delle unità dal relativo substrato stratigrafico è avvenuto in corrispondenza di livelli di maggiore debolezza e plasticità che ne hanno consentito la relativa traslazione favorendone il movimento.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

L'area a sud dalla Piana d'Arno è strutturata in una serie di fosse tettoniche ad andamento SE-NO, limitate da alti morfologici e strutturali costituiti da unità tettoniche appartenenti all'edificio a falde appenninico. Queste unità, di età compresa tra il Carbonifero Superiore e l'Oligocene Superiore, sono caratterizzate da deformazione compressiva a pieghe e sovrascorrimenti. Queste strutture tettoniche sono tagliate da più recenti faglie normali, di direzione prevalentemente SE-NO ed immersione opposta e convergente dai due alti strutturali, che mettono a contatto le unità appenniniche con i sedimenti miocenico superiori-pleistocenico inferiori, che riempiono la fossa tettonica. Questi ultimi presentano un basso grado di deformazione, essendo strutturati in monoclinali a debole inclinazione e direzione SO-NE prevalente nella gran parte del bacino.

Le faglie si sono mantenute attive generalmente fino a tutto il Pleistocene Inferiore, come confermato dagli studi sui sedimenti depositi fino a quel momento (Sabbie a Flabellipecten) che ne risultano interessati, ma probabilmente hanno proseguito anche dopo il Pleistocene medio.

Nelle depressioni che si andavano progressivamente approfondendo si sono deposte potenti successioni sedimentarie Miocenico-Pliocenico-Pleistoceniche di ambiente continentale, fluviale-lacustre, costiero e marino di mare basso che ne hanno determinato la progressiva colmatazione.

Lo spessore complessivo dei depositi di età variabile dal Neocene al Quaternario arriva fino a 3.800 m poco ad ovest di Pisa, suddiviso internamente in sequenze di depositi syn-rift miocenico superiori-pleistocenico inferiori, suturati da depositi post-rift di età pleistocenica medio-olocenica (Mariani & Prato, 1988; Nagi & Pascucci, 2002). Lo spessore diminuisce bruscamente avvicinandosi ai Monti Livornesi ed anche passando ad est della faglia listrica che borda il Bacino Pisano-Versiliese.

I depositi syn-rift sono il prodotto di una alternanza di eventi di ingressione marina, che nel settore relativo alla Bassa Valdarno hanno portato alla sedimentazione di ghiaie, sabbie, limi,

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale</b> <b>2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

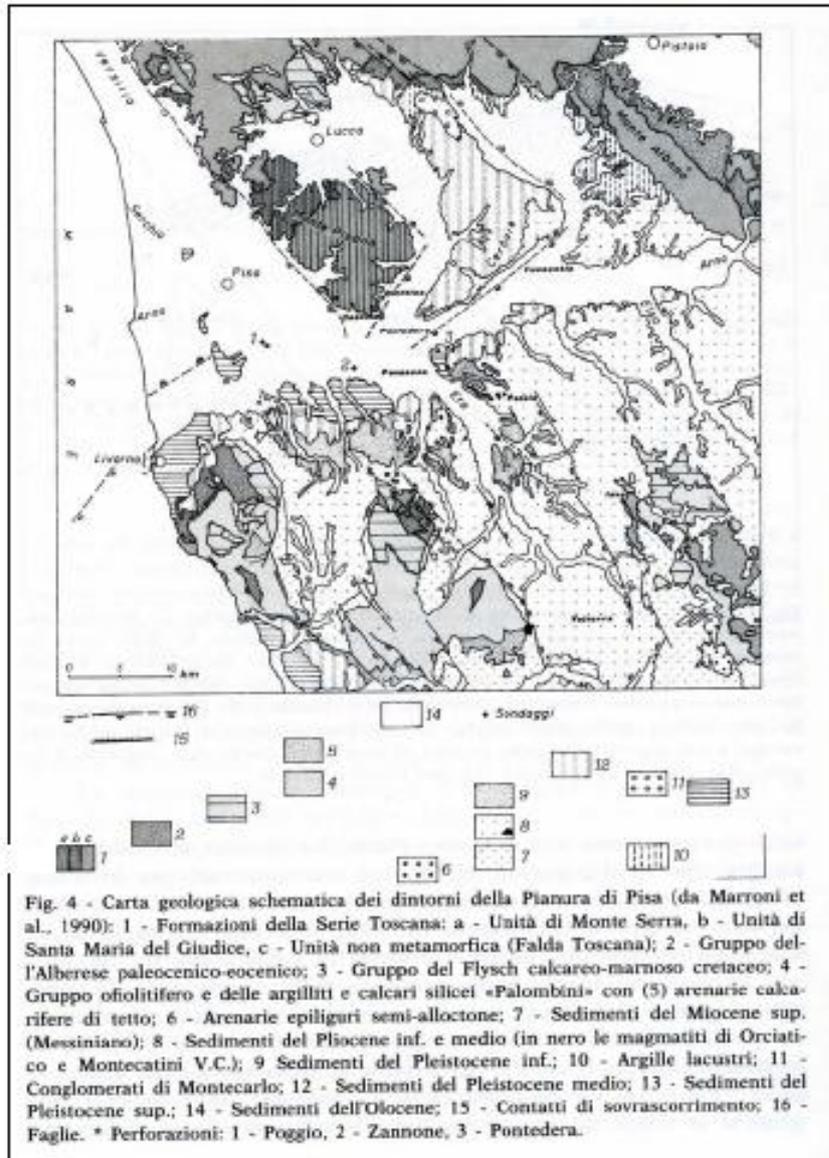
argille e calcari sabbiosi, e di successive regressioni con conseguente erosione causata dall'esposizione subaerea e deposizione di sedimenti in facies di ambiente continentale tipo spiaggia-duna-piana di esondazione.

A partire dal Pleistocene medio inizia la sedimentazione del Substrato superiore con la deposizione della formazione di Casa Poggio ai Lecci. La sua presenza, ben documentata nei rilievi circostanti la piana, diviene incerta nella successione della pianura, dove è stata dubitativamente identificata per mezzo dei sondaggi profondi, viste le somiglianze sedimentologiche presentate con altre analoghe litofacies di differente posizione stratigrafica.

Nel Pleistocene superiore si depositano infine le Sabbie e Limi di Vicarello rappresentati da sedimenti misti quali sabbie eoliche di duna, di retroduna e di piana di esondazione fluviale che chiudono il ciclo sedimentario marino precedente e testimoniano il definitivo passaggio a condizioni chiaramente continentali. Le Sabbie e Limi di Vicarello sono attribuite alla fase cataglaciale di clima più secco del Würm II e sono stati attribuiti ad ambienti misti eolico-palustri, di duna, di retroduna e di piana di esondazione.

Il forte spessore dei depositi recenti (fino a 100 m) (Sartori, 1978; Romagnoli, 1957), è stato determinato dal sovralluvionamento indotto dallo sbarramento a mare operato dal sistema deltizio dell'Arno, dei lidi e delle dune litorali che si andavano formando a partire dalla fine dell'ultima glaciazione del Würm III e che per il progressivo innalzamento del livello del mare (Trasgressione Flandriana o Versiliana) risultavano rialzati rispetto alla piana retrostante, anche a causa della subsidenza della piana stessa indotta dai fenomeni di consolidazione dei sedimenti depositi.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico				
	Data: marzo 2013	10	010	RR	018	-0



**Fig.1 Carta geologica schematica della Pianura di Pisa e dintorni (da MARRONI M. et alii; 1990).**

In corrispondenza dello sbocco delle valli laterali nella piana pisana i corsi d'acqua hanno originato apparati alluvionali anche di una certa importanza (valle di Calci) che si interdigitano con i depositi di pianura e che risultano in parte sepolti al disotto dei sedimenti attuali e recenti.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

La situazione geologica dell'area di intervento è rappresentata nella Carta geologica dei comuni di Livorno e Collesalveti (Mazzanti et alii, 1990) e dall'estratto di cartografia geologica del CA.R.G.

Nell'area in studio si rintracciano i seguenti affioramenti:

- a. Depositi di spiaggia attuale (s)<sup>1</sup>, regolata dai moti ondosi del mare, dalle correnti e dalle maree insieme alle dinamiche di trasporto del Canale dello Scolmatore d'Arno; si tratta di sabbie molto fini tendenzialmente ancora in accumulo;
- b. Depositi di alluvioni (a), affiorante in destra idraulica dello Scolmatore e che corrisponde con la fase di risalita del livello di base dei fiumi conseguente a quella trasgressione versiliana<sup>4</sup> del livello del mare;
- c. Depositi dei sedimenti palustri, alluvionali e di colmata (t), spesso non facilmente riconoscibili l'uno dall'altro. Attualmente l'unica area palustre ancora non prosciugata rimane il Prato della Contessa a oriente della Fattoria di Suese in Collesalveti;
- d. Depositi delle Sabbie d'Ardenza (q9) che sormontano le Calcareniti Sabbiose di Castiglioncello; sono sostanzialmente sabbie molto fini sempre di origine continentale e di accumulo eolico e di tipico colore arancio-rosso. Rappresentano per la zona una formazione tipica nell'ambito del cosiddetto Terrazzo di Livorno (nella nuova cartografia geologica del CAR.G. la formazione è stata rinominata QSD – Sabbie di Donoratico).

---

<sup>1</sup> Per spiaggia attuale si intende la fascia continentale a contatto con il mare di recente evoluzione.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

### 3.2 Geomorfologia

Da un punto di vista geologico-geomorfologico l'area è caratterizzata per i primi 30 m di spessore dalla presenza di depositi di piana alluvionale attuali, recenti o antichi di età olocenica e di natura complessivamente sabbiosa, limosa ed argillosa cui si associano in subordine ed a varie profondità ghiaie e sabbie ghiaiose a formare livelli di continuità laterale variabile. Nel sottosuolo della piana all'altezza di Ponsacco tali livelli ghiaiosi sono stati rinvenuti alla profondità variabile tra 100 e 110 m e sono indicati in letteratura come Conglomerati del Serchio da Bientina che costituiscono un ciclo anteriore di quelli dell'Arno.

Verso il mare i depositi della piana passano in maniera abbastanza netta ai sedimenti sabbiosi degli ambienti di spiaggia-duna eolica di restrospiaggia che segnano il margine esterno della pianura alluvionale dell'Arno. Tali depositi si trovano in una fascia estesa che può raggiungere anche i 4-5 km di ampiezza. Sono organizzati in sistemi di cordoni o lidi (poco rilevati rispetto al piano campagna circostante) e lame (aree depresse palustri) e di dune o tomboli più rilevate morfologicamente rispetto al piano campagna circostante.

### 3.3 Idrogeologia

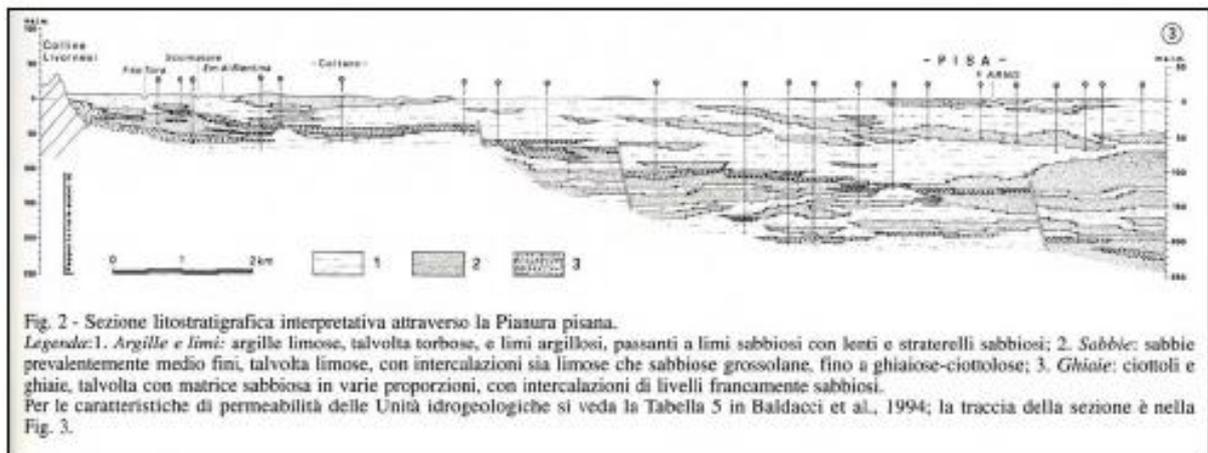
I numerosi corpi sabbiosi e ghiaiosi depositi nei vari cicli sedimentari plioleistocenici che si sono succeduti nel riempire la struttura subsidente della Piana d'Arno, costituiscono altrettanti corpi acquiferi, spesso separati da livelli argillosi che li confinano.

La situazione idrogeologica è schematicamente indicata nella fig. 2 che riproduce la Sezione litostratigrafia interpretativa attraverso la Pianura Pisana tratta da "Struttura e piezometria del 1° acquifero artesiani in ghiaie della Pianura Pisana" BALDACCI F. (1999).

La figura rivela la complessità della situazione idrogeologica che caratterizza il sottosuolo della pianura caratterizzata dalla presenza di numerose alternanze di lenti sabbioso-ghiaiose caratterizzate da frequenti soluzioni di continuità sia di natura stratigrafica che tettonica, imputabili queste ultime alla riattivazione post-würmiana di preesistenti faglie distensive

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

(D'AMATO, AVANZI E NARDI, 1993). Al di là delle interpretazioni strutturali degli Autori, che potrebbero essere riviste dalle più recenti ricerche nell'area (SARTI G. ET ALII comunicazione personale; 2006), quello che rimane comunque valido è la presenza di livelli impermeabili od a minore permeabilità relativa a composizione argilloso-limosa intercalati ai livelli relativamente più permeabili sabbioso-ghiaiosi, sede delle più importanti falde idriche oggetto di sfruttamento mediante pozzi di captazione. Tale situazione mette in evidenza la presenza di falde in pressione, solo parzialmente indipendenti tra loro, e tra le quali si verificano scambi idrici diretti o anche per fenomeni di drenanza in conseguenza di differenti gradienti idraulici che le caratterizzano.



**Fig.2 Sezione litostratigrafia interpretativa attraverso la Pianura Pisana tratta da “Struttura e piezometria del 1° acquifero artesiano in ghiaie della Pianura Pisana” di BALDACCİ F. (1999).**

I principali acquiferi presenti nel sottosuolo della piana e che sono oggetto di sfruttamento sono indicati in letteratura come 1° Acquifero artesiano in sabbia, più superficiale, e 1° Acquifero artesiano in ghiaia, che risulta sottoposto al precedente. Entrambi vanno a costituire quello che viene indicato come l'Acquifero multistrato confinato (Amc) (BALDACCİ F. ET ALII, 1995).

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

Al di sopra di questi acquiferi principali si trova un unico livello non ulteriormente suddivisibile in corpi idrogeologicamente distinti, costituito da argille limose e talvolta torbose, limi argillosi e limi sabbiosi con intercalazioni di sottili livelli sabbiosi.

Si fa pertanto riferimento ad un unico acquifero freatico in quanto le numerose soluzioni di continuità dei livelli a bassa permeabilità o la mancanza di livelli impermeabili ben sviluppati e di spessore adeguato non garantiscono la completa separazione idraulica tra i vari livelli a maggiore permeabilità relativa, favorendo pertanto l'instaurarsi di molteplici interconnessioni e scambi reciproci anche importanti e comunque difficilmente quantificabili alla luce della attuali conoscenze idrogeologiche, in un rapporto di ricarica e di drenaggio che dipende dal particolare periodo dell'anno e dalla posizione relativa dei livelli piezometrici.

La profondità a cui si rinviene la superficie piezometrica della falda freatica superficiale varia progressivamente spostandosi da monte (Pontedera) verso la foce a mare risultando sempre più prossima alla superficie topografica. La superficie piezometrica tende ad essere subaffiorante nei settori di pianura a valle dell'abitato di Vicarello, dove le quote topografiche del piano campagna sono prossime al livello medio mare. Nelle varie zone di colmata di precedenti aree palustri, le cui quote assolute del piano campagna difficilmente superano il metro e spesso sono inferiori a livello del mare come nel caso della località Ex Padule di Stagno ad est di Coltano, la falda è affiorante e viene artificialmente depressa mediante impianti idrovori che provvedono a mantenere i terreni asciutti e liberi dalle acque.

Nell'ambito dell'area in esame, costituisce elemento fisico di determinante importanza idrogeologica la linea di ingressione di acqua marina che, dal Canale Industriale, si sviluppa rettilinea secondo un andamento grosso modo Nord-Est/Sud-Ovest.

Tale linea separa due Domini: uno posto a occidente ed uno ad oriente, che presentano caratteristiche idrogeologiche nettamente distinte per quanto attiene alle condizioni di saturazione dei terreni da parte dell'acqua marina.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

Il Dominio occidentale è completamente caratterizzato dalla presenza di acqua marina o fortemente salmastra, talché i terreni sotto il livello medio mare sono da considerarsi totalmente saturi di acqua salata-salmastra, con assenza di circolazione idrica sotterranea strutturata di acqua dolce.

Pertanto in questo Dominio non si può parlare di falda idrica; ciò fino alla profondità di almeno 30-35 metri (da piano campagna). Infatti l'unica falda idrica strutturata in condizioni di "completo sconfinamento" si trova al di sotto di tale profondità, non presentando alcuna connessione idraulica con il "sistema" a lei sovraciante. Peraltro, è da evidenziare che l'acqua di tale falda profonda è di fatto inutilizzata per consumi umani, zootecnici, irrigui o industriali, considerate le naturali pessime caratteristiche qualitative che possiede.

Il Dominio orientale è sicuramente interessato dal fenomeno di ingressione di acqua marina, che si sviluppa a partire dalla sponda Est del Canale Industriale e dalla sponda Sud del Canale Scolmatore d'Arno, ma è altresì interessato da fenomeni di ricarica di acqua dolce, talché tra le zone di infiltrazione e quelle di ingressione marina si rinvengono coltri di sedimento, a varia granulometria, dove si instaura una certa circolazione idrica sotterranea strutturata, anche se di limitate dimensioni e di scarsa importanza.

Inoltre, una caratteristica comune alle diverse organizzazioni degli scorrimenti sotterranei è che, comunque, la velocità delle eventuali circolazioni risulta modesta, sia per le permeabilità molto basse del sedimento, sia per la sua eterogeneità, sia per le forme dei piani di sedimentazione che spesso presentano memorie di contropendenza in relazione a "forme di paesaggio retrodunale".

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

### 3.4 Formazioni subacquee nelle aree antistanti all'area portuale in studio

Nell'Indagine geologico-tecnica a supporto della progettazione esecutiva della seconda vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno (giugno 2008) sono stati eseguiti e interpretati dei profili sismo-stratigrafici.

L'interpretazione dei profili non fornisce indicazioni sulla composizione degli strati in termini di "natura esatta del sedimento", ma piuttosto consente di trarre alcune considerazioni sull'evoluzione morfologica del substrato.

La maggior parte dei profili mostrano un primo "strato" superficiale, di scarso spessore (qualche decina di centimetri), acusticamente trasparente e che può essere associato ad un deposito recente indifferenziato probabilmente di natura sabbioso-limoso.

Il livello sottostante appare in molti profili debolmente stratificato e potrebbe far pensare ad una evoluzione più complessa, confermata nella parte più distale (offshore) dei profili, da una laminazione inclinata (cunei) tipica di strutture di progradazione.

Infine è possibile rilevare un ultimo livello in discordanza con i precedenti, talvolta affiorante nella zona più lontana dalla costa, caratterizzato da una morfologia superficiale frastagliata, causata probabilmente dalla composizione stessa del sedimento.

### 3.5 Stratigrafia

Dall'analisi delle correlazioni lito-stratigrafiche è possibile trarre in sintesi le seguenti osservazioni:

1. L'Orizzonte 1, costituito da alternanze di sabbia limoso grigio-verde e sabbia limosa grigio scura, entrambe ricche di materia organica recente, risulta ben rappresentato in ogni sondaggio e marca una base (marker litotecnico) su una profondità compresa tra i -9,40 m. ed i -15,50 m. da s.l.m.m. con un accenno di aumento di profondità

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale</b> <b>2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

della base da Sud verso Nord. Nelle due Sezioni trasversali verso mare la base di questo Orizzonte si presenta piuttosto “piatta” tra i -10,00 m. ed i -13,00 m. s.l.m.m.;

2. L’Orizzonte 2 costituito da sabbia marrone oca con ciottoli e ghiaia di varia natura si rintraccia soltanto nelle colonne stratigrafiche dei sondaggi posti più a meridione. La sporadicità di queste litologie lascerebbe supporre che siamo in prossimità di antiche linee di scarico e di “sciacquature” della Panchina;
3. L’Orizzonte 3 costituito da alternanze di sabbie fini e medie ricche in resti conchigliari con livelli di argilla limosa con resti lignei e spessori di ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa grigio piombo è ben rappresentato in ogni sezione stratigrafica in quasi tutti i sondaggi fino al fondo foro;
4. L’Orizzonte 4 rappresentato da spessori di limi sabbiosi con ghiaie e resti conchigliari si rintraccia solamente in una sezione; il suo tetto si pone al minimo intorno ai -14,00 m. di profondità s.l.m.m. e nel Sondaggio S4 si ritrova fino al fondo foro -40,00 m. di profondità s.l.m.m..

Dalle considerazioni sin qui trattate è possibile sintetizzare la seguente situazione stratigrafica:

- Il substrato non rintracciato dalle analisi geognostiche dirette ed indirette e conosciuto solo sulla base di studi bibliografici ed in seguito all’esecuzione di sondaggi profondi è mio-pliocenico ed ha una natura prevalentemente argillosa o limo-argillosa;
- Ai piedi del Terrazzo morfologico si rinvencono delle alluvioni di conoide depositate dai torrenti livornesi costituite da ghiaie e sabbie grossolane che si rintracciano tra i -15.00 ed i -18.00 m. da piano campagna; più in profondità invece si rinvencono

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

orizzonti di ghiaie intorno ai 30.00 – 35.00 m. da piano campagna riconducibili alla deposizione durante le modificazioni “in meandro” del paleo-Arno e Serchio -.

- Al di sopra del substrato e verso l’entroterra si imposta il Terrazzo eustatico marino di Livorno del Pleistocene superiore costituito prevalentemente da sabbie, sabbie variamente cementate con intercalazioni e passaggi di sabbie limose. Il Terrazzo morfologico risulta delimitato verso ovest da una scarpata nota con il nome di “Gronda dei Lupi”;
- In parte in contatto diretto con il substrato, in parte in lieve sormonto sul Terrazzo pleistocenico di Livorno, si trovano le formazioni post-tirreniane ed oloceniche costituite da sabbie limose e limi argillosi organici tipiche delle zone di transizione palude-mare; verso la superficie si rintracciano i cordoni dunali e le caratteristiche formazioni retrodunali di sabbie fini con elongazione Nord-Sud e disposizione sub-parallela verso la linea di costa;
- L’ambiente stratigrafico dell’areale in esame che si è evoluto secondo episodi sedimentari in ambiente fluvio-deltizio e marino ha subito una ulteriore e consistente trasformazione antropica relativa all’utilizzo del territorio prima ai fini agricoli e quindi industriali in relazione allo sviluppo dell’area portuale.

Visto nell’insieme il profilo geo-stratigrafico, considerata una ipotetica sezione di tutte le stratificazioni susseguite nell’arco temporale post-pleistocenico, presenta un “unicum” diverso-omogeneo e perennemente saturo formato da materia granulometrica da fine a molto fine; tuttavia segnata in orizzonti ben precisi e più profondi da “inghiaiate” riferibili agli episodi alluvionali delle aste idriche (Arno e altri torrenti livornesi minori).

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

#### 4. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

##### 4.1 Orizzonti stratigrafici

Nel giugno 2008 è stato presentato il progetto per la realizzazione della seconda Vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno posta in continuo subito a Nord della precedente già in fase di completamento. Oltre ad essere stata eseguita una campagna di indagini indiretta, è stata anche predisposta una campagna geognostica diretta con un consistente numero di analisi geotecniche che ci consentono di definire un quadro aggiornato dei principali caratteri geotecnici dei terreni.

Sulla base delle prove eseguite durante la campagna (2001) a supporto della realizzazione della Vasca di colmata n. 1 e durante la recente campagna (2008) a supporto della Vasca di colmata n. 2 sono state elaborate le Tabelle 3 e 4 che raccolgono e classificano tutti i dati significativi.

Dall'analisi di questi primi risultati esposti è possibile fare le seguenti considerazioni:

- Le sabbie grigio-verdi (Orizzonte 1) sono dotate di un  $D_r$  medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\varphi$  intorno ai  $35^\circ$  - spessore mediamente sciolto -. Si riscontra un NSPT medio intorno a 13; nei primi metri di spessore (entro i 5,00 m. di profondità) i valori di infissione ai 30 cm. solo in tre casi superano i 10 colpi, mentre alle maggiori profondità (da -5,00 a -9,00 m.) si rileva un aumento di colpi fino a 22.
- Gli ammassi di fanerogame (Orizzonte 1) sono spesso dotate di un  $D_r \approx 0.2$  anche se in media si rintracciano valori compresi tra 0.2 e 0.4 con un  $\varphi$  ai  $30^\circ$  - spessore che può essere classificato come molle -. Il valore di NSPT mediamente è intorno a 6. Fino ai 6,00 m. di profondità il valore di infissione ai 30 cm. è davvero scadente (presenza di tre valori = 0); a profondità maggiori il valore pare migliorare anche se si riscontrano due valori di 4 a 8,00 e -9,00 m..

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

- Gli spessori di sabbie limose con fanerogame (Orizzonte 1) sono dotate di un Dr medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\phi$  intorno ai 30°-35° - spessore mediamente sciolto -. Si riscontra un più elevato valore di colpi di infissione ai 30 cm. rispetto agli spessori con prevalenza di fanerogame anche se in media non si supera il valore di 12. Interessante constatare che il valore di colpi di infissione qui tende a decrescere con l'aumento della profondità.
- Le sabbie ocre (Orizzonte 2) sono dotate di un Dr intorno agli 0.6 con un  $\phi$  intorno ai 40° - spessore mediamente compatto-. Si riscontra un NSPT medio intorno a 22 con un aumento di colpi alle maggiori profondità.
- Le ghiaie grigio piombo (Orizzonte 2) sono dotate di un Dr intorno agli 0.85 con un  $\phi$  maggiore di 38° - spessore mediamente compatto -. Si riscontrano valori di infissione ai 30 cm. molto buoni in media intorno ai 72-75 colpi.
- Le sabbie grigie e limi argillosi (Orizzonte 3) sono dotate Dr medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\phi$  intorno ai 35° - spessore mediamente sciolto -. Buoni i valori di infissione ai 30 cm. in media intorno ai 20 colpi.
- Per le sabbie con ghiaie marroni grigie (Orizzonte 4), visto la sporadica presenza in un solo sondaggio e ad una profondità considerevole abbiamo un solo valore che orienta verso un Dr tra i 0,15 ed i 0,35 con un  $\phi$  intorno ai 30-32° ed un valore di 8 colpi per infissione ai 30 cm.

Da quanto sinteticamente esposto si sottolinea la presenza dell'Orizzonte 1 che per sua natura litologica, risulta estremamente compressibile (specialmente negli spessori a prevalente scheletro organico). Sotto il profilo geotecnico è quindi prevedibile un cedimento

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

di una certa rilevanza in virtù degli spessori dello strato ed in funzione dei carichi e della loro tipologia.

Inoltre bisogna evidenziare che la diversità delle sequenze stratigrafiche dello strato, delle diverse composizioni granulometriche e dello spessore poggiate su un orizzonte tendenzialmente più compatto (sabbia ocra con assetti lenticolari di panchina pseudo-diagenizzati) può creare i presupposti di cedimento differenziale dovuto alla diversa risposta dello strato in termini di compressibilità.

#### **4.2 Grandezze fisiche calcolate dagli esiti analisi laboratorio**

Dai vari dati in ingresso pervenuti dalle analisi di laboratorio ed in particolare da: Contenuto di acqua (%), Peso in Volume (KN/mc) e Peso specifico dei granuli, secondo le formule riconosciute dall'AGI sono state ricavate – Tabella 5:

Indice dei vuoti (e)

Porosità (n)

Grado di saturazione (%)

Densità secca (KN/mc)

##### **4.2.1 Analisi granulometriche**

I dati sono stati sistematizzati in Tabella 6; qui di seguito vengono sintetizzati i risultati per ciascuno Orizzonte litologico:

##### **ORIZZONTE ZERO**

Lo spessore di riempimento della darsena, laddove compare risulta eterogeneo con elevata componente sabbiosa e ghiaiosa, ma anche con percentuali di limo.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale</b> <b>2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

### ORIZZONTE 1

Nello spessore con prevalenza di organico si rintracciano maggiori percentuali di sabbia e ghiaia, che mettono in evidenza un ambiente deposizionale in vicinanza di linee di riva ancora attive. In generale andando verso il basso (oltre i 7,00 m. di profondità) lo spessore con prevalenza di scheletro organico si intercala sempre più ad impasti sabbio-limosi, evidenza di un ambiente deposizionale in allontanamento dalla linea di riva (near-shore)<sup>35</sup>. Il marker stratigrafico dello spessore composto dalle sabbie grigio-verdi rimane più o meno uniforme in ogni livello di profondità con elevate percentuali di sabbia e limi

### ORIZZONTE 2

Le sabbie ocracee si presentano in realtà composte granulometricamente da un 75% di ghiaia e sabbia e per il 25% di limo ed argilla. La presenza di campioni con significativa percentuale di ghiaia costituisce un'evidenza sul fatto che questo spessore è definito dallo sgretolamento di livelli di Panchina. Le ghiaie che si intercalano alle sabbie ocracee risultano non completamente "pulite", ma impastate in matrici sabbio-limose

### ORIZZONTE 3

Gli spessori sabbioso fini non contengono scheletro ghiaioso, mentre si rintracciano percentuali significative di limo. Gli spessori limo-argillosi sono ovviamente composti di elevate percentuali di limo ed argilla, con percentuali di limo doppie di quelle delle argille. Le percentuali granulometriche di limo-argilla maggiori si riscontrano tra le fanerogame, ciò rientra nella natura generale della lito-genesi dello spessore con un impasto di materiale organico dovuto al succedersi dei moti ondosi. Con ogni probabilità in fase di stasi e forse più a largo, come parrebbe desumersi dalle analisi, vi era la possibilità maggiore di deposizione oltre che della componente organica di frazioni litologiche più piccole, mentre più vicino alla costa in posizione di risentimento dei moti ondosi poteva mescolarsi all'organico una frazione più grossolana composta da sabbia e ghiaia.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

#### 4.2.2 Prove edometriche

In Tabella 7 sono riportati i risultati derivanti dalle prove edometriche eseguite sui campioni prelevati durante la campagna geognostica di Gennaio-Febbraio 2008. Per ciascun campione sono indicati: la profondità di prelievo, una breve descrizione del litotipo in esame, l'Orizzonte litologico di appartenenza (secondo la suddivisione finora riportata), in valore dell'indice dei vuoti all'inizio della prova, il valore dell'indice di compressione e dell'indice di rigonfiamento e tre coppie di coefficienti di compressibilità con il relativo modulo edometrico ricavati per incrementi di pressione di 50,100 e 200 KPa.

#### 4.2.3 Prove triassiali consolidate drenate

In Tabella 8 sono stati riportati i risultati delle prove triassiali consolidate drenate eseguite su campioni prelevati nell'Orizzonte 1. In questo caso per ciascun campione è stata riportata la profondità e l'appartenenza all'Orizzonte di riferimento, le pressioni efficaci orizzontali (di confinamento) relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova, le pressioni efficaci verticali a rottura, la deformazione percentuale a rottura ed i moduli elastici relativi ai tre gradini di prova ricavati per ciascun provino in relazione alla deformazione percentuale a rottura. Nella stessa Tabella 8 per i 6 campioni sottoposti a prove triassiali consolidate drenate, sono stati ricavati i cosiddetti "cerchi di Mohr" costruendo – come da bibliografia – il diagramma Tensione tangenziale-Tensione normale e ricavando la coesione drenata  $c'$  e l'angolo di attrito  $\phi'$ .

Al fine di favorire la migliore lettura dei dati di laboratorio in Tabella 9 viene proposto un Quadro sinottico riepilogativo dei principali parametri geotecnici.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

**Tabella 3** : Dati generali dei campioni avviati ad analisi.

Sondaggio e Campione SnCn	Profondità Campione (m)	Descrizione Litotipo	Orizzonte Litologico di riferimento	Laboratorio terre
S1C1	12,00	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S1C2	21,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S1C3	42,50	Sabbia fine limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S3C1	15,00	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S3C2	18,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C1	9,00	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S4C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C3	21,00	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C1	9,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S5C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S6C1	12,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S6C2	15,00	Ghiaia in matrice sabbio-limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S6C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S7C1	10,50	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S7C2	15,00	Sabbia limosa grigio scura con inclusi torbosi	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S7C3	27,00	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S8C1	6,00	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S8C2	12,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S8C3	15,00	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico				
		Data: marzo 2013				
		10	010	RR	018	-0

**Tabella 4** : NSPT, Infissione 30 cm., Nspntmedio, Dr,  $\phi$

S<sub>n</sub>1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)

S1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento in progetto (2008)

Litotipo indagato	Profondità	N. S.P.T.	Infissione 30 cm	Dr	$\phi$	Riferimento Sondaggio
ORIZZONTE ZERO Massicciata scogliera	-5.50 m	4/7/12	19	--	--	S <sub>n</sub> 1
ORIZZONTE ZERO Riempimento darsena	-3.00 m	-/8/14	22	--	--	S <sub>n</sub> 5
	-3.50 m	5/5/5	10	--	--	S <sub>n</sub> 8
	-5.00 m	3/3/4	7	--	--	S <sub>n</sub> 13
	-5.00 m	10/13/6	19	--	--	S <sub>n</sub> 9
ORIZZONTE 1 Sabbie grigio verdi	-1.50 m	4/4/5	9	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 20
	-2.00 m	1/4/10	14	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 19
	-3.00 m	1/2/4	6	0.15-0.35	30-32°	S5
	-3.50 m	5/8/9	17	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 6
	-4.00 m	4/4/4	8	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 3
	-4.50 m	7/5/0	5	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 15
	-4.50 m	7/10/8	18	0.35-0.65	32-35°	S7
	-4.50 m	2/3/5	8	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 21
	-5.00 m	10/4/6	10	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 7
	-5.50 m	5/7/10	17	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 12
	-6.00 m	7/7/8	15	0.35-0.65	32-35°	S4
	-6.00 m	2/1/4	5	0.15-0.35	30-32°	S5
	-6.00 m	4/7/9	16	0.35-0.65	32-35°	S6
	-7.00 m	5/7/8	15	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 5
	-7.50 m	2/4/7	11	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 15
-7.50 m	6/6/12	18	0.35-0.65	32-35°	S7	
-9.00 m	4/10/12	22	0.35-0.65	32-35°	S3	
ORIZZONTE 1 Prevalenza di Fanerogame	-1.50 m	0/2/1	3	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 22
	-3.00 m	3/3/2	5	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 21
	-3.00 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 17
	-3.00 m	0/1/2	3	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 20
	-3.00 m	2/3/2	5	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 18
	-4.20 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 14
	-4.50 m	0/1/0.5	1.5	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 6
	-4.50 m	4/5/6	11	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 17
	-4.50 m	1/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 22
	-6.00 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 19
	-6.00 m	3/3/3	6	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 6
	-6.20 m	3/3/5	8	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 14
	-6.50 m	2/4/7	11	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 2
	-7.40 m	0/1/2	3	< 0.2	< 30°	S <sub>n</sub> 3
	-7.50 m	4/6/9	15	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 7
	-7.50 m	2/3/4	7	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 9
	-7.50 m	5/7/7	14	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 17
	-8.00 m	3/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 1
-9.00 m	1/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 5	
-12.00 m	7/9/12	21	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 4	
ORIZZONTE 1 Sabbie limose con fanerogame	-4.00 m	11/15/14	29	0.35-0.65	32-35°	S8
	-12.00 m	4/8/8	16	0.35-0.65	32-35°	S2
	-12.00 m	3/4/5	9	0.15-0.35	30-32°	S3
	-12.00 m	3/4/5	9	0.15-0.35	30-32°	S4

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

**Tabella 5** : Grandezze fisiche calcolate

Dati in ingresso: Contenuto di acqua (%), Peso di Volume (KN/mc), Peso specifico dei granuli

Sondaggio e Campione SnCn	Profondità Campione (m)	Descrizione Litotipo	Indice dei vuoti (e)	Porosità (n)	Grado di saturazione (%)	Densità secca (KN/m <sup>3</sup> )
S1C1	12,00	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe	0,910	0,476	100	13,7
S1C2	21,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	1,174	0,540	97,6	12,00
S1C3	42,50	Sabbia fine limosa grigio piombo	-	-	-	-
S3C1	15,00	Sabbia limosa grigio-verde	0,834	0,455	99,8	14,00
S3C2	18,00	Sabbia limosa grigio piombo	0,845	0,458	96,9	14,1
S4C1	9,00	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe	0,871	0,466	100	14,1
S4C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	1,057	0,514	100	13,1
S4C3	21,00	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi	1,564	0,61	99,5	10,4
S4C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	-	-	-	-
S5C1	9,00	Limo argilloso grigio	0,967	0,492	97,3	13,6
S5C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	0,923	0,480	100	13,96
S5C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	1,469	0,595	100	10,86
S5C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	-	-	-	-
S6C1	12,00	Limo argilloso grigio	0,949	0,487	93,8	13,7
S6C2	15,00	Ghiaia in matrice sabbio-limosa grigio piombo	-	-	-	-
S6C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo	1,137	0,532	100	12,6
S7C1	10,50	Limo argilloso grigio	0,883	0,469	98,2	14,1
S7C2	15,00	Sabbia limosa grigio scura con inclusi torbosi	1,638	0,621	92,3	9,4
S7C3	27,00	Argilla limosa grigio piombo	0,852	0,46	100	14,6
S8C1	6,00	Sabbia limosa grigio-verde	0,855	0,461	99,3	14,4
S8C2	12,00	Limo argilloso grigio	1,005	0,501	100	13,3
S8C3	15,00	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi	1,02	0,505	94,8	12,5

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

**Tabella 6:** Analisi granulometriche

Legenda: S<sub>n</sub>1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)  
S1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento in progetto (2008)

Orizzonte litologico	Sondaggio	Profondità campione (m.)	GHIAIA %	SABBIA%	LIMO %	ARGILLA%
Riempimento darsena (ORIZZONTE ZERO)	S <sub>n</sub> 8	3.50	12,57	52,43	28,87	6,13
	S <sub>n</sub> 9	5.00	71,31		28,69	
Spessori con prevalenza di organico (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 20	3.50	82,19		17,81	
	S <sub>n</sub> 8	5.00	75,59		24,41	
	S <sub>n</sub> 14	5.50	85,15		14,85	
	S <sub>n</sub> 6	6.50	5,62	55,38	38,57	0,43
	S <sub>n</sub> 19	6.50	67,68		32,32	
Limo argilloso con fanerogame (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 7	7.50	0,24	17,76	58,70	23,30
	S <sub>n</sub> 9	7.50	6,18	45,82	36,87	11,13
	S <sub>n</sub> 4	10.00	3,63	48,37	39,79	8,21
	S7	10,50	0,00	5,00	63,00	32,00
Sabbie grigio verdi (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 6	3.00	11,17	25,83	48,70	14,30
	S <sub>n</sub> 6	3.50	48,14	17,87	26,30	7,70
	S <sub>n</sub> 6	4.50	0,00	67,00	29,12	3,88
	S <sub>n</sub> 7	5.00	0,00	59,00	35,94	5,06
	S8	6,00	0,00	97,00	2,40	0,60
	S3	15,00	0,40	77,60	17,50	4,50
Sabbie ocre (ORIZZONTE 2)	S <sub>n</sub> 22	7.50	35,16	32,84	29,70	2,30
	S <sub>n</sub> 18	8.50	8,03	62,97	22,21	6,79
	S <sub>n</sub> 17	8.50	87,51		12,49	
	S <sub>n</sub> 15	9.00	7,67	62,33	29,66	0,34
	S <sub>n</sub> 16	9.50	75,14		24,86	
Ghiaie grigie in matrice sabbiosa (ORIZZONTE 2)	S6	15,00	52,40	22,60	18,00	7,00
Sabbia fine debolmente argillosa con inclusi ghiaiosi (ORIZZONTE 3)	S1	12,00	25	60	7	8
	S4	15,00	0,20	1,80	57,30	40,70
	S1	42,00	0,00	76	19,6	4,4
	S4	43,00	0,00	76,00	24,00	0,00
	S5	43,00	0,00	70,00	30,00	0,00
Limo argilloso grigio piombo (ORIZZONTE 3)	S4	9,00	0,00	6,00	66,00	28,00
	S5	9,00	0,00	7,00	62,00	31,00
	S6	12,00	0,00	3,00	60,00	37,00
	S8	12,00	0,00	3,00	64,00	33,00
	S5	15,00	0,10	0,90	67,10	31,90

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Inquadramento geologico e geotecnico					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

Tabella 7

Tabella 7: Dati derivanti dalle prove edometriche

N° Campione	Profondità* (m)	Descrizione litotipo	Orizzonte Litologico di riferimento	$\sigma_v$	$m_v$ (50 kPa)	$E_d$ (50 kPa)	$m_v$ (100 kPa)	$E_d$ (100 kPa)	$m_v$ (100 kPa) * (100 kPa)	$E_d$ (100 kPa) * (100 kPa)	$m_v$ (200 kPa)	$E_d$ (200 kPa) * (200 kPa)	$C_c$	$C_u$	
S1C1	12,0-12,5	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusioni ghiaiose. Presenza di pezzi di molluschi e alghe	Orizzonte 1	0,820	1,29 * 10 <sup>4</sup>	7756	0,807	10143	6,798	10143	6,46 * 10 <sup>5</sup>	15488	0,787	0,011	
S1C2	21,0- 21,5	Argilla limosa grigia piumbo con inclusi torbani.	Orizzonte 3	1,224	9,74 * 10 <sup>4</sup>	1027	1,134	1504	1,063	3886	4,53 * 10 <sup>4</sup>	2206	0,909	0,12	
S3C2	18,0-18,5	Sabbia limosa grigio piumbo.	Orizzonte 3	1,037	4,37 * 10 <sup>4</sup>	2290	0,993	3886	0,964	3886	1,94 * 10 <sup>4</sup>	5155	0,926	0,05	
S4C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio. Presenza di alghie.	Orizzonte 1	0,888	4,68 * 10 <sup>4</sup>	2136	0,812	3766	0,789	3766	1,43 * 10 <sup>4</sup>	7013	0,764	0,026	
S4C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piumbo.	Orizzonte 3	1,185	4,67 * 10 <sup>4</sup>	2142	1,146	2838	1,108	2838	2,78 * 10 <sup>4</sup>	3593	1,050	0,373	0,14
S4C3	21,0-21,5	Argilla limosa grigia piumbo con inclusi torbani.	Orizzonte 3	1,235	7,25 * 10 <sup>4</sup>	1380	1,168	1793	1,107	1793	3,75 * 10 <sup>4</sup>	2664	1,028	0,362	0,141
S5C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,94	5,65 * 10 <sup>4</sup>	1769	0,822	2601	0,788	2601	2,47 * 10 <sup>4</sup>	4043	0,744	0,233	0,037
S5C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piumbo.	Orizzonte 3	0,906	4,11 * 10 <sup>4</sup>	2434	0,874	3522	0,847	3522	2,15 * 10 <sup>4</sup>	4658	0,807	0,227	0,07
S5C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigia piumbo con inclusi torbani.	Orizzonte 3	1,294	7,26 * 10 <sup>4</sup>	1378	1,228	1939	1,171	1939	3,42 * 10 <sup>4</sup>	2921	1,096	0,321	0,15
S6C1	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,971	6,44 * 10 <sup>4</sup>	1554	0,876	2667	0,839	2667	2,33 * 10 <sup>4</sup>	4299	0,792	0,246	0,053
S6C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigia piumbo.	Orizzonte 3	1,230	1,09 * 10 <sup>5</sup>	917	1,118	1300	1,056	1300	5,17 * 10 <sup>4</sup>	1933	0,931	0,376	0,13
S7C1	10,5-11,0	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,797	5,6 * 10 <sup>4</sup>	1784	0,692	2598	0,657	2598	2,42 * 10 <sup>4</sup>	4127	0,614	0,233	0,035
S7C2	15,0-15,5	Sabbia limosa grigia scura con inclusioni torbani.	Orizzonte 1	1,854	1,14 * 10 <sup>5</sup>	873	1,726	1209	1,613	1209	5,78 * 10 <sup>4</sup>	1731	1,462	0,623	0,2
S7C3	27,0-27,5	Argilla limosa grigia piumbo.	Orizzonte 3	0,900	2,25 * 10 <sup>4</sup>	4450	0,884	5165	0,866	5165	1,22 * 10 <sup>4</sup>	8183	0,843	0,186	0,09
S8C2	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,974	7,92 * 10 <sup>4</sup>	1263	0,869	1865	0,82	1865	3,64 * 10 <sup>4</sup>	2749	0,755	0,298	0,069
S8C3	15,0-15,5	Limo sabbioso grigio piumbo con inclusi torbani.	Orizzonte 3	1,185	5,22 * 10 <sup>4</sup>	1916	1,123	2692	1,084	2692	2,78 * 10 <sup>4</sup>	3600	1,026	0,264	0,035

(\*) = la profondità deve intendersi riferita al piano campagna nel punto di sondaggio.

$\sigma_v$  = indice dei vuoti riferito alla prova edometrica.

$m_v$  = coefficiente di compressibilità volumetrica (il valore è da riferirsi al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente).

$E_d$  = modulo edometrico (il valore è da riferirsi al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente).

$m_v$  (50 kPa);  $m_v$  (100 kPa);  $m_v$  (200 kPa) = indice dei vuoti corrispondente al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente.

$C_c$  = indice di compressione calcolato come la variazione dell'indice dei vuoti in un ciclo logaritmico di incrementi di pressione durante la fase di carico.

$C_u$  = indice di rigonfiamento calcolato come la variazione dell'indice dei vuoti in un ciclo logaritmico di decrementi di pressione durante la fase di scarico.

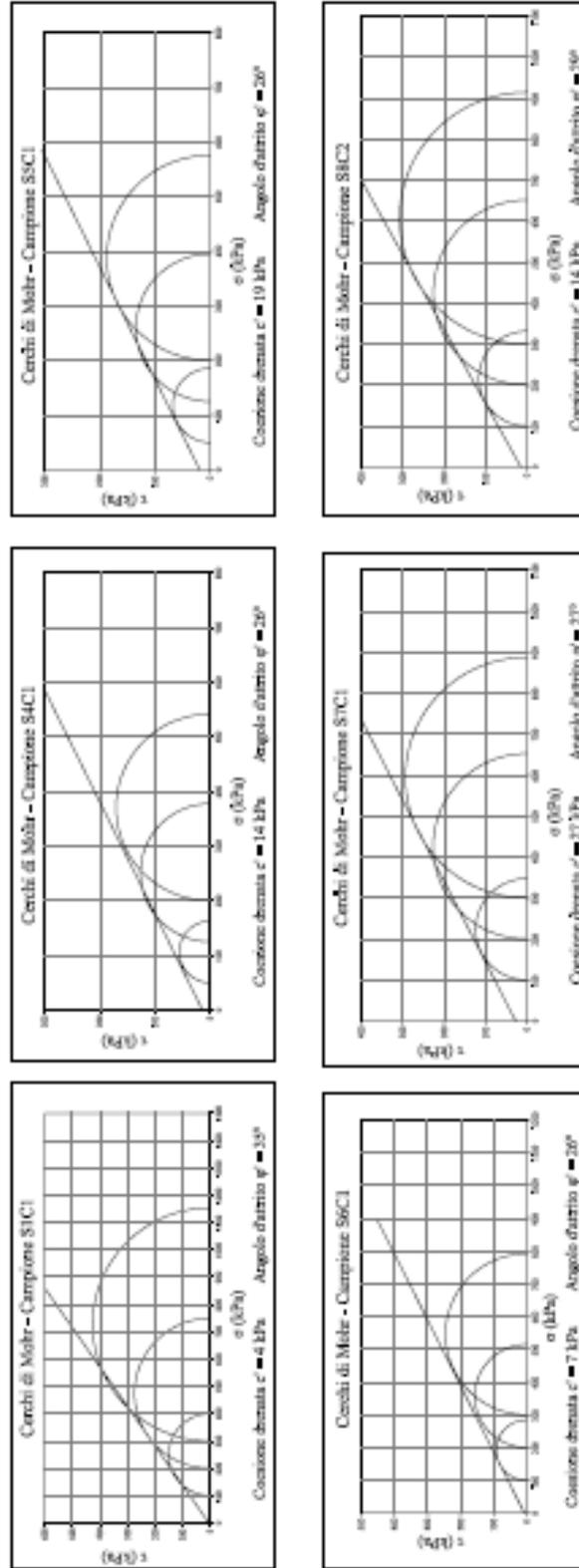


Tabella 8

Tabella 8: Dati derivanti dalle prove triassiali consolidate drenate.

Sottogruppo e Campione S4, C4	Profondità* (m)	Descrizione litologica	Orientamento litologico di riferimento	Ph <sub>1</sub> (kPa)	Pe (kPa)	σ <sub>1</sub> (%)	E <sub>1</sub> (kPa)	Ph <sub>2</sub> (kPa)	Ph <sub>3</sub> (kPa)	Pr <sub>3</sub> (kPa)	σ <sub>3</sub> (%)	E <sub>3</sub> (kPa)
S4C1	12,0-12,5	Sabbia fine, sabbie medie e ghiaie, con alcuni ciottoli e frammenti di gusci di molluschi e alghe.	Orizzontale 1	100	401	9,0	3337	200	750	1154	10,7	8911
S4C2	9,0-9,5	Lima argillosa grigia. Presenza di sili.	Orizzontale 1	50	163	20,3	557	125	378	542	19,5	1748
S4C3	9,0-9,5	Lima argillosa grigia.	Orizzontale 1	50	186	9,2	1484	125	395	578	19,4	1935
S4C4	12,0-12,5	Lima argillosa grigia.	Orizzontale 1	100	285	16,4	1127	200	515	792	16,1	3054
S4C5	10,5-11,0	Lima argillosa grigia.	Orizzontale 1	100	348	11,7	1808	200	653	888	16,7	5525
S4C6	12,0-12,5	Lima argillosa grigia.	Orizzontale 1	100	352	15,1	1536	200	652	915	16,0	3859

Ph<sub>1</sub>, Ph<sub>2</sub>, Ph<sub>3</sub> = pressioni efficaci orizzontali (di riferimento) relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova.  
Pr<sub>3</sub>, Pe = pressioni efficaci verticali e sovrappresse relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova.  
σ<sub>1</sub>, σ<sub>3</sub> = deformazione percentuale a rottura.  
E<sub>1</sub>, E<sub>3</sub> = moduli elastici relativi ai tre provini di prova rilevati per ciascuna prova in relazione alla deformazione percentuale a rottura.



 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	<b>Raggruppamento:</b> Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	<b>Titolo Elaborato:</b> Inquadramento geologico e geotecnico					
		<b>Data:</b> marzo 2013					
		10	010	RR	018	-0	GEO

Tabella 9

Tabella 9: Quadro sintetico riassume dei principali parametri.

N° campione	Profondità* (m)	Litologia	Orizzonte litologico	γ (kN/mc)	W (%)	% ghiaie	% sabbie	% limo	% argilla	LL (%)	LP (%)	c' (kPa)	φ' (°)	ε <sub>v</sub>	K <sub>v1</sub> (cm/s)	K <sub>v2</sub> (cm/s)
S1C1	12,0-12,5	Sabbia fine decolorata argillosa, grigia, con inclusioni ghiaiose	Orizzonte 1	18,4	34	25	60	7	8	22	21	4 (a)	35 (a)	0,82	1,1 * 10 <sup>-7</sup>	3,3 * 10 <sup>-6</sup>
S1C2	21,0-21,5	Argilla limosa grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 3	17,27	48,87	-	-	-	-	60	34	3,3 (b)	22 (b)	1,224	1,34 * 10 <sup>-8</sup>	-
S1C3	42,5-43,0	Sabbia fine limosa grigio-nera	Orizzonte 3	-	-	0	76	19,6	4,4	-	-	-	-	-	-	-
S3C1	15,0-15,5	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	18,54	32,51	0,4	77,6	17,5	4,5	-	-	-	-	-	-	2,63 * 10 <sup>-6</sup>
S3C2	18,0-18,5	Sabbia limosa grigio-nera	Orizzonte 3	18,54	31,62	-	-	-	-	34	26	10,8 (b)	26,3 (b)	1,037	6,97 * 10 <sup>-6</sup>	-
S4C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 1	18,6	32,5	0	6	66	28	33	25	14 (a)	26 (a)	0,888	1,1 * 10 <sup>-7</sup>	1,5 * 10 <sup>-7</sup>
S4C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio-nera	Orizzonte 3	18,24	39,46	0,2	1,8	57,3	40,7	57	31	12,2 (b)	20,4 (b)	1,185	7,29 * 10 <sup>-6</sup>	-
S4C3	21,0-21,5	Argilla limosa grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 3	16,47	58,37	-	-	-	-	57	31	3,7 (b)	21,8 (b)	1,235	1,19 * 10 <sup>-6</sup>	-
S4C4	43,0-43,5	Sabbia limosa grigio-nera	Orizzonte 3	-	-	0	76	24	0	-	-	-	-	-	-	-
S5C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio-nera	Orizzonte 1	18,3	34,6	0	7	62	31	33	23	19 (a)	26 (a)	0,940	6,2 * 10 <sup>-6</sup>	1,8 * 10 <sup>-7</sup>
S5C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio-nera	Orizzonte 3	18,78	34,53	0,1	0,9	67,1	31,9	45	24	3 (b)	21,6 (b)	0,906	1,85 * 10 <sup>-8</sup>	-
S5C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 3	16,82	54,81	-	-	-	-	56	35	-	-	1,294	1,55 * 10 <sup>-8</sup>	-
S5C4	43,0-43,5	Sabbia limosa grigio-nera	Orizzonte 3	-	-	0	70	30	0	-	-	-	-	-	-	-
S6C1	12,0-12,5	Limo argilloso grigio-nera	Orizzonte 1	18,2	32,7	0	3	69	37	38	21	7 (a)	26 (a)	0,971	1,3 * 10 <sup>-7</sup>	5,6 * 10 <sup>-6</sup>
S6C2	15,0-15,5	Chena in matrici sabbia-limo grigio-nera	Orizzonte 3	-	-	32,4	25,6	18	7	30	NP	-	-	-	-	-
S6C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigio-nera	Orizzonte 3	17,92	42,45	-	-	-	-	57	30	0 (b)	22,1 (b)	1,230	9,12 * 10 <sup>-8</sup>	-
S7C1	10,5-11,0	Limo argilloso con laminae	Orizzonte 1	18,6	32,0	0	5	63	32	32	21	27 (a)	27 (a)	0,797	6,4 * 10 <sup>-6</sup>	3,3 * 10 <sup>-7</sup>
S7C2	15,0-15,5	Sabbia limosa grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 1	15,13	61,18	-	-	-	-	58	37	21,1 (b)	29,8 (b)	1,854	3,62 * 10 <sup>-8</sup>	-
S7C3	27,0-27,5	Argilla limosa grigio-nera	Orizzonte 3	19,21	31,86	-	-	-	-	43	29	20,5 (b)	21,8 (b)	0,900	1,44 * 10 <sup>-8</sup>	-
S8C1	6,00-6,5	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	18,98	31,96	0	97	2,4	0,6	26	NP	12,3 (b)	39,3 (b)	-	-	4,4 * 10 <sup>-7</sup>
S8C2	12,0-12,5	Limo argilloso grigio-nera	Orizzonte 1	18,2	36,9	0	3	64	33	34	19	14 (a)	29 (a)	0,974	6,2 * 10 <sup>-6</sup>	2,2 * 10 <sup>-7</sup>
S8C3	15,0-15,5	Limo argilloso grigio-nera con inclusioni torbide	Orizzonte 3	17,29	38,11	-	-	-	-	25	NP	17,9 (b)	30,2 (b)	1,185	4,84 * 10 <sup>-7</sup>	-

(\*) = la profondità deve intendersi riferita al piano campagna nel punto di sondaggio.

γ = peso di volume del terreno.

W = contenuto in acqua

LL = limite liquido

LP = limite plastico

(a) = parametri calcolati per mezzo di prove triassiali consolidate drenate

(b) = parametri calcolati per mezzo di prove di taglio consolidate drenate

ε<sub>v</sub> = indice dei vuoti

K<sub>v1</sub> = coefficiente di permeabilità calcolato per mezzo di prove a carico variabile in cella edometrica

K<sub>v2</sub> = coefficiente di permeabilità calcolato per mezzo di prove a carico costante in cella triassiale