



MINISTERO DELLE
INFRASTRUTTURE E
DEI TRASPORTI



E.N.A.C.
ENTE NAZIONALE per
L'AVIAZIONE CIVILE

Committente Principale



AEROPORTO INTERNAZIONALE DI FIRENZE - "AMERIGO VESPUCCI"

Opera

PROJECT REVIEW - PIANO DI SVILUPPO AEROPORTUALE AL 2035

Titolo Documento Completo

Aspetti Geologici e Geomorfologici
Relazione Geologica con la parametrizzazione del terreno

Livello di Progetto

PIANO DI SVILUPPO AEROPORTUALE - MASTERPLAN

LIV	REV	DATA EMISSIONE	SCALA	CODICE FILE COMPLETO
PSA	01	03/2023		FLR-MPL-PSA-GE01-001-GL-RT_Rel Geo Par Terr
				TITOLO RIDOTTO Rel Geo Par Terr

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
01	03/2023	Emissione per trasmissione ad ENAC	TERRA E OPERE	M.SANI	L.TENERANI
00	09/2022	Emissione per Dibattito Pubblico	TERRA E OPERE	M.SANI	L.TENERANI

COMMITTENTE PRINCIPALE	PROGETTAZIONE	SUPPORTI SPECIALISTICI
 ACCOUNTABLE MANAGER Dott. Vittorio Fanti	 DIRETTORE TECNICO Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631	 TERRA & OPERE S.R.L. SOCIETÀ D'INGEGNERIA CONSULENZE GEOLOGICHE PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Dott. Geol. Michele Sani Ordini dei Geologi della Toscana n°383
POST HOLDER PROGETTAZIONE Ing. Lorenzo Tenerani POST HOLDER MANUTENZIONE Ing. Nicola D'ippolito POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO Geom. Luca Ermini	RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631	

È SEVERAMENTE VIETATA LA RIPRODUZIONE E/O LA CESSIONE A TERZI SENZA AUTORIZZAZIONE DELLA COMMITTENTE

GRUPPO DI LAVORO

responsabile di commessa e coordinamento
dr. geol. Michele Sani

collaborazione
testi: dr. geol. Fabio Picchi
figure e tavole fuori testo: dr.geol. Paride Bigazzi

INDICE

1. Premessa.....	6
1.1. Generalità.....	6
2. Fasi di lavoro.....	7
3. Geologia.....	8
3.1. Evoluzione tettonica del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia.....	8
3.2. Geologia e stratigrafia della Piana di Firenze.....	10
3.2.1. <i>Substrato pre-lacustre</i>	10
3.2.2. <i>Depositi pre-lacustri</i>	11
3.2.3. <i>Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano</i>	11
3.2.4. <i>Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia</i>	11
3.2.4.1. Argille turchine AUCTT.....	11
3.2.4.2. Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti.....	12
3.2.5. <i>Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)</i>	12
3.2.6. <i>Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)</i>	13
3.3. Orizzonti “Firenze”.....	13
3.3.1. <i>Orizzonte “Firenze 1”</i>	13
3.3.2. <i>Orizzonte “Firenze 2”</i>	14
3.3.3. <i>Orizzonte “Firenze 3”</i>	15
3.3.4. <i>Orizzonte “Firenze 4”</i>	16
3.3.4.1. Considerazioni sull’andamento degli orizzonti “Firenze”.....	17
3.4. Geologia dell'area di intervento.....	19
3.4.1. <i>Unità Tettoniche Liguri – Unità di Monte Morello</i>	19
3.4.1.1. Formazione di Monte Morello (MLL).....	19
3.4.2. <i>Depositi olocenici</i>	20
3.4.2.1. Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna1 e bna2).....	20
3.4.2.2. Alluvioni recenti (Ac).....	20
3.4.2.3. Depositi alluvionali attuali (b).....	20
3.4.2.4. Depositi colluviali (b7).....	20
3.4.2.5. Depositi antropici, terreni di riporto e bonifica per colmata (h5).....	21
3.4.2.6. I Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi [h1].....	21
4. Idrogeologia.....	21
4.1. Aspetti idrogeologici generali.....	21
4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame.....	22
4.3. Superficie piezometrica.....	24
5. Geomorfologia e stabilità.....	25
5.1. Introduzione.....	25
5.1.1. <i>Forme di origine antropica</i>	27
5.1.2. <i>Depositi quaternari di versante</i>	27
5.1.3. <i>Forme dovute e processi fluviali</i>	27
6. Risultati delle indagini eseguite.....	27
6.1. Generalità.....	27
6.2. Pozzetti geognostici.....	28
6.3. Prove penetrometriche.....	29
6.3.1. <i>Prove penetrometriche statiche (CPT)</i>	29
6.3.2. <i>Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)</i>	49
6.4. Prova dilatometrica.....	72
6.5. Sondaggi a carotaggio continuo.....	80

6.5.1. Campagna del 2015.....	80
6.5.2. Campagna del 2017.....	84
6.5.2.1. Standard Penetration Test.....	90
6.6. Prove geotecniche di laboratorio.....	92
6.7. Indagini geofisiche.....	97
6.7.1. Sismica a rifrazione.....	97
6.7.2. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).....	98
6.7.3. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR).....	99
6.7.4. Indagine sismica in foro downhole.....	100
7. Sismicità e definizione dei parametri sismici.....	101
7.1. Zona sismica.....	101
7.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato).....	102
7.3. Categoria topografica.....	102
8. Modellazione geologica.....	102
8.1. Sezioni litologiche.....	102
8.2. Modello geologico del sottosuolo.....	103
9. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali.....	104
10. Valutazioni sulla possibile liquefazione dei terreni.....	104
11. Terre e rocce da scavo.....	105
12. Conclusioni.....	105
13. Bibliografia.....	107

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi et al., 1976b).	14
---	----

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classi di permeabilità.	23
Tabella 2 - Misure piezometriche nei piezometri della campagna del 2015..	26
Tabella 3 - Misure piezometriche nei piezometri della campagna del 2017..	26
Tabella 4 - Campioni indisturbati della campagna del 2015.	84
Tabella 5 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi.	86
Tabella 6 - Campioni indisturbati della campagna del 2017.	90
Tabella 7- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT}	92
Tabella 8 - Prove geotecniche di laboratorio “specifiche” eseguite sui campioni indisturbati del 2015. ..	95
Tabella 9 - Prove geotecniche di laboratorio “specifiche” eseguite sui campioni indisturbati del 2017. ..	97
Tabella 10 - Valori $V_{s_{eq}}$	99
Tabella 11 - Valori $V_{s_{eq}}$ calcolati a partire dal p.c..	101
Tabella 12- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	105

TAVOLE FUORI TESTO

Carta geologica
 Carta idrogeologica
 Carta geomorfologica

Ubicazione delle indagini geognostiche

Sezione litostratigrafica 1

Sezione litostratigrafica 2

Sezione litostratigrafica 3

Sezione litostratigrafica 4

Sezione litostratigrafica 5

Sezione litostratigrafica 6

Sezione litostratigrafica 7

Sezione litostratigrafica 8

Sezione litostratigrafica 9

Sezione litostratigrafica 10

Sezione litostratigrafica 11

Sezione litostratigrafica 12

* * *

1. Premessa

1.1. Generalità

Il presente documento costituisce la Relazione Geologica Generale di inquadramento, parte integrante della proposta di project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale al 2035 dell'aeroporto di Firenze.

Il citato approfondimento tecnico si inserisce a supporto della sezione generale e complessiva della proposta di Piano di Sviluppo Aeroportuale, rispetto alla quale si pone l'obiettivo di fornire ulteriori elementi tecnici di studio, dettaglio, analisi e progettazione, con l'intento di costituire un ulteriore strumento di supporto informativo, conoscitivo e valutativo, ad integrazione di quanto già unitariamente descritto negli elaborati generali di Masterplan.

Le informazioni di seguito riportate vanno, pertanto, analizzate in stretta correlazione rispetto ai più ampi ed estesi aspetti tecnico-economici trattati all'interno dei citati documenti generali di Masterplan, con i quali esse si relazionano secondo un processo capillare di progressivo approfondimento e dettaglio, ritenuto utile per una più completa, consapevole e piena visione dell'insieme delle previsioni di trasformazione dello scalo aeroportuale e delle aree circostanti, e per una più esauriente interpretazione della proposta di Piano, in esito alla quale poter esprimere considerazioni e osservazioni di competenza.

Come noto, l'intera proposta di project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale al 2035 dell'aeroporto di Firenze dialoga con le previsioni di cui al precedente Masterplan 2014-2029, integrandone però gli indirizzi e le finalità, ottimizzandone i livelli di sostenibilità ambientale, territoriale e sociale, e pervenendo a soluzioni tecniche ancor più performanti e allineate alle esigenze degli utenti, degli operatori e dell'intero territorio.

Conseguentemente, anche il presente intervento relativo alla duna antirumore mira ad una più efficace contestualizzazione delle opere rispetto ai rinnovati indirizzi di Piano, muovendo tuttavia a partire dalle risultanze delle numerose e approfondite indagini, analisi, misurazioni, studi e verifiche e, più in generale, dall'ampio quadro conoscitivo del contesto interessato, che il gestore aeroportuale ha avuto modo di definire nel corso di più anni a partire proprio dalla definizione del precedente Masterplan.

Si auspica, infine, di aver esaurientemente e correttamente recepito all'interno della presente fase di project review le molteplici istanze, osservazioni, argomentazioni, indicazioni e valutazioni raccolte nel corso dei numerosi momenti di confronto dialettico susseguitisi con i vari stakeholders interessati, e di essere così pervenuti ad una definizione tecnica che, seppur passibile di ulteriori migliorie e modifiche, possa rappresentare comunque un solido e condiviso punto di partenza per il successivo percorso di valutazione ed autorizzazione.

Il presente studio descrive le caratteristiche geologiche (litologiche e giaciture), idrogeologiche, idrauliche, geomorfologiche e di stabilità, di pericolosità (geologica, idraulica e sismica) dell'area in oggetto, riassume i risultati delle indagini geognostiche eseguite nel 2015 e nel 2017 per le due fasi della *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, determina le classi di fattibilità dell'intervento (geologica, idraulica e sismica), e contiene la modellazione geologica, geotecnica e sismica del terreno.

2. Fasi di lavoro

La presente relazione geologica è stata articolata nelle seguenti fasi di lavoro:

- consultazione delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Piano Strutturale intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino e al Secondo Regolamento Urbanistico del Comune di Sesto Fiorentino;
- consultazione delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Regolamento Urbanistico del Comune di Signa;
- consultazione delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Piano Strutturale del Comune di Firenze (Variante al P.S. 2010) adottato con Deliberazione C.C. n. 2015/C/00025 del 02 aprile 2015;
- consultazione degli *studi geologici e idrologici-idraulici* di supporto al P.S. - Piano Strutturale del Comune di Campi Bisenzio, approvato con deliberazione C.C. n. 221 del 28/10/2021;
- presa visione del Piano di Bacino del Fiume Arno – Stralcio Assetto idrogeologico (PAI - Norme di attuazione ed allegati) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;

- presa visione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;
- esecuzione di alcuni sopralluoghi sul posto e nelle aree immediatamente limitrofe, per prendere visione della situazione attuale, per la comprensione della situazione geomorfologica e della stabilità generale del sito;
- utilizzo delle indagini geognostiche che costituivano la *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale Amerigo Vespucci di Firenze eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., nel 2015 e nel 2017;
- analisi dei risultati delle indagini geognostiche a disposizione per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione (si veda il § 6);
- definizione della categoria di sottosuolo secondo l'approccio semplificato ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (si veda il § 7.1)
- elaborazione del modello geologico del sito (§ 8);
- valutazioni in merito alla suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione (§ 10).

3. Geologia

3.1. Evoluzione tettonica del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia

Il bacino di Firenze-Prato-Pistoia, posto ad una quota media di 45 m s.l.m., si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di 45 km ed una larghezza massima di circa 10 km. Esso è delimitato a nord-nord-est dai Monti della Calvana e dal Monte Morello, con altitudine di circa 900 m s.l.m. e a sud-sudovest dal Montalbano con altitudine di oltre 600 m s.l.m.. In questo contesto geografico è prevista la realizzazione della nuova pista, delle opere accessorie e di quelle di compensazione dell'Aeroporto Internazionale Amerigo Vespucci di Firenze. Il bacino di Firenze-Prato-Pistoia presenta una geometria a semi-graben fortemente asimmetrica, con un margine nord-orientale molto acclive, in corrispondenza della faglia principale di Fiesole e da una rampa di raccordo poco inclinata localmente interessata da faglie minori sul versante sud-occidentale. I depositi di riempimento del bacino si sono sviluppati con ampi delta e fan-delta clastici sviluppati alla base del sistema di faglie maggiori. In questo tipo di bacini il

sollevamento tettonico dei margini, e il corrispondente allargamento del drenaggio fluviale, portano alla formazione di potenti sequenze sedimentarie clastiche grossolane in corrispondenza delle aree centrali. Nel dettaglio, dal punto di vista tettonico-geometrico, l'area di Firenze è caratterizzata dalla presenza di una fascia interessata da più faglie disposte a gradinata e in parte sepolte al di sotto dei depositi fluvio-lacustri villafranchiani, localizzata nell'area pedemontana a nord della pianura di Firenze, e dalla presenza delle faglie sepolte Castello-Scandicci e Maiano-Bagno a Ripoli che interessano il substrato pre-lacustre, trasversalmente al bacino. Le faglie controllano la morfologia dell'area fiorentina determinando, rispetto al basso morfologico-strutturale della pianura di Firenze, l'alto delle colline di Castello-Trespiano-Fiesole nel settore settentrionale, e delle colline di Bellosguardo-Arcetri-S.Miniato a Monte a sud della città. L'area fiorentina risulta quindi delimitata a nord da lineamenti tettonici paralleli con direzione NNO-SSE, che hanno giocato come faglie a movimento verticale distensivo determinando lo sviluppo del bacino fluvio-lacustre con il ribassamento del blocco meridionale. La principale attività delle faglie è riferita a un periodo anteriore al Pliocene inferiore, periodo in cui si è determinato il maggiore movimento verticale; successivamente si è registrata una ripresa di movimenti al tetto del Pliocene inferiore, a cui è associato il movimento verticale responsabile dell'origine della depressione lacustre, e un'ultima pulsazione al termine del Villafranchiano, che ha determinato il sollevamento del blocco di Firenze rispetto al resto del lago e ha stabilito i rapporti tettonico-geometrici attuali. La master fault, a cui viene attribuito il principale movimento verticale, è manifestata da una scarpata tettonica che ha determinato lo sviluppo dei ripidi versanti meridionali delle colline di Castello-Monte Rinaldi-Fiesole; in realtà si tratta di una zona interessata da varie faglie disposte a gradinata, di cui solo la più orientale affiora con la scarpata degradata dei versanti di Fiesole, mentre le altre sono sepolte sotto i depositi villafranchiani di San Domenico, o addirittura sotto l'area delle Cure-Campo di Marte. Tali faglie sono dislocate da lineamenti tettonici trasversali che interessano il substrato con generali direzioni NNE-SSO, e il cui movimento risulta prevalentemente verticale distensivo. Le faglie a carattere prevalentemente distensivo, di Castello-Scandicci a ovest e di Maiano-Bagno a Ripoli a est, sono risultate attive a più riprese a partire dal Pliocene inferiore, giocando successivamente, verso la fine del Villafranchiano, un ruolo determinante per il sollevamento dell'area fiorentina rispetto al restante bacino lacustre.

Questi elementi strutturali hanno sollevato la pianura di Firenze, ribassando il blocco a NO nel caso della faglia occidentale, e il blocco a SE per la faglia orientale con un rigetto globale stimabile in alcune centinaia di metri. Nel Villafranchiano sono state documentate due fasi tettoniche lungo tali lineamenti, probabilmente in regime compressivo, in accordo con evidenze regionali. Nella zona nord-orientale dell'area fiorentina lungo le colline di Fiesole-Monte Rinaldi, il motivo strutturale è dato da una piega anticlinale con asse orientato NO-SE, delimitato a SO dalla omonima zona di faglia che mette in contatto le arenarie torbiditiche del Macigno con i depositi recenti fluvio-lacustri; la struttura è interessata da faglie minori ad andamento NE-SO e prevalente movimento verticale. L'assetto tettonico delle Unità Liguri affioranti a NO di Firenze e nell'area meridionale è dato da una blanda monoclinale immergente in genere verso N-NE di valori medi ($<40^\circ$). I depositi lacustri Villafranchiani risultano dislocati dalle faglie sinsedimentarie trasversali al bacino, ma mantengono una giacitura sub-orizzontale su entrambi i blocchi dislocati; i depositi alluvionali recenti e attuali sono ancora in giacitura primaria. Per nessuna delle faglie presenti nella zona ci sono indizi geologici di attività tettonica più recente di circa 500.000 anni.

3.2. Geologia e stratigrafia della Piana di Firenze

Il sottosuolo della piana di Firenze è costituito da sedimenti plio-quadernari di riempimento del bacino fluvio-lacustre formatosi a seguito della fase tettonica distensiva, depositi sulle rocce del paleoinvaso. Nei paragrafi seguenti si descrivono le unità litostratigrafiche presenti, a partire dai terreni più antichi.

3.2.1. Substrato pre-lacustre

Il substrato pre-lacustre è costituito da rocce appartenenti alle Unità Liguri, ed è composto, in particolare, dai calcari marnosi, dalle calcareniti e dalle argilliti della Formazione di Sillano e dalle arenarie calcaree e dalle argilliti rosse della Formazione della Pietraforte. Il tetto del substrato pre-pliocenico risulta a profondità contenute in corrispondenza del centro storico di Firenze (profondità inferiori a 20 m dal piano di campagna). Il corso del Fiume Arno spostato verso il bordo meridionale del bacino ha portato il fiume a erodere le rocce liguri, creando un terrazzo di erosione lungo tutto il margine meridionale cittadino da est ad ovest. L'attività tettonica collegata alla faglia trasversale Castello-Scandicci ha ribassato di un centinaio

di metri il tetto del substrato subito a ovest della linea di faglia, ma l'abbassamento si spinge fino alla profondità di 600 m in corrispondenza della piana di Campi Bisenzio-Sesto Fiorentino. Nelle zone nord-orientali della città il substrato è stato dislocato in modo differenziale dalle faglie trasversali e longitudinali, ed è possibile trovarlo a profondità superiori a 110 m, mentre nelle aree sudorientali l'abbassamento ha avuto minore intensità.

3.2.2. Depositi pre-lacustri

Nel periodo compreso tra il Miocene superiore e il Pliocene inferiore si sono depositi:

- sedimenti pre-lacustri di ambiente fluviale (Depositi del paleo-Mugnone) quando la linea di costa era prossima all'attuale zona di San Casciano Val di Pesa;
- sedimenti residuali delle deposizioni limno-palustri in aree di limitata estensione.

3.2.3. Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano

Nell'area interessata dal presente studio si hanno i seguenti complessi sedimentari andando dal più antico e seguendo la classificazione UBSU (*Unconformity-bounded Stratigraphic Units*):

- Sintema del bacino di Firenze-Prato-Pistoia;
- Sintema di Firenze (depositi antichi);
- Sintema dell'Arno (depositi alluvionali recenti).

Con il termine *sintema* si identifica un corpo sedimentario di origine comune definito alla base e al tetto da superfici di discontinuità o da superfici topografiche. Dal punto di vista sedimentologico il Sintema del bacino di Firenze-Prato-Pistoia è ascrivibile ad ambienti lacustri, lacustri-palustri e di fan-delta, il Sintema di Firenze ad ambienti lacustri e di fan-delta e il Sintema dell'Arno ad ambienti fluvio-alluvionale e limno-palustre.

3.2.4. Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia

E' costituito dai depositi lacustri villafranchiani, a sua volta composto dalle Argille turchine AUCTT. e dai Depositi clastici di delta e fan delta dei paleo-torrenti. Tali unità vengono di seguito descritte dalla più antica alla più recente.

3.2.4.1. Argille turchine AUCTT.

Questa unità è costituita da massicci corpi di argille e argille limose di colore grigio-

azzurro, deposte in ambiente lacustre in condizioni climatiche fredde (periodi glaciali Biber e Donau). Sono presenti livelli e lenti di ghiaie e sabbie, in genere sporchi. Frequenti interdigitazioni avvengono con i depositi di delta e fan-delta dei paleo-corsi d’acqua provenienti dai rilievi posti più a nord, come il paleo-Mugnone, il paleo-Affrico e il paleo-Terzolle. Nella zona del centro cittadino le argille azzurre raggiungono spessori massimi di 90 m, mentre arrivano a 160 m nelle zone ubicate a nord-est della città.

3.2.4.2. Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti

Si tratta di ciottolami e ghiaie prevalentemente sporchi, ghiaie sabbiose, sabbie limose e limi sabbiosi, in corpi più o meno massivi e/o canalizzati, formati a opera dei vari torrenti confluenti nel lago. A essi sono riconducibili i depositi del paleo-Affrico/Mensola, del paleo-Mugnone, del paleo-Terzolle e, con provenienze dal bordo meridionale, dal paleo-Ema/Greve. Questi terreni costituiscono i depositi clastici più profondi del bacino di Firenze, riconducibili a periodi caratterizzati da un clima a forte piovosità. Al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, in particolare alle Argille turchine AUCTT., Capecchi *et al.* (1976b) hanno fatto corrispondere l’Orizzonte Firenze 4 (si veda il § 3.3.4).

3.2.5. Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)

E’ costituito da ciottolami e ghiaie d’alveo del paleo-Arno e dei paleo-torrenti, con percentuale di matrice in modo variabile. Nella zona settentrionale urbana della città risultano frammisti a intervalli sabbioso-limosi di colore marrone scuro, mentre nella zona Cascine-Osmannoro-Legnaia risultano essere costituiti prevalentemente da ciottoli e ghiaie. In particolare, i depositi del paleo-Arno hanno costruito il conoide del fiume nel lago di Prato-Pistoia, ben sviluppato nella zona Cascine-Osmannoro con apice nella zona della Fortezza. A questi depositi, Capecchi *et al.* (1976b), hanno fatto corrispondere l’Orizzonte Firenze 3 (si veda il § 3.3.3). Il corpo sedimentario, che è stimato avere una potenza di una ventina di metri, è stato eroso dallo stesso Fiume Arno: di ciò si ha evidenza alle Cascine dove si trova a contatto direttamente tra il corpo sedimentario in questione e le ghiaie alluvionali recenti depositate dal fiume.

3.2.6. Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)

Il Sintema del Fiume Arno è costituito dai depositi d'alveo e di esondazione recenti e attuali della coltre alluvionale deposta dal Fiume Arno e dei suoi affluenti nell'area fiorentina, in complessi rapporti di eteropie laterali erosive e sedimentarie. I primi metri superficiali (3÷5 m) sono composti da limi di esondazione sabbiosi. A questo intervallo è da far corrispondere l'Orizzonte Firenze 1 di Capecchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3.1). I depositi d'alveo sono costituiti prevalentemente da ciottolami e ghiaie, con percentuale molto variabile della matrice fine, con intercalati livelli e lenti di sabbie. Le ghiaie compongono il corpo clastico principale, rilevato sull'intera superficie fiorentina, ed è l'intervallo corrispondente all'Orizzonte Firenze 2 di Capecchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3.2), il cui spessore varia da pochi metri fino a 20÷30 m. La deposizione delle ghiaie è avvenuta su una superficie di erosione sui corpi sedimentari che possono essere sia i depositi alluvionali antichi che il substrato pre-pliocenico. L'ambiente di deposizione era tipicamente fluviale a caratterizzato da alta energia. Come detto, i Depositi alluvionali recenti sono da ricondurre all'azione sedimentaria sia del Fiume Arno che degli affluenti principali (Torrente Mugnone, Torrente Terzolle, Torrente Affrico, Torrente Mensola). Nella piana fra Campi Bisenzio e Sesto Fiorentino-Castello i Depositi alluvionali recenti sono costituiti da sedimenti di ambiente limno-palustre, i quali raggiungono uno spessore che va da un paio di metri a nord della piana fino a qualche metro nella parte a sud, con presenza di livelli torbosi nella piana di Sesto Fiorentino. I Depositi alluvionali recenti costituiscono il principale acquifero dell'area fiorentina (ghiaie dell'Orizzonte Firenze 2, che si trovano spesso a contatto diretto con il corpo sedimentario costituito dall'Orizzonte Firenze 3), come esposto dettagliatamente nel prosieguo.

3.3. Orizzonti “Firenze”

In Capecchi, Guazzone, Pranzini, (1976b), sono stati identificati e definiti quattro livelli denominati “*orizzonti Firenze*” (figura 1), corrispondenti a successive fasi di deposizione. Tale suddivisione risulta fondamentale per approfondire e comprendere le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito in studio.

3.3.1. Orizzonte “Firenze 1”

Si tratta dello strato superficiale indicato dai vecchi Autori col nome di “*pancone*” o

“gentilone”. E' costituito da sabbia fine con argilla con le ghiaie e i ciottoli frequentemente dispersi nel banco e più rare piccole lenti di argilla. In varie località l'orizzonte Firenze 1 è composto da sabbie anche grossolane e relativamente pulite come, a esempio, all'Anconella e in altri luoghi in prossimità del Fiume Arno.

Da notare che nel centro della città alla composizione di questo strato contribuiscono in buona parte materiali di scarico derivanti dalle rovine di costruzione di varie epoche. Questo strato superficiale, costituito in massima parte da materiale depositato dal Fiume Arno durante le piene, è presente in tutta l'area studiata a eccezione dell'area dell'Osmannoro a nord della Via Pistoiese. Il suo spessore varia da 3 a 9 metri ma nel centro della città ha una media di 4÷5 m.

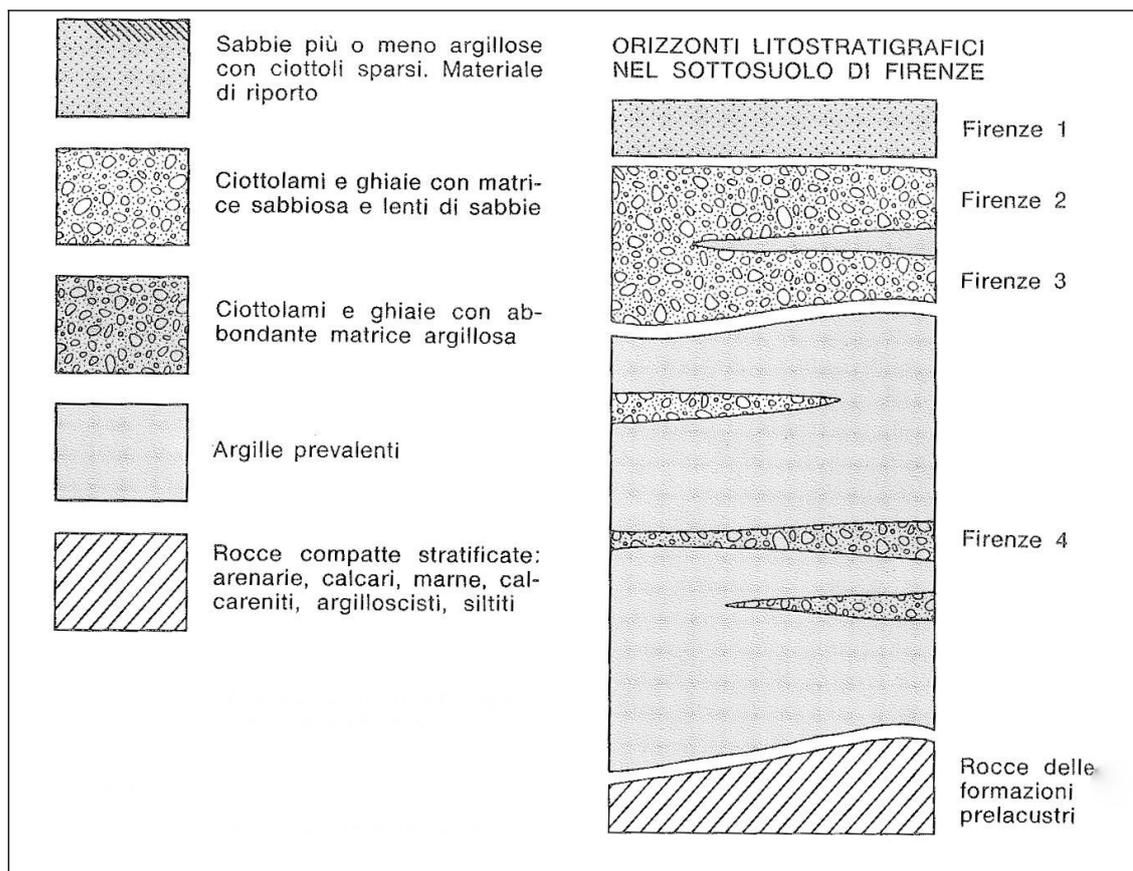


Figura 1 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi *et al.*, 1976b).

3.3.2. Orizzonte “Firenze 2”

Si tratta di depositi fluviali incoerenti che presentano notevoli e rapide variazioni

granulometriche sia in senso verticale che orizzontale composti da ciottolami, ghiaie e sabbie. La frazione argillosa è di solito assai scarsa tanto da permettere una buona permeabilità. E' in questo livello, infatti, che trovano alimentazione quasi tutti i pozzi per acqua scavati fin da epoche remote nell'area urbana. Sono presenti in questo intervallo sottili lenti di argilla plastica giallo-rossastra. Le caratteristiche sedimentologiche di questi depositi sono osservabili nelle cave per ghiaia scavate nelle zone delle Piagge, di Mantignano e di Varlungo-Coverciano. Nel corpo sedimentario si possono osservare canali di erosione e stratificazione incrociata. Uno studio granulometrico (Gori, 1970) ha messo in luce una distribuzione bimodale per la maggior parte dei campioni prelevati, un sorting basso e, in generale, indici sedimentologici che confermano la deposizione fluviale. In particolare, il regime doveva essere torrentizio e con notevole capacità di trasporto. La natura litologica dei ciottoli di questo orizzonte non è uniforme su tutta l'area in cui affiorano. Nella zona orientale, dall'Anconella al centro città, i ciottoli sono quasi esclusivamente formati da arenarie quarzoso-micacee, probabilmente provenienti dalla formazione Macigno. Lo studio dei campioni prelevati in pozzi situati nelle zone delle Cascine, di Mantignano e delle Piagge, ha messo in luce una maggiore eterogeneità litologica: insieme a quelli di arenaria Macigno, sono presenti ciottoli di calcareniti, spesso fossilifere, calcari di vario tipo e arenarie calcaree provenienti soprattutto dalle formazioni di Monte Morello, di Sillano e della Pietraforte. Lo spessore di questo orizzonte è molto variabile; diminuisce gradualmente verso i margini della pianura e verso ovest. In Capecchi *et al.* (1976b) sono riportate le isobate del tetto di questo orizzonte nell'area urbana che mettono in risalto, oltre ad una generale pendenza della superficie verso l'asse della valle e nel senso di scorrimento dell'Arno, alcune fasce di alto relativo piuttosto strette. Esse corrispondono probabilmente al percorso del Fiume Arno durante le ultime fasi di deposito dell'orizzonte macroclastico.

3.3.3. Orizzonte “Firenze 3”

L'Orizzonte Firenze 3 è composto da ciottolami, ghiaie e sabbie, con una matrice argillosa più abbondante che nei sedimenti macroclastici dell'orizzonte Firenze 2 soprastante, tanto da risultare meno permeabile. L'argilla è presente anche in lenti. Nella zona dell'Osmannoro una di queste lenti, dello spessore di 3÷4 m, divide l'orizzonte in due distinti livelli porosi. Dal punto di vista litologico i ciottoli sono molto eterogenei: prevalgono calcari e

calcareniti provenienti dalle formazioni di Monte Morello e di Sillano, ma sono presenti anche ciottoli, in genere molto alterati, di arenaria Pietraforte e Macigno. L'impossibilità di osservare in affioramento i sedimenti di questo orizzonte non permette di definire con sicurezza l'ambiente di deposizione. La maggior percentuale della matrice argillosa nei sedimenti più grossolani fa pensare ad un deposito lacustre prossimale, in corrispondenza dello sbocco di un fiume, con fasi di avanzamento e retrocessione della linea di riva del lago. L'Orizzonte Firenze 3 è in genere separato dall'Orizzonte Firenze 2 da uno strato di argilla turchina di probabile origine lacustre; nelle zone dove tale strato argilloso manca i due orizzonti ciottolosi non possono essere distinti con certezza.

3.3.4. Orizzonte “Firenze 4”

L'Orizzonte Firenze 4 è costituito da argille di origine lacustre, compatte, di colore turchino, più raramente giallastro, talora con lignite e torba. A vari livelli sono presenti lenti di ghiaie e ciottoli, più raramente di sabbie; in questi strati la matrice argillosa è quasi sempre abbondante, tanto da limitarne la permeabilità. La distribuzione areale di queste lenti a granulometria più grossolana è difficile da ricostruire con precisione, soprattutto perché sono pochi i sondaggi che hanno raggiunto e attraversato questa unità. Si osserva comunque che esse divengono meno frequenti e di minor spessore a valle di Firenze oltre la zona delle Cascine, procedendo verso ovest e nord-ovest. A monte di Firenze, nella zona dell'Anconella-Bandino, queste lenti sono invece più numerose e potenti che altrove e molte contengono solo una bassa percentuale della frazione argillosa. Questo fatto è probabilmente da mettere in relazione con lo sbocco, al margine sud-est della conca lacustre, di uno o più torrenti immissari con notevole trasporto solido. Nella parte basale dell'Orizzonte Firenze 4, al contatto con le rocce del paleoinvaso, è talora presente un piccolo livello (1÷3 m) di ciottoli anche molto grossi, ossidati e poco arrotondati, che può essere considerato un deposito di pseudo-trasgressione. La maggioranza dei ciottoli è costituita da calcari marnosi bianchi tipo alberese e subordinatamente da arenarie calcaree tipo Pietraforte e calcareniti. Lo spessore dell'Orizzonte Firenze 4 è determinato dalla quota del fondo lago: all'Anconella è intorno a 70 m mentre nel centro città, nella zona della stazione di Santa Maria Novella, è circa 25 m; esso aumenta rapidamente spostandosi a ovest delle Cascine fino a superare i 300 m nella zona di San Donnino.

3.3.4.1. Considerazioni sull'andamento degli orizzonti “Firenze”

Lo strato argilloso-sabbioso superficiale (Orizzonte Firenze 1), che raggiunge una potenza massima nel centro città, diminuisce di spessore verso la zona di Peretola; più a nord-ovest e nella zona dell’Osmannoro, il tipo litologico presente nel sottosuolo fin dai primi metri è costituito da argilla compatta. L’Orizzonte Firenze 2 è presente in tutte le sezioni idrogeologiche elaborate da Capecchi *et al.* (1976b) che mostrano come la terminazione occidentale di questo intervallo coincida in tutti questi profili con la terminazione dell’Orizzonte Firenze 1. Si può ritenere quindi che oltre Peretola, a nord della Via Pistoiese, il Fiume Arno non si sia mai spinto a depositare né le sue alluvioni grossolane (Orizzonte Firenze 2), né quelle più fini recenti (Orizzonte Firenze 1). In alcune sezioni verso le colline si osserva la terminazione laterale dell’Orizzonte Firenze 2. Questi sedimenti fluviali si appoggiano su superfici di erosione dei sedimenti lacustri. L’Orizzonte Firenze 2 presenta il massimo spessore in una zona corrispondente più o meno col centro della città (Piazza D’Azeglio - Piazza San Marco). La diminuzione di spessore a partire da questa zona è evidente sia in senso longitudinale sia in senso trasversale. Come detto, solo in una sezione l’Orizzonte Firenze 2 risulta separato dall’Orizzonte Firenze 3 da una lente di argilla. In tutte le altre sezioni vi sono zone di contatto fra i due orizzonti, costituendo un unico intervallo poroso, interrotto solo localmente da lenti poco estese di argilla. In queste zone o c’è stata continuità nella sedimentazione grossolana, oppure episodi erosivi hanno distrutto la continuità dell’intervallo argilloso di separazione. Le sezioni documentano la maggior frequenza ed estensione dei ciottolami entro le argille lacustri (Orizzonte Firenze 4) nella zona orientale della conca di Firenze. Nella zona dell’Anconella questi ciottolami sono particolarmente abbondanti e relativamente puliti. La distinzione dai ciottolami fluviali sovrastanti si è basata non tanto sulla presenza del piccolo strato argilloso intorno ai 10 m di profondità, quanto sulle correlazioni granulometriche e litologiche di dettaglio. In particolare, in un pozzo il diagramma litologico presenta a 10 m un brusco aumento dei calcari e una corrispondente diminuzione delle arenarie; la stessa rapida variazione litologica è stata osservata in altri pozzi al passaggio fra i sedimenti fluviali e quelli sicuramente lacustri. Dalla zona delle Cascine procedendo verso ovest il substrato roccioso scende infatti molto rapidamente, fino a raggiungere la profondità di circa 300 m nella zona di Brozzi. Questa rapida discesa è determinata da una o più faglie trasversali al profilo che, in

tempi relativamente recenti, hanno determinato il sollevamento della conca fiorentina rispetto al resto del bacino lacustre. Una sezione in particolare (Capecchi *et al.*, 1976b) mette bene in evidenza fra le Cascine e il Ponte San Niccolò l’alto relativo del substrato nel tratto urbano. In particolare, il tratto orizzontale del substrato rappresenta una superficie di erosione e testimonia quindi una fase erosiva esercitata dall’Arno. In altre sezioni si può osservare come nel centro città il fondo sia relativamente alto. Tale alto trova una corrispondenza in superficie negli affioramenti del Macigno di Fiesole a nord e della Pietraforte del Piazzale Michelangiolo e di Bellosguardo a sud. In base alle stratigrafie e alle correlazioni nella pubblicazione più volte citata sono state ricostruite le curve di ugual spessore degli Orizzonti Firenze 2 e Firenze 3. Questi orizzonti, costituiti in prevalenza da sedimenti grossolani, sono quelli, in tutta la serie fluvio-lacustre, dotati della migliore permeabilità e rappresentano quindi gli acquiferi più importanti. Per quanto riguarda l’Orizzonte Firenze 2 si osserva in particolare che:

- l’orizzonte si estende su tutta la zona pianeggiante, salvo che a nord della linea Rifredi-Novoli-Peretola-Brozzi;
- nelle zone di Badia a Ripoli e Scandicci, rispettivamente a sud-est e a sud-ovest del centro fiorentino, i dati a disposizione indicano che l’Arno ha deposto i suoi sedimenti grossolani fino al margine della pianura;
- l’area di maggior spessore dell’orizzonte è fra piazza D’Azeglio e piazza del Duomo (circa 20 m). Quest’area costituisce il massimo assoluto entro una fascia che corrisponde all’asse centrale della valle;
- l’orizzonte continua ad ovest dell’area studiata, con spessori minori e, per quanto si può osservare nelle cave, con diminuzione delle dimensioni medie dei clasti.

Per l’Orizzonte Firenze 3 si osserva invece che:

- esso è limitato alla parte occidentale, ad ovest delle Cascine;
- gli spessori sono minori rispetto a quelli dell’Orizzonte Firenze 2;
- l’area di massimo spessore corrisponde ad una fascia presso l’attuale corso dell’Arno, più o meno sul proseguimento di quella dell’Orizzonte Firenze 2 (circa 12 m alle Piagge);
- anche questo orizzonte continua a occidente dell’area studiata, interessando una zona non occupata dai sedimenti dell’Orizzonte Firenze 2.

3.4. Geologia dell'area di intervento

Come mostrato nella carta geologica in allegato, nell'area in studio affiorano i Depositi Olocenici (rappresentati dai Depositi alluvionali recenti terrazzati - bna1 e bna2, dalle Alluvioni recenti – Ac, dai Depositi alluvionali attuali - b, dai Depositi colluviali – b7, dai Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata - h5 e dai Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi – h1) e le Unità Tettoniche Liguri, in particolare la Formazione di Monte Morello (MLL) appartenente all'Unità omonima. La carta geologica è stata disegnata utilizzando i Fogli n. 275040 e 275080 della Carta Geologica Regionale della Regione Toscana – Servizio Geologico Regionale (*Progetto Carg*). Nel capitolo 3.2, è stato descritto il sottosuolo della piana di Firenze, costituito da sedimenti plio-quadernari di riempimento del bacino fluvio-lacustre formatosi a seguito della fase tettonica distensiva appenninica, depositi sulle rocce del paleoinvaso. I Depositi alluvionali recenti terrazzati corrispondono ai depositi del Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti, § 3.2.6), secondo la classificazione UBSU (Unconformity-bounded Stratigraphic Units) e possono essere inoltre correlati all'Orizzonte Firenze 1 e all'Orizzonte Firenze 2 di Capocchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3).

Nei paragrafi seguenti si descrivono le formazioni geologiche presenti (dalla più antica alla più recente).

3.4.1. Unità Tettoniche Liguri – Unità di Monte Morello

Il Dominio Ligure fa parte di quelle successioni caratterizzate da un substrato costituito da crosta oceanica (Oceano Ligure – Piemontese). In particolare l'Unità di Monte Morello, di età cenozoica, è la più esterna (nord - orientale) tra quelle oceaniche ed è inclusa nei Domini Liguri Esterni.

3.4.1.1. Formazione di Monte Morello (MLL)

La Formazione di M. Morello costituisce i rilievi collinari che delimitano la piana di Firenze-Sesto Fiorentino, in località Quinto Alto (angolo nord-orientale della carta geologica riportata in allegato). Dal punto di vista litologico la formazione è composta prevalentemente da argilliti varicolori con irregolari intercalazioni di arenarie quarzoso-calcaree, marne e blocchi litoidi calcareo-silicei. Si presenta profondamente disturbata, a volte caoticizzata, talora con strutture plastiche con assetto difficilmente riconoscibile anche a causa della notevole

alterazione. Lo spessore degli strati varia da 0,30 m ad oltre 1 m per i calcari marnosi. L'età è compresa tra il Paleocene superiore e l'Eocene medio.

3.4.2. Depositi olocenici

3.4.2.1. Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna1 e bna2)

Si tratta di depositi di origine alluvionale costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali di 1° e 2° ordine (bna1 e bna2, rispettivamente) i quali compongono la quasi totalità dei terreni affioranti nell'area della carta geologica. Gli interventi del Masterplan saranno realizzati prevalentemente su questi depositi.

Dall'esame della documentazione inerente le campagne di indagine si evince che, dal punto di vista meramente litologico, nell'area interessata dai lavori in progetto affiorano, al di sotto di alcuni decimetri di terreno vegetale (0,20÷0,40 m), o in alcuni casi, terreno di riporto, limi, limi argillosi, argille limose e argille, a tratti debolmente sabbiosi. Il colore del terreno in posto nelle porzioni più superficiali è ocra, beige o bruno.

3.4.2.2. Alluvioni recenti (Ac)

Questi depositi affiorano limitatamente nella porzione sud-orientale della zona indagata, posta nel territorio comunale di Firenze, tra Via Francesco Geminiani e Via di Carraia e sono formati in genere da sedimenti grossolani: si tratta soprattutto di ghiaie e ciottolami puliti dell'alveo del Fiume Arno (unità Ac) che, localmente, possono formare corpi canalizzati (unità Ab, non affiorante nell'area di interesse).

3.4.2.3. Depositi alluvionali attuali (b)

Sono costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei letti fluviali attuali, soggetti a evoluzione con ordinari processi fluviali, nella zona in studio sono presenti negli alvei sia naturali che artificiali del reticolo idrografico.

3.4.2.4. Depositi colluviali (b7)

I Depositi colluviali sono rinvenibili nella zona pedecollinare della località di Quinto Alto, fra Firenze e Sesto Fiorentino, ai piedi dei rilievi collinari costituiti dai terreni della Formazione di M. Morello. Questi depositi sono costituiti da detrito e frammenti di forma prevalentemente angolare, deposti alla base dei versanti dalla sola azione della forza di gravità.

3.4.2.5. Depositi antropici, terreni di riporto e bonifica per colmata (h5)

L'unità raggruppa tutti quei depositi connessi con l'attività umana. Comprende quindi terreni di riporto, rilevati stradali, terreni di bonifica per colmata. In particolare, nell'area investigata, essi costituiscono i rilevati delle opere infrastrutturali come le autostrade e gli argini di fossi e di parte del reticolo idrografico minore della Piana (a esempio gli argini del Fosso Reale).

3.4.2.6. I Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi [h1]

Questa unità identifica i terreni presenti in corrispondenza della discarica di Case Passerini, ubicata nella porzione occidentale della zona in esame, in prossimità della località Osmannoro. La discarica e gli impianti si trovano in un'area delimitata dal Fosso Reale (a sud), dall'autostrada A11 (a nordest) e dagli stagni di Focognano (a nordovest).

4. Idrogeologia

4.1. Aspetti idrogeologici generali

Con riferimento agli orizzonti descritti al § 3.3, dal punto di vista idrogeologico, l'Orizzonte Firenze 1 può essere considerato un acquitardo con permeabilità nell'ordine di 10^{-7} m/s. L'Orizzonte Firenze 2, invece, per le sue caratteristiche granulometriche e tessiturali, costituisce il corpo acquifero principale dell'area fiorentina, con permeabilità fortemente variabili, nell'ordine dei 10^{-3} ÷ 10^{-7} m/s. L'Orizzonte Firenze 3 presenta permeabilità generalmente più basse dell'Orizzonte Firenze 2, ma può comunque ospitare una significativa circolazione idrica. L'Orizzonte Firenze 4, infine, può essere sede di limitati acquiferi (in pressione) ubicati nelle lenti di ghiaie e sabbie che si trovano disperse all'interno del corpo costituito dalle argille turchine; tali acquiferi non sono ovviamente di interesse ai fini dello sfruttamento idrico.

La falda nell'area fiorentina è posizionata in corrispondenza dei Depositi Alluvionali Recenti (Orizzonte Firenze 2); oppure, nella zona delle Cascine-Osmannoro, nei Depositi Alluvionali Antichi (Orizzonte Firenze 3). L'acquifero più superficiale (Orizzonte Firenze 2) può essere rinvenuto nella maggior parte della pianura. Solo a ovest della città, lungo una linea pressappoco coincidente con la Via Pistoiese, i ciottolami e le ghiaie alluvionali recenti lasciano

spazio, verso nord, ai limi e alle argille di natura lacustre o palustre. Il Fiume Arno non ha infatti scavato ed eroso i sedimenti fluvio-lacustri precedenti (Capecchi *et al.* 1976b). Il primo acquifero riscontrabile nell’area dell’Osmannoro è ubicato nei Depositi Alluvionali Antichi. Gli acquiferi sopra elencati sono caratterizzati da porosità primaria e dal punto di vista granulometrico sono composti da ciottoli, ghiaia e sabbia, con una percentuale variabile di matrice limoso-argillosa. Quest’ultima componente influenza indubbiamente il valore della conducibilità idraulica (permeabilità). Tramite diverse tipologie di indagine, sono stati calcolati valori di permeabilità risultati variabili tra 10^{-3} ÷ 10^{-7} m/s. La falda è di tipo libero nella maggior parte della piana di Firenze, quindi il livello freatico e quello piezometrico corrispondono. Invece, ai margini della piana, dove sono presenti maggiori spessori degli intervalli superficiali composti dai limi di esondazione, la falda è di tipo semi-confinato (o addirittura confinato) e la superficie freatica si attesta a quote prossime alla superficie topografica. A Nord della via Pistoiese la prima falda può essere considerata confinata, dato che le ghiaie dell’Orizzonte Firenze 3 sono coperte da almeno 16 m di terreno a bassa permeabilità (riconducibile all’Orizzonte Firenze 1 passante verso nord ai sedimenti limno-palustri dei Depositi alluvionali recenti della piana di Sesto Fiorentino). Ugualmente confinate sono le falde ubicate nei livelli permeabili della successione fluvio-lacustre presente al di sotto dell’Orizzonte Firenze 2 (Orizzonte Firenze 4 corrispondente al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia), costituiti da ghiaie e sabbie, spesso con matrice limosa abbondante. Come detto precedentemente, nelle lenti di ghiaie e sabbie che si rinvengono all’interno dei depositi lacustri delle argille azzurre, appartenenti al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, sono ubicate falde confinate, peraltro alimentate con difficoltà dal fatto di essere disperse in potenti serie argillitiche.

Nella piana di Firenze le isofreatiche indicano, come andamento generale, un flusso di falda che dai rilievi collinari si dirige verso il Fiume Arno, con una componente verso ovest in modo concorde con la direzione di flusso dell’Arno. Il gradiente idraulico diminuisce dalle zone pedecollinari verso il centro della valle (da 1,0÷1,5 % a 0,2 %), dovuta all’aumento dei valori di trasmissività dei sedimenti.

4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame

Per quanto riguarda le caratteristiche idrogeologiche della principale unità geologica

presente (bna), è possibile stimare la permeabilità su base qualitativa, in funzione degli elementi da cui dipende (caratteristiche litologiche dei terreni affioranti, presenza di pozzi, densità del reticolo idrografico) (carta idrogeologica in allegato). Nel dettaglio, i terreni di origine alluvionale presenti nelle aree di pianura sono dotati di permeabilità per porosità primaria legata alla presenza di pori tra le particelle del terreno, acquisita al momento della loro formazione. Tale permeabilità per i Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna) è in genere bassa e diminuisce o aumenta in corrispondenza rispettivamente dei livelli fini o grossolani. Durante le perforazioni di tutti i sondaggi realizzati per la campagna geognostica realizzata negli anni 2015 - 2017, in alcuni casi è stata rinvenuta acqua. La spiegazione dell'acqua rinvenuta sta nel fatto che il sottosuolo dell'area esaminata, costituito da terreni fine in massima parte rappresentati da argille e limi, è un acquicludo in cui si può avere, nelle stagioni delle piogge, presenza di acqua di ritenzione a causa dell'alta porosità, ma questa acqua non circola in quanto la porosità efficace è molto bassa, dell'ordine di pochi punti percentuali.

Per quanto concerne la permeabilità delle altre formazioni affioranti, è generalmente molto bassa per i Depositi antropici (h5 e h1) e colluviali (b7), mentre può essere considerata media per i Depositi alluvionali sia attuali (b) che recenti (Ac).

Nella carta idrogeologica riportata in allegato, le formazioni geologiche presenti nell'area sono state suddivise in base alla permeabilità precedentemente indicata e riassunta nella tabella 1.

Classe	Terreni permeabili per porosità primaria	Permeabilità
1	Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi (h1) Depositi colluviali (b7)	molto bassa
2	Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1 e bna2)	bassa
3	Depositi alluvionali attuali (b) Depositi alluvionali recenti (Ac)	media
4	-	alta
5	-	molto alta

Tabella 1 - Classi di permeabilità.

Volendo invece fornire un valore indicativo del coefficiente di permeabilità K, si può far riferimento a quello ottenuto dalle prove edometriche desunte dalle prove eseguite sui campioni prelevati durante la perforazione dei sondaggi a carotaggio continuo che risulta dell'ordine di 1E-12 m/sec e 1E-10 m/sec e a quello derivante dalle prove di permeabilità in situ

di tipo Lefranc eseguite durante la prima fase di indagine (n. 23), le quali non hanno fornito nella maggior parte dei casi valori di permeabilità indicativi per l'assenza di abbassamenti significativi; solo nel caso dei sondaggi S19 e S35 è stato ricavato un valore medio del coefficiente k pari rispettivamente a $3,62E-09$ m/s (profondità prova $5,00 \div 7,00$ m) e $4,47E-08$ m/s (tra 25,00 e 30,00 m).

4.3. Superficie piezometrica

Durante l'esecuzione della quasi totalità dei sondaggi non è stata riscontrata la presenza di acqua; è comunque opportuno fare alcune precisazioni in merito alle interferenze eventualmente presenti e prevedibili tra gli interventi in progetto e le acque di sottosuolo.

Come detto nei capitoli precedenti, la zona in studio presenta schematicamente le seguenti caratteristiche idrogeologiche:

- superficialmente è presente un livello dello spessore di un paio di metri al di sotto del piano di campagna, che a seconda della stagione, può essere interessato da saturazione alla profondità compresa tra 0 e 1,5 m; questo livello non ha alcun valore e interesse dal punto di vista della risorsa idrica;
- al di sotto di 1,5 – 2,0 m di profondità dal piano di campagna fino alla profondità di almeno 25 m non è mai stata registrata presenza di una falda;
- il livello in cui ha sede la falda principale della pianura fiorentina è identificato con l'Orizzonte Firenze 2 (parte inferiore del Sintema del Fiume Arno) e con l'Orizzonte Firenze 3 (Sintema di Firenze) che al di sotto dell'area di interesse per il presente studio non risultano essere presenti.

Per la realizzazione della maggior parte delle opere contenute dal Masterplan in oggetto, è previsto uno scavo di modesta entità che coinvolge solo lo strato superficiale dell'Orizzonte Firenze 1 (porzione superiore del Sintema del Fiume Arno). Pertanto le uniche interferenze che si potranno avere tra le opere oggetto della presente relazione e le acque di sottosuolo saranno con quelle che stagionalmente vanno a occupare i primi metri superficiali al di sotto del piano di campagna (e che quindi nel periodo estivo in cui si sono svolte le indagini del piano di caratterizzazione ambientale non sono state incontrate) e non interesseranno mai l'acquifero saturo principale in quanto assente nell'area di interesse e rilevato a sud nella zona

dell'Osmannoro (§ 4.1). Qualora vi fosse la necessità di prevedere scavi importanti, per la realizzazione ad esempio di locali interrati, di volta in volta, sulla base della specifica localizzazione e delle indagini disponibili, saranno fatte le dovute considerazioni.

Nella campagna di indagini geognostiche di riferimento per il presente studio, sono stato realizzati numerosi piezometri (si veda il § 6.1 e l'ubicazione delle indagini in allegato); le misure piezometriche effettuate in vari periodi dell'anno indicano le quote riportate nelle tabelle 2 e 3 seguenti. E' fondamentale sottolineare che, come sopra scritto, le misure eseguite rappresentano dei livelli piezometrici pertanto, nel caso di un acquifero libero, la superficie piezometrica corrisponde alla reale quota della falda freatica, mentre nel caso di un acquifero confinato, o semi confinato, come quello dell'area di progetto, la superficie piezometrica misurata nei pozzi corrisponde a una quota fittizia, non reale, della falda nel terreno: la quota dell'acqua raggiunta nel pozzo, in questo caso, è determinata infatti dalla pressione dovuta alla differenza di carico tra la zona di alimentazione e l'opera di captazione considerata. In altre situazioni, invece, si tratta di semplice acqua di ritenzione, così come illustrato al paragrafo precedente.

5. Geomorfologia e stabilita'

5.1. Introduzione

L'area nella quale verranno realizzate le opere previste dal project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035 è compresa tra l'abitato di Sesto Fiorentino a nord-nordest, l'attuale sedime aeroportuale a est, la zona industriale di Osmannoro e l'autostrada A11 a sud e l'autostrada A1 a ovest. La zona è pianeggiante ed è posta a quote variabili tra circa 34 e 39 m s.l.m..

La carta geomorfologica in allegato è stata elaborata a partire dal medesimo elaborato degli strumenti urbanistici dei comuni interessati dai lavori (Sesto Fiorentino, Firenze, Signa) e integrata con il lavoro di campagna. Le forme principali rilevate sono legate all'attività antropica che ha fortemente modificato il paesaggio; in particolare l'uomo ha creato una regimazione delle acque meteoriche e di ruscellamento superficiale di tipo artificiale, tale da ritenere assenti fenomeni erosivi di interesse. Le forme individuate sono state classificate in base all'origine e distinte in tre gruppi che vengono di seguito descritti.

sigla piezometro	27 ottobre 2016		27 gennaio 2017	
	quota [m s.l.m.]	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]	profondità [m da p.c.]
S05	33,92	1,48	34,85	0,55
S13	33,17	1,63	33,47	1,33
S19	33,71	1,59	34,84	0,46
S22	33,91	3,29	34,51	2,69
S28	35,71	2,29	36,71	1,29
S31	36,75	1,75	37,71	0,79
S35	34,24	1,76	34,57	1,43
S39	37,14	1,76	37,73	1,17
S40	36,98	0,92	36,61	1,29
S44	37,85	1,35	38,4	0,8

Tabella 2 - Misure piezometriche nei piezometri della campagna del 2015..

sigla piezometro	quota [m s.l.m.]	profondità [m da p.c.]	data
S88	34,42	2,75	01/08/17
S90	33,62	3,37	28/07/17
S108	33,32	2	23/08/17
S112	32,42	3,16	28/07/17

Tabella 3 - Misure piezometriche nei piezometri della campagna del 2017..

5.1.1. Forme di origine antropica

Tra le forme legate all'attività antropica si osservano numerosi riporti come i rilevati arginali (tra i quali si segnala il Fosso Reale) e stradali (autostrade e stazione di servizio di Peretola) cartografati come Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata; la discarica di Case Passerini a ovest (Discariche per inerti e rifiuti solidi) e alcune cave inattive (il lago di Peretola a est e quello di Mollaia a nor-ovest).

5.1.2. Depositi quaternari di versante

In questo gruppo sono inseriti i depositi colluviali rilevati ai piedi del versante, posto nella porzione nord-orientale della zona in studio, e che rappresenta uno dei rilievi collinari che delimitano la piana di Firenze-Sesto Fiorentino.

5.1.3. Forme dovute e processi fluviali

Il contatto tra le due unità geologiche affioranti (bna1 e bna2 – carta geologica), coincide con il limite deposizionale della conoide alluvionale che è stata cartografata.

6. Risultati delle indagini eseguite

6.1. Generalità

Come detto in premessa, le indagini di riferimento per il presente studio sono quelle eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., nella *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci nel 2015 e nel 2017. In particolare, per lo studio delle caratteristiche litologiche, stratigrafiche e meccaniche dei terreni presenti nell'area interessata dalla realizzazione degli interventi in progetto sono state realizzate le seguenti tipologie di indagini geognostiche:

- pozzetti geognostici con escavatore meccanico denominati PG;
- prove penetrometriche statiche denominate CPT;
- prove penetrometriche statiche con piezocono denominate CPTU;
- prove dilatometriche denominate DM;
- sondaggi a carotaggio continuo denominati S (alcuni dei quali attrezzati a piezometro) con

esecuzione di Standard Penetration Test (S.P.T.) e prelievo di campioni indisturbati con fustella a pareti sottili tipo Shelby;

- esecuzione di prove geotecniche di laboratorio;
- esecuzione di indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e onde Sh denominate RIFR;
- esecuzione di indagini geofisiche di superficie mediante metodologia di tipo Multi-channel Analysis of Surface Waves denominate MASW, quelle della seconda fase (2017) associate a misure di sismica passiva Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr);
- esecuzione di indagini sismiche in foro di tipo down hole.

Le indagini geognostiche, ubicate come mostrato in allegato, vengono descritte nei paragrafi seguenti. Si rimanda agli allegati delle relazioni geologiche relative ai singoli interventi per le schede dei saggi esplorativi, per le stratigrafie dei sondaggi con le foto delle cassette catalogatrici, per i certificati delle prove penetrometriche, per i certificati delle prove dilatometriche, per i certificati delle analisi geotecniche di laboratorio e per i rapporti finali delle indagini sismiche.

6.2. Pozzetti geognostici

I pozzetti geognostici (ubicazione delle indagini in allegato) sono stati eseguiti con escavatore meccanico cingolato a benna rovescia allo scopo di prelevare campioni da sottoporre ad analisi chimiche di supporto alla redazione del Piano di Utilizzo delle Terre (PUT). I saggi hanno indagato uno spessore di 2,0 m dal p.c.. Sono stati realizzati i seguenti saggi esplorativi:

- campagna 2015: da PG035 a PG052; da PG054 a PG059, da PG061 a PG076, da PG078 a PG090, PG092, PG093, PG117, PG120, PG123, PG124, PG126, PG129, da PG131 a PG145;
- campagna 2017: PG001 a PG034, PG042, PG053, PG060, PG077, PG091, da PG094 a PG107, da PG109 a PG119, PG118, da PG146 a PG152, da PG154 a PG168, da PG170 a PG180, da PG182 a PG193, da PG195 a PG204, PG206, da PG208 a PG214, da PG216 a PG221 e PG223.

I saggi hanno indagato uno spessore di 2,0 m dal p.c. incontrando, un primo orizzonte di terreno vegetale, avente uno spessore di 0,2÷0,4 m, costituito da argille o argille limose

rimaneggiate con resti di apparati radicali. Al di sotto sono presenti argille talvolta limose o debolmente limose, in alcuni casi compatte, di colore marrone; subordinatamente sono stati rivenuti limi argillosi o, più raramente, sabbia.

6.3. Prove penetrometriche

6.3.1. Prove penetrometriche statiche (CPT)

Nella campagna del 2017 sono state eseguite n. 56 prove penetrometriche statiche denominate CPT01÷CPT62.

Le prove penetrometriche statiche sono state realizzate con un penetrometro cingolato gommato, modello TG 63-200 KN, capace di una spinta di 200 kN (20 ton), progettato e prodotto da Pagani Geotechnical Equipment di Piacenza; le verticali hanno raggiunto il rifiuto strumentale a una profondità inferiore ai 15 m dal p.c. previsti. Le prove hanno fornito le seguenti informazioni (si vedano le sezioni litologiche nelle tavole 5÷14):

- Prova penetrometrica statica CPT 01:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie nei primi due metri e tra 5,0 e 6,0 m dal p.c.;
 - a partire dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 02:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (a partire da 1,0 m da p.c e prevalenti fino a 2,20 m);

- dopo un primo strato avente lo spessore di 0,8 m caratterizzato da valori di qc compresi tra 34 e 44 kg/cm², si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 03:
 - profondità indagata: 7,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un alternanza di argille e/o limi e limi e/o sabbie, con locale presenza di intervalli francamente sabbiosi; gli orizzonti con presenza di sabbie prevalgono fino a 2,60 m dal p.c.
 - dopo un picco iniziale dei valori di qc e fs, si osserva, a partire da 1,0 m dal p.c., un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 04:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie, , prevalenti fino a 3,0 m;
 - dopo un primo strato avente lo spessore di 0,8 m caratterizzato da valori di qc maggiori di 40 kg/cm², si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità (più netto a partire da 3,0 m), fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 05:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un alternanza di argille e/o limi e limi e/o sabbie (questi ultimi prevalenti a partire da 2,40 m dal p.c.), con un livello francamente sabbioso a 3,4 m da p.c.;

- dopo un picco iniziale dei valori di q_c e f_s (spessore 1,0 m) ed un secondo livello fino a 2,40 m caratterizzato da valori costanti, si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 06:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), la verticale di indagine mostra fino a 3,6 limi e/o sabbie con livelli di argille organiche; sono presenti poi argille e/o limi;
 - salvo un picco dei valori di q_c e f_s tra 2,2 e 2,4 m dal p.c., si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 07:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), la verticale di indagine ha attraversato un'alternanza di sabbia, limo e/o sabbia (in particolare fino a 2,80 m dal p.c.), argilla e/o limo con presenza di un intervallo di argille organiche tra 4,2 e 4,8 m da p.c.;
 - a partire dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 08:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie e francamente sabbiosi (tali livelli sono prevalenti nei primi 2,60 m dal p.c.);

- dopo un primo strato avente lo spessore di 0,8 m caratterizzato da valori di qc maggiori di 40 kg/cm², ed un secondo fino a 2,60 m con qc piuttosto costante, si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 09:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie, sabbie, sabbie e/o ghiaie (tali livelli sono prevalenti nei primi 3,4 m dal p.c.);
 - è presente un picco iniziale caratterizzato da valori di qc e fs elevati, poi, a partire da 3,0 m dal p.c., si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 10:
 - profondità indagata: 5,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di due livelli torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 0,6 e 0,8 m e tra 1,8 e 2,6 m dal p.c., livelli di limi e/o sabbie (0,0 e 0,2 m, 3,8 e 4,0 m e 4,4 e 4,6 m dal p.c.) e due livelli francamente sabbiosi alle profondità comprese tra 0,2 e 0,4 m e tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 11:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha

attraversato argille e/o limi con presenza di orizzonti di torbe/argille organiche (0,0 e 0,4 m, 2,2 e 2,4 m, 2,6 e 3,0 m e 3,6 e 4,2 m dal p.c.), livelli di limi e/o sabbie (1,2 e 1,6 m, 3,2 e 3,4 m, 4,6 e 4,8 m e 5,6 e 5,8 m dal p.c.) e due intervalli francamente sabbiosi alla profondità compresa tra 0,8 e 1,2 m e tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 12:
 - profondità indagata: 5,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi (prevalenti in profondità, da 3,40 m) con presenza di livelli di limi e/o sabbie e più raramente sabbie (tali livelli si incontrano fino a 1,40 m) e argille organiche;
 - si osserva un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 0,8 m dal p.c. e poi, a partire da 3,0 m dal p.c., un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 13:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie nel primo metro, tra 1,4 e 1,6 m dal p.c., tra 3,2 e 3,6 m dal p.c. e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.;
 - a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 14:
 - profondità indagata: 9,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);

- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), sono presenti torbe e/o argille organiche prevalenti fino a 3,2 m da p.c. e al di sotto argille e/o limi prevalenti; all'interno di questi livelli principali si incontrano intervalli di limi e/o sabbie (0,4÷0,8 m, 1,0÷1,4 m, 7,8÷8,4 m, 8,6÷9,0 m dal p.c.) e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,2 e 0,4 m dal p.c.;
- a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 15:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,6÷1,2 m, 1,8÷2,0 m, 2,6÷2,8 m, 3,2÷3,4 m e 5,6÷6,0 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (0,0÷0,4 m, 2,4÷2,6 m, 3,0÷3,2 m e 4,0÷4,2 m dal p.c.) e torbe/argille organiche tra 3,8 e 4,0 m da p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 1,0 m dal p.c., successivamente aumenta gradualmente con la profondità; la resistenza laterale ha una leggera tendenza all'aumento con la profondità fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 16:
 - profondità indagata: 6,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (1,0÷1,4 m e 3,6÷3,8 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,2÷0,4 m, 2,6÷2,8 m, 2,0÷2,6 m, 3,0÷3,2, 4,4÷4,6 m e 5,0÷5,2 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie tra 0,6÷1,0 m e 1,4÷1,6 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 1,0 m dal p.c., successivamente scende fino alla profondità di 3,2 m da p.c. per poi aumentare fino a raggiungere il rifiuto strumentale; la resistenza laterale sale fino alla profondità di 0,6 m da p.c.,

successivamente i valori diminuiscono fino a 1,4 m da p.c., si osserva poi un aumento di fs fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 17:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2÷0,4 m, 0,6÷0,8 m, 1,6÷1,8 m, 2,2÷2,4 m, 3,6÷3,8 m, 4,6÷4,8 m e 5,2÷5,6 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (0,4÷0,6 m e 3,4÷3,6 m dal p.c.) e torbe/argille organiche tra 0,8 e 1,0 m e 2,8 e 3,2 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 1,0 m dal p.c., successivamente aumenta gradualmente fino alla profondità di fine infissione; la resistenza laterale ha piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 18:
 - profondità indagata: 5,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (2,4÷2,6 m, 4,2÷4,4 m e 5,0÷5,2 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,0÷0,4 m, 1,0÷1,2 m, 1,6÷1,8 m, 2,8÷3,6 m e 4,6÷4,8 m dal p.c.) e un intervallo francamente sabbioso tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 0,8 m dal p.c., successivamente scende fino alla profondità di 1,2 m dal p.c., per poi aumentare fino a raggiungere il rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino al rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 19:
 - profondità indagata: 6,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e

- laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di orizzonti di limi e/o sabbie (0,2÷0,6 m, 2,4÷2,6 m e 5,2÷6,2 m dal p.c.) e due intervalli di torbe/argille organiche tra la profondità compresa tra 0,8÷1,0 m e 1,6÷2,0 m dal p.c.;
- i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha invece piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 20:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (0,0÷0,6 m, 1,2÷1,4 m, 1,8÷2,0 m, 4,8÷5,0 m e 5,8÷6,0 dal p.c.) di limi e/o sabbie (1,6÷1,8 m, 2,2÷3,0 m, 3,6÷4,0 m e 4,6÷4,8 m dal p.c.), due orizzonti francamente sabbiosi tra la profondità tra 0,8÷1,0 m e 4,2÷4,4 m dal p.c. e un intervallo di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 4,0÷4,2 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente nei primi 0,8 m dal p.c per poi crescere, da 1,0 m da p.c., più gradualmente con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale mostra invece piccole variazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,6 m dal p.c., successivamente si osserva un aumento della resistenza laterale fino al rifiuto strumentale.
 - Prova penetrometrica statica CPT 21:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di un livello di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 0,2 e 0,4 m dal p.c., limi e/o sabbie (0,4÷0,8 m, 1,4÷1,6 m, 2,4÷2,8 m, 3,4÷3,6 m e 4,2÷4,6 m dal p.c.) e due orizzonti francamente sabbiosi alle profondità comprese tra 1,6÷2,4 m e 3,8÷4,2 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale presenta invece piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,0 m dal p.c., successivamente aumenta fino a raggiungere il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 22:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di un livello di limi e /o sabbie alla profondità compresa tra 2,4 e 2,6 m dal p.c. e livelli francamente sabbiosi (0,2÷0,4 m, 2,2÷2,6 m e 2,8÷3,0 m dal p.c.);
 - i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale presenta piccole variazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,2 m dal p.c., successivamente si osserva un aumento di fs fino al rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 23:
 - profondità indagata: 5,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di un intervallo francamente sabbioso alla profondità compresa tra 0,0 e 0,4 m dal p.c., limi e/o sabbie (3,8÷4,6 m e 5,2÷5,4 m dal p.c.) e un orizzonte di torba/argille organiche alla profondità compresa tra 0,6÷0,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha una leggera tendenza a crescere con la profondità fino al rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 24:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);

- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (0,2 e 0,4 m, 0,6 e 0,8 m e 3,6 e 4,0 m dal p.c.), limi e/o sabbie (0,4÷0,6 m e 3,8÷4,4 m dal p.c.) e un orizzonte di torba/argille organiche alla profondità compresa tra 1,6÷1,8 m dal p.c.;
- i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,0 m dal p.c., successivamente si osserva un aumento fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 25:
 - profondità indagata: 5,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di intervalli di limi e/o sabbie (0,0 e 0,4 m, 0,8 e 1,2 m, 1,6 e 1,8 m, 3,2 e 3,4 e 4,0 e 4,2 m dal p.c.), sabbie (0,6÷0,8 m e 1,8÷2,2 m dal p.c.) e un livello di torba/argille organiche alla profondità compresa tra 1,2÷1,6 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha una leggera tendenza a crescere con la profondità per poi arrivare a rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 26:
 - profondità indagata: 5,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di un livello di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 0,2 e 0,4 m dal p.c., limi e/o sabbie alla profondità compresa tra 2,8 e 3,0 m dal p.c., livelli francamente sabbiosi (1,4 e 1,6 m, 1,6 e 2,0 m e 2,8 e 3,0 m dal p.c.) e due orizzonti di sabbie e/o ghiaie alle profondità comprese tra 0,4 e 0,6 m e tra 2,0 e 2,2 dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha una leggera tendenza a crescere con la profondità fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 27:
 - profondità indagata: 6,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di orizzonti francamente sabbiosi (0,0 e 0,2 m, 1,0 e 1,2 m, 2,8 e 3,0 e 3,2 e 3,4 m dal p.c.), limi e/o sabbie (1,2 e 1,4 m, 1,8 e 2,0 m, 3,0 e 3,2 m, 3,4 e 3,6 e 5,2 e 5,4 m dal p.c.) e un livello di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale oscilla su valori bassi fino a fondo infissione (rifiuto strumentale).
- Prova penetrometrica statica CPT 28:
 - profondità indagata: 7,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2÷0,4 m, 1,5÷1,7 m, 2,0÷2,6 m, 3,0÷3,2 m, 3,8÷4,0 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,6÷1,0 m, 1,2÷1,4 m, 2,7÷2,9 m, 3,4÷3,6 m, 5,4÷5,6 m, 5,8÷6,0 m dal p.c.) e un livello francamente sabbioso tra 2,4 e 2,6 m dal p.c.;
 - a partire da 1,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 29:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha

attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,5÷0,7 m, 1,5÷1,7 m, 1,7÷1,9 m, 2,3÷2,8 m, 3,2÷3,6 m, 7,7÷7,9 m e 7,1÷7,2 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,7÷0,9 m, 2,1÷2,3 m, 4,3÷4,5 m, 5,3÷5,5 m e 6,1÷6,3 dal p.c.) e un livello francamente sabbioso tra 3,9 e 4,1 m dal p.c.;

- a partire da 1,8 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 30:
 - profondità indagata: 7,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,9÷1,1 m, 1,7÷2,1 m, 2,9÷3,1 m, 3,3÷3,5 m e 4,9÷5,1, 5,9÷5,5 m, 6,5÷6,7 m e 5,1÷5,3 m dal p.c.), torbe/argille organiche (1,1÷1,7 m, 2,5÷2,7 m, 4,3÷4,5 m, 4,7÷4,9 m dal p.c.) e due livelli francamente sabbiosi tra 3,1 e 3,3 m e tra 4,5÷4,7 m da p.c.;
 - a partire da 1,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta con la profondità, fino al rifiuto strumentale, la resistenza laterale invece oscilla su valori simili per tutta la lunghezza della prova.
- Prova penetrometrica statica CPT 31:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,5÷0,7 m, 0,9÷1,1 m, 1,7÷1,9 m, 3,5÷3,7 m, 4,9÷5,1, 4,3÷4,9 m e 5,1÷5,9 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (1,3÷1,7 m, 1,9÷2,1 m, 3,7÷3,9 m dal p.c.) e due orizzonti di torbe/argille organiche tra 0,3 e 0,5 m ed tra 3,1÷3,3 m dal p.c.;
 - a partire dal piano di campagna si riscontrano valori alti di resistenza alla punta che diminuiscono fino alla profondità di 3,0 m, successivamente, dalla profondità di 3,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta con la profondità, fino al rifiuto strumentale, la resistenza laterale invece oscilla su valori simili per tutta la

lunghezza dell'infissione.

- Prova penetrometrica statica CPT 32:
 - profondità indagata: 6,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (0,2 e 0,4 m, 0,6 e 1,0 m e 5,0 e 5,2 m dal p.c.), limi e/o sabbie (4,0 e 4,4 m, 5,0 e 5,2 m e 5,6 e 6,0 m dal p.c.) e un orizzonte di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 1,0 e 1,2 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente nel primo metro, successivamente i valori scendono fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. per poi aumentare di nuovo con la profondità fino al rifiuto; la resistenza laterale oscilla su valori bassi fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 33:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2 e 0,4 m, 2,2 e 2,4 m e 2,8 e 3,0 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (0,6 e 0,8 m e 1,8 e 2,0 m dal p.c.) e un intervallo di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 2,4 e 2,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente fino alla profondità di 0,8 m da p.c., successivamente i valori scendono fino alla profondità di 2,2 m dal p.c., per poi aumentare di nuovo progressivamente fino al rifiuto; la resistenza laterale oscilla su valori bassi fino a fondo infissione (rifiuto strumentale).
- Prova penetrometrica statica CPT 34:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e

laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0 e 0,4 m, 0,8 e 1,8 m, 3,0 e 3,4 m e 5,4 e 5,8 m dal p.c.), orizzonti di torbe/argille organiche (2,0 e 2,2 m, 2,4 e 2,6 m e 3,6 e 3,8 m dal p.c.) e un livello francamente sabbioso tra la profondità di 0,6 e 0,8 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale oscilla su valori bassi per poi raggiungere il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 35:
 - profondità indagata: 10,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2 e 0,4 m, 0,8 e 1,2 m e 8,4 e 8,6 m dal p.c.), intervalli di torbe/argille organiche (1,6 e 2,2 m, 3,2 e 3,4 m e 7,0 e 7,2 m dal p.c.), un livello francamente sabbioso tra la profondità di 0,4 e 0,6 m dal p.c. e un livello di sabbie e/o ghiaie tra la profondità di 0,6 e 0,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente fino alla profondità di 1,2 m dal p.c., successivamente i valori scendono fino alla profondità di 2,2 m dal p.c., per poi aumentare di nuovo con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale tende a salire fino alla profondità di 1,6 m dal p.c. per poi diminuire fino alla profondità di 2,0 m dal p.c., successivamente oscilla su valori costanti fino alla profondità di 8,4 m dal p.c. e, prima di arrivare a rifiuto, cresce costantemente raggiungendo alti valori di resistenza laterale.
- Prova penetrometrica statica CPT 36:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0 e 0,4 m, 1,6 e 2,0 m, 2,8 e 3,0 m, 5,2 e 5,4 m, 5,6 e 5,8 m e 6,0 e 6,2 m dal p.c.) e due orizzonti di

torbe/argille organiche alle profondità comprese tra 1,4 e 1,8 m e tra 3,6 e 3,8 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta oscillano su valori costanti fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. (tranne alla profondità compresa tra 2,0 m e 2,4 m da p.c. dove è presente un livello con alti valori di resistenza alla punta), successivamente i valori tendono ad aumentare fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi per poi raggiungere il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 37:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di intervalli di limi e/o sabbie (1,0 e 1,4 m, 2,0 e 2,2 m, 2,6 e 3,2 m, 3,8 e 4,0 m, 4,8 e 5,0 m e 6,0 e 6,2 m dal p.c.), un orizzonte di torbe/argille organiche tra 3,4 e 3,6 m e un livello francamente sabbioso alla profondità compresa tra 5,8 e 6,0 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono ad aumentare fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale risultano piuttosto costanti fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 38:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di un livello francamente sabbioso dal piano di campagna fino alla profondità 0,6 m da p.c., intervalli di limi e/o sabbie (0,8 e 1,0 m, 2,8 e 3,4 m e 4,2 e 4,4 m dal p.c.) e due orizzonti di torbe/argille organiche alle profondità comprese tra 1,2 e 1,4 m e tra 2,2 e 2,6 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta e della resistenza laterale tendono ad aumentare con la profondità fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 39:

- profondità indagata: 10,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (0,2 e 0,4 m, 1,8 e 2,0 m e 3,6 e 3,8 m dal p.c.), di limi e/o sabbie (0,4 e 0,6 m, 0,8 e 1,4 m, 1,6 e 1,8 m, 2,0 e 3,0 m, 5,6 e 6,0 m, 6,4 e 6,6 m, 8,4 m e 9,4 e 9,6 e 10,2 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (4,0 e 4,2 m, 4,4 e 4,6 m e 9,4 e 9,6 m dal p.c.) e due livelli di sabbie e/o ghiaie tra 8,2 e 8,4 m e 10,2 e 10,4 m dal p.c.);
- i valori della resistenza alla punta tendono a salire fino alla profondità di un metro dal p.c. per poi scendere fino alla profondità 2,4 m dal p.c., successivamente i valori di qc tendono a salire fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi per poi raggiungere il rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 40:
 - profondità indagata: 12,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di intervalli torbe/argille organiche (2,2 e 2,8 m, 3,2 e 3,4 m, 4,8 e 5,0 m, 5,2 e 5,8 m e 7,0 e 7,4 m dal p.c.), di limi e/o sabbie (6,0 e 6,2 m, 11,2 e 11,4 m e 11,6 e 11,8 m dal p.c.) ed un livello francamente sabbioso alla profondità compresa tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 41:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di orizzonti torbe/argille organiche (1,4 e 3,4 m, 3,8 e 4,0 m, 5,6 e 6,4 m e 8,2 e 9,0 m dal p.c.), un livello francamente sabbioso alla

profondità compresa tra 0,2 e 0,6 m dal p.c. ed un livello di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di 0,8 m dal p.c. per poi diminuire fino alla profondità di 2 m dal p.c, successivamente i valori di resistenza alla punta aumentano fino al rifiuto; la resistenza laterale invece cresce piuttosto progressivamente dal piano di campagna fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 42:
 - profondità indagata: 8,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di intervalli di torbe/argille organiche (0,6 e 0,8 m, 1,0 e 3,6 m, 4,4 e 4,8 m, 6,0 e 6,4 m e 8,0 e 8,4 m dal p.c.) ed un livello di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 8,6 e 8,8 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta, a partire dal piano di campagna, cresce fino alla profondità di 1,2 m da p.c. per poi scendere fino alla profondità di 2,0 m da p.c., successivamente i valori di qc aumentano fino a raggiungere il rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale aumentano fino alla profondità di 2,0 m da p.c. per poi scendere fino alla profondità di 2,6 m da p.c., successivamente oscillano su valori bassi per poi arrivare a rifiuto.
- Prova penetrometrica statica CPT 43:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (1,2 e 3,4 m, 3,6 e 4,0 m, 4,4 e 5,0 m e 7,8 e 9,0 m dal p.c.), un livello di limi e/o sabbie alla profondità compresa tra 0,6 e 1,0 m da p.c. e uno francamente sabbioso alla profondità compresa tra 0,4 e 0,6 m dal p.c.;
 - i valori della qc tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di 0,8 m dal

p.c. per poi scendere fino alla profondità di 1,8 m da p.c., successivamente la resistenza alla punta aumenta fino alla profondità di rifiuto strumentale; la resistenza laterale cresce progressivamente con la profondità fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 44:
 - profondità indagata: 9,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di orizzonti di torbe/argille organiche (1,8 e 4,0 m, 4,2 e 6,0 m, 6,2 e 6,6 m, 6,0 e 6,8 m, 7,4 e 7,8 m, 8,0 e 8,2 m e 8,4 e 8,8 m dal p.c.), limi e/o sabbie (0,4 e 0,6 m, 1,4 e 1,6 m e 7,2 e 7,4 m dal p.c.), un livello francamente sabbioso alla profondità compresa tra 0,6 e 0,8 m dal p.c. e uno di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 1,0 e 1,2 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire fino alla profondità di 1,2 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 3,0 m da p.c., successivamente la resistenza alla punta aumenta fino a raggiungere il rifiuto; i valori della resistenza laterale crescono fino alla profondità di 2,4 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 3,2 m dal p.c., successivamente oscillano su valori bassi fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 45:
 - profondità indagata: 7,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (1,4 e 1,6 m, 1,8 e 2,0 m, 2,2 e 2,8 m, 3,0 e 3,4 m, 3,8 e 4,0 m, 4,4 e 4,6 m, 5,0 e 5,4 m, 5,6 e 5,8 m e 6,0 e 6,6 m da p.c.), due orizzonti di limi e/o sabbie alle profondità comprese tra 1,6 e 1,8 m e tra 2,2 e 2,4 m dal p.c., un livello francamente sabbioso alla profondità compresa tra 0,8 e 1,0 m da p.c. e due livelli di sabbie e/o ghiaie alle profondità comprese tra 5,8 e 6,0 m e tra 6,6 e 7,0 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di 1,2 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 2,4 m dal p.c.,

successivamente i valori di resistenza alla punta aumentano fino a raggiungere il rifiuto; i valori della resistenza laterale oscillano su valori medio-bassi fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 46:
 - profondità indagata: 9,6 m da p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (1,2 e 3,0 m, 5,0 e 5,2 m e 6,8 e 7,0 m dal p.c.) ed un orizzonte di limi e/o sabbie alla profondità compresa tra 0,6 e 1,0 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di 1,0 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 2,6 m dal p.c., successivamente aumentano fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale cresce fino alla profondità di 1,8 m da p.c. per poi scendere fino alla profondità di 3,2 m dal p.c., successivamente fs appare costante per poi raggiungere il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 47:
 - profondità indagata: 9,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (1,8 e 3,4 m, 6,2 e 6,6 m, 8,0 e 8,2 m e 8,4 e 8,8 m dal p.c.), limi e/o sabbie (0,4 e 0,6 m, 1,4 e 1,6 m, 7,2 e 7,4 m dal p.c.), un orizzonte francamente sabbioso alla profondità compresa tra 0,6 e 0,8 m dal p.c. ed un intervallo di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 1,0 e 1,2 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta tendono a salire dal piano di campagna fino alla profondità di 1,2 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 3,2 m dal p.c., successivamente i valori di qc aumentano fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale crescono fino alla profondità di 2,4 m dal p.c. per poi scendere fino alla profondità di 3,2 m dal p.c., successivamente oscillano su valori bassi fino a

raggiungere il rifiuto.

- Prova penetrometrica statica CPT 48:
 - profondità indagata: 8,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con rari livelli organici e di limi e/o sabbie;
 - dopo un primo strato caratterizzato da elevati valori di qc e fs, avente uno spessore di 2,40 m, la resistenza alla punta e laterale appaiono abbastanza costanti fino a 7,60 m dal p.c. quando aumentano progressivamente fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 49:
 - profondità indagata: 8,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un primo strato francamente organico (fino a 3,20 m dal p.c.) soprastante argille e/o limi;
 - dopo un picco iniziale, a partire da 1,00 m dal p.c. la resistenza alla punta e laterale aumentano con leggera progressione a partire da 2,20 m e in modo netto da 6,00 m dal p.c. fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 50:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un alternanza di argille e/o limi e limi e/o sabbie, con alcuni livelli francamente sabbiosi;
 - dopo un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 1,0 m dal p.c., si osserva, a partire da 2,4 m, un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 51:

- profondità indagata: 5,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato in prevalenza argille e/o limi con alcuni livelli di limi e/o sabbie;
- dopo un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 1,0 m dal p.c., si osserva, a partire da 2,2 m, un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 58:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 1,0÷1,2 m, 2,2÷2,6 m, 3,0÷3,6 m dal p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 2,6 e 3,0 m dal p.c.;
 - a partire da 3,1 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 59:
 - profondità indagata: 6,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,4 m, 0,6÷1,0 m, 2,4÷3,0 m, 3,0÷3,6 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie (0,4÷0,6 m, 1,0÷1,4 m, 4,0÷4,6 m dal p.c.);
 - a partire da 5,0 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 60:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e

laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,6 m, 3,2÷3,4 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie (0,6÷1,0 m, 1,4÷1,8 m, 2,2÷2,4 m, 4,8÷5,4 m, 6,8÷7,0 m dal p.c.);

- a partire da 3,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 61:
 - profondità indagata: 6,80 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,6÷0,8 m, 1,0÷1,2 m, 2,0÷2,4 m, 3,4÷4,0 m, 5,0÷5,6 m, 6,6÷6,8 m dal p.c.) e di livelli francamente sabbiosi (0,8÷1,0 m, 1,2÷1,4 m, 1,6÷2,0 m, 6,4÷6,6 m dal p.c.);
 - si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 62:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 0,8÷1,2 m, 1,4÷1,6 m, 1,8÷2,0 m, 2,4÷3,0 m, 3,6÷3,8 m, 5,0÷5,2 m, 7,0÷7,2 m dal p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;
 - a partire da 5,8 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.

6.3.2. Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

Nella campagna del 2017 sono state eseguite n. 25 prove penetrometriche statiche con piezocono denominate CPTU01÷CPTU25.

Le prove penetrometriche statiche CPTU sono state eseguite con un penetrometro cingolato gommato, modello TG 63-200 KN, capace di una spinta di 200 kN (20 ton), progettato e prodotto da Pagani Geotechnical Equipment di Piacenza, attrezzato con punta elettrica/piezocono Geotech. Le prove sono state realizzate secondo le specifiche ASTM D 5578 - 95 (*Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*) e ISSMFE (*Technical Committee on Penetration Testing (1988) - Cone Penetration Test (CPT): International Reference Test Procedure*). Le verticali hanno raggiunto il rifiuto strumentale a una profondità inferiore ai 15 m dal p.c. previsti. Di seguito si descrivono le prove eseguite (si vedano le sezioni litologiche nelle tavole allegate):

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 01:
 - Profondità indagata: 9,72 m dal p.c.;
 - Nel primo metro circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (qc), con picco fino a circa 10 MPa alla profondità di 50 cm dal p.c., primo metro di spessore costituito prevalentemente da sabbia limosa e limo sabbioso nella metà superiore e terreni coesivi molto consistenti nella metà inferiore di questo intervallo (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della qc nella colonna argillosa, con qc compresa mediamente fra 2 e 3 MPa, con punte locali di 4 MPa; da circa 9,50 m p.c. fino a fondo infissione la qc torna a crescere fino a circa 6 MPa;
 - La resistenza laterale (fs) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (qc), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori fino a 500 kPa in corrispondenza della profondità di circa 1 m p.c., per diminuire progressivamente nella colonna argillosa fino a 100÷150 kPa a 6,50 m dal p.c., per poi risalire fino a valori di 400÷500 kPa, sempre nella colonna argillosa, fino a fondo infissione (9,72 m dal p.c.);
 - La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a circa 2,5 m dal p.c., poi aumenta progressivamente nella colonna argillosa fino alla profondità di circa 6 m p.c. con valori di pressione dei pori che raggiungono 1500÷1800 kPa, poi si assesta a 1250 kPa fino a 7,5 m dal p.c. e torna ad aumentare fino a quasi 3000 kPa a fondo infissione.

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 02:
 - Profondità indagata: 10,64 m dal p.c.;
 - Nei primi 70 cm circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), fino a circa 7 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia limosa e limo sabbioso (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della q_c in presenza di argille, con q_c compresa mediamente fra 2,00 e 4,00 MPa, fino a raggiungere valori prossimi a 1,5 MPa in corrispondenza di argille poste a circa 2,00÷2,50 m dal p.c.;
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori di 250÷450 kPa nell'intervallo 0,75÷1,75 m dal p.c. costituito da argille e argille limose consistenti o molto consistenti, per diminuire ed assestarsi a valori di 100÷200 kPa nell'intervallo argilloso fino a circa 9,00 m dal p.c., per poi crescere nelle argille a valori medi di 300 kPa fino a fondo infissione (10,64 m dal p.c.);
 - La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a circa 3 m dal p.c., poi aumenta progressivamente nella colonna argillosa fino alla profondità di circa 9 m dal p.c. con valori di pressione dei pori che raggiungono 1250 kPa, poi si annulla a circa 9,25 m dal p.c. e torna ad aumentare fino a 250 kPa a fondo infissione.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 03:
 - Profondità indagata: 8,28 m dal p.c.;
 - Nei primi 1,7 m da p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), con picco fino a circa 7 MPa alla profondità di 1 m dal p.c.. I primi 1,7 m di spessore sono costituiti prevalentemente da argille e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fine infissione si ha una riduzione della q_c compresa in un intervallo tra 2 e 3 Mpa.
 - La resistenza laterale (f_s) presenta andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene il picco presente nel livello superiore si riscontri ad una profondità di 1,5 metri per motivi litologici con una f_s di circa 500kPa; oltre 1,7 m l'andamento

della resistenza laterale diminuisce rispetto al livello soprastante oscillando tra 150 kPa e 250 kPa fino a fondo infissione (8,28 m dal p. c.);

- La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi a 0 kPa fino a circa 2,7 m dal p.c., successivamente aumenta nella colonna argillosa fino a valori di 1.375 kPa alla profondità di 6,2 m dal p.c. per poi oscillare fino a fondo infissione (8,28 m dal p.c.) su valori compresi tra 1.100 e 1.300 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 04:
 - Profondità indagata: 9,22 m dal p.c.;
 - Nei primi 50 cm circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), superiori a circa 5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia e sabbia limosa (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della q_c in presenza di argille, con q_c compresa mediamente fra 2,00 e 2,50 MPa, fino a raggiungere valori inferiori a 1 MPa in corrispondenza di argille con contenuto organico discreto a circa 2,00÷2,50 m dal p.c.;
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori fino a 400 kPa nell’intervallo argilloso 0,50÷1,00 m p.c., per diminuire fino a 100 kPa a 2,50 m dal p.c. nell’intervallo con discreto contenuto organico, per poi assestarsi a valori di 100÷250 kPa nella colonna argillosa sottostante fino a fondo infissione (9,22 m dal p.c.);
 - La pressione interstiziale (u) assume valori negativi in corrispondenza dell’intervallo 1,00÷2,80 m dal p.c., fino ad aumentare progressivamente nella colonna argillosa fino a fondo infissione con valori di pressione dei pori che raggiungono 300 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 05:
 - Profondità indagata: 10,28 m dal p.c..
 - Nei primi 1,5 m dal p.c. si rilevano elevati valori della resistenza alla punta, soprattutto in prossimità del piano di campagna dove q_c raggiunge 5,7 MPa (presenza di suolo compatto); dalla profondità di 1,5 m dal p.c. fino a fondo infissione (10,28 m dal p.c.), i valori della resistenza alla punta rimangono abbastanza costanti, con valori più bassi

rispetto al livello soprastante, oscillando da 0,7 a 3,6 MPa; le oscillazioni più marcate corrispondono a livelli argillosi più compatti.

- La resistenza laterale (f_s) presenta andamento simile alla resistenza alla punta (q_c), dal piano di campagna la f_s inizia a crescere fino a raggiungere il valore massimo a 1,0 dal p.c. (350 kPa); da 1,5 m dal p.c. risale fino a 280 kPa alla profondità di 3,7 m dal p.c. per poi diminuire e oscillare tra 100 e 205 kPa fino alla profondità di 8,0 m dal p.c.; a partire da tale quota si ha un nuovo aumento fino a 280 kPa a 8,5 m dal p.c.; da questa profondità la resistenza laterale (f_s) diminuisce leggermente per poi risalire da 10 m dal p.c. fino a fondo infissione (10,28 m dal p.c.), dove raggiunge i 290 kPa.
- La pressione interstiziale (u) a partire dal piano di campagna è compresa tra 480 e 100 kPa fino alla profondità di 1,3 m dal p.c., poi si stabilizza intorno a 100 kPa fino alla profondità di 3,0 m dal p.c.; da tale quota la pressione cresce fino ad arrivare a 1.050 kPa (3,6 m p.c.) per poi subire una forte diminuzione a 3,7 m dal p.c. (190 kPa.); risale poi rapidamente oscillando tra 450 e 900 kPa fino alla profondità di 8,0 m dal p.c. dove arriva ad un valore di 1.050 kPa; da 8,0 m dal p.c. la u diminuisce drasticamente arrivando a raggiungere 10 kPa alla profondità di 8,1 m dal p.c., risale poi fino a fondo infissione dove raggiunge il valore massimo pari a 1.600 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 06:
 - Profondità indagata: 11,18 m dal p.c.;
 - Nei primi 1,4 m p.c. circa da p.c., si registrano elevati valori della resistenza alla punta (q_c), con valori fino a circa 7,5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia e suolo molto compatto (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino ad una profondità di 6,6 m dal p.c., si ha una drastica riduzione della q_c per la presenza di argille, con q_c compresa mediamente fra 1,5 e 3,5 Mpa; da 6,6 a 6,9 m dal p.c. è presente un livello di argilla e limo argilloso che produce un aumento della resistenza alla punta che raggiungere valori di 5,4 Mpa, fino a fondo infissione l'andamento della q_c ritorna su valori compresi tra 1,4 e 3 Mpa fino a fondo infissione (11,18 m dal p.c.);
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento molto simile alla resistenza alla punta (q_c) eccetto che per i primi 0,50 m dal p.c., dove si riscontrano valori iniziali della f_s

- bassi per la presenza di sabbie, valori compresa tra 70 e 230 kPa per salire a valori molto più alti fino alla profondità di 1,0 m dal p.c. dove la f_s che raggiunge circa 470 kPa per poi decrescere, fino ad una profondità di 1,4 m dal p.c., per ritornare a valori di 200 kPa; da 1,4 a 6,6 m dal p.c. la resistenza laterale (f_s) ha oscillazioni che variano da 100 a 230 kPa, successivamente si ha un repentino aumento della f_s , tra 6,6 e 6,9 m, dove la f_s raggiunge i 320 kPa per la presenza di limi argillosi per poi ritornare su valori compresi tra i 100 ed i 250 kPa fino alla profondità di fine infissione (11,18 m dal p.c.);
- la pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a 3,6 m dal p.c., successivamente aumenta progressivamente fino alla profondità di 6,6 m p.c. dove raggiunge il valore massimo di 1.700 kPa, poi subisce un forte calo alla profondità di 8,3 m dal p.c. (300 kPa) per poi risalire a valori compresi tra 500 e 850 kPa fino a fondo infissione (11,18 m dal p.c.).
 - Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 07:
 - Profondità indagata: 8,30 m dal p.c.;
 - dal piano di campagna fino alla profondità di 1,5 m da p.c. si rilevano elevati valori di resistenza alla punta (q_c), che oscillano tra 3,5 e 7,5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 3,4 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (q_c) oscillano su valori compresi tra 1 e 2 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 3,4 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.) si ha un incremento della resistenza alla punta che oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.
 - Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,5 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (f_s) crescono raggiungendo valori di 375 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,2 m dal p.c. raggiungendo i 100 kPa; dalla profondità di 2,2 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 120 kPa e 295 kPa.
 - I valori della pressione interstiziale (u) rimangono nulli fino alla profondità 3,4 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere fino alla profondità di 8,2 m dal p.c. raggiungendo valori di 1100 kPa, successivamente i valori di

pressione interstiziale diminuiscono ed oscillano su valori compresi tra 510 e 630 kPa fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.).

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 08:
 - Profondità indagata: 7,22 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. raggiungendo valori di 7,1 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,7 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (q_c) scendono raggiungendo valori di 1,1 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,7 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.) la resistenza alla punta (q_c) oscilla su valori compresi tra 1,2 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.
 - Dal piano di campagna fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (f_s) crescono raggiungendo valori di 500 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 3,0 m dal p.c. raggiungendo i 130 kPa; dalla profondità di 3,0 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 120 kPa e 230 kPa.
 - I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 1,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per poi stabilizzarsi su valori che oscillano tra 100 e 300 kPa fino alla profondità di 3,3 m dal p.c.; dalla profondità di 3,3 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 4,1 m dal p.c., profondità oltre la quale, i valori di resistenza alla punta (u) si stabilizzano e oscillando tra 750 e 1200 kPa fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.).
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 09:
 - Profondità indagata: 7,17 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 0,6 m dal p.c. raggiungendo valori di 6,0 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT,

Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,1 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (q_c) scendono raggiungendo valori di 1,5 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,1 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) la resistenza alla punta (q_c) oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.

- Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (f_s) crescono per poi oscillare su valori compresi tra 240 e 350 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,3 m dal p.c. raggiungendo i 160 kPa; dalla profondità di 2,3 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 140 kPa e 270 kPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 2,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per fino alla profondità di 4,7 m dal p.c. raggiungendo valori di circa 1375 kPa; dalla profondità di 4,7 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) calano bruscamente arrivando a valori di 750 kPa e successivamente risalgono fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. dove i valori della pressione interstiziale (u) arrivano a circa 1100 kPa; dalla profondità di 5,2 m dal p.c. la pressione interstiziale (u) diminuisce fino a valori di 650 kPa, successivamente i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 6,6 m dal p.c. raggiungendo i 1375 kPa; dalla profondità di 6,6 m dal p.c. i valori della pressione interstiziale (u) scendono fino 70 kPa alla profondità di 6,7 m dal p.c. , successivamente i valori di pressione interstiziale (u) risalgono fino a circa 800 kPa alla profondità di circa 7,0 m dal p.c.; alla profondità di 7,0 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) scendono fino a raggiungere valori negativi, per poi risalire fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) raggiungendo i 500 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 10:
 - Profondità indagata: 10,09 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 0,6 m dal p.c. raggiungendo valori di 6,0 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,1 m dal p.c. i valori di resistenza alla

punta (qc) scendono raggiungendo valori di 1,5 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,1 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) la resistenza alla punta (qc) oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.

- Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (fs) crescono per poi oscillare su valori compresi tra 240 e 350 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,3 m dal p.c. raggiungendo i 160 kPa; dalla profondità di 2,3 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 140 kPa e 270 kPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 2,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per fino alla profondità di 4,7 m dal p.c. raggiungendo valori di circa 1375 kPa; dalla profondità di 4,7 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) calano bruscamente arrivando a valori di 750 kPa e successivamente risalgono fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. dove i valori della pressione interstiziale (u) arrivano a circa 1100 kPa; dalla profondità di 5,2 m dal p.c. la pressione interstiziale (u) diminuisce fino a valori di 650 kPa, successivamente i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 6,6 m dal p.c. raggiungendo i 1375 kPa; dalla profondità di 6,6 m dal p.c. i valori della pressione interstiziale (u) scendono fino 70 kPa alla profondità di 6,7 m dal p.c. , successivamente i valori di pressione interstiziale (u) risalgono fino a circa 800 kPa alla profondità di circa 7,0 m dal p.c.; alla profondità di 7,0 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) scendono fino a raggiungere valori negativi, per poi risalire fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) raggiungendo i 500 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 11:
 - Profondità indagata: 9,41 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (qc) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 2,0 m dal p.c. raggiungendo valori di 4,2 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 2,0 m fino a 3,8 m dal p.c. si registra una

diminuzione con valori minimi pari a circa 1,5 MPa per la presenza di argille; in corrispondenza della profondità da 4,0 a 4,5 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (qc) tendono a risalire con valori massimi pari a circa 3,8 MPa, indicando la presenza di un livello argilloso più compatto, mentre dalla profondità di circa 4,5 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (9,41 m dal p.c.) la resistenza alla punta (qc) oscilla su valori inferiori, compresi tra 1,6 e 3,0 MPa.

- Dal piano di campagna fino alla profondità di 1,3 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (fs) crescono fino a un massimo di 370 KPa per poi oscillare su valori compresi tra 120 e 200 kPa fino a fine infissione, con picchi massimi di resistenza laterale pari a 300 KPa alla profondità di 4,3 m dal p.c. Coerentemente con quanto registrato nel diagramma della resistenza alla punta, indicando la presenza di un livello argilloso più compatto.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di circa 3,5 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere fino alla profondità di 4,2 m dal p.c. raggiungendo valori di circa 580 kPa; dalla profondità di 4,3 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) calano bruscamente arrivando a valori di 200 kPa. Si registra un ulteriore aumento della pressione interstiziale dei pori a partire da 6,5 m dal p.c. Pari a circa 550 KPa che decrescono nuovamente a circa 350 KPa in corrispondenza dello strato che va dalla profondità di 7,5 m a 8,0 m dal p.c. Si ha infine un ulteriore aumento da 8,2 m dal p.c. Fino a fondo infissione con valori che raggiungono i 600 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 12:
 - Profondità indagata: 8,19 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (qc) diminuiscono dal p.c. e in particolare a partire da circa il primo metro in cui si registrano valori di 2,5 MPa fino a circa 3,5 m dal p.c.; in questo intervallo i valori minimi di resistenza alla punta (qc) osservati sono corrispondenti alle argille e sono pari a circa 1,2 MPa. A partire da 3,5 m dal p.c. si osserva un leggero aumento del valore pari a circa 3,8 MPa seguito da un nuovo trend decrescente fino alla profondità di 6,5 m dal p.c. A questa profondità si registra un picco di valore massimo pari a circa 5,2 MPa, in corrispondenza di una lente di argilla

limosa più compatta, e una successiva diminuzione del valore fino alla profondità di fine infissione, con valori massimi pari a 3 MPa.

- I valori di resistenza laterale (f_s) aumentano dal p.c. mantenendo un andamento costante con valori medi intorno a 100 KPa fino alla profondità di 2,5 m dal p.c., in cui si assiste a un trend crescente che mostra un picco di 300 KPa alla profondità di circa 3,7 m dal p.c., in corrispondenza di un importante strato di argille più compatte. A partire da circa 4,2 m dal p.c. si assiste a un andamento oscillatorio dei valori di resistenza laterale (f_s) con valori minimi pari a circa 120 KPa e valori massimi pari a circa 230 KPa alla profondità di 6,6 m dal p.c., in corrispondenza di una lente di argilla limosa più compatta all'interno dello strato argilloso.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino a circa 1,5 m dal p.c. e tendono ad aumentare fino a un massimo di circa 480 KPa alla profondità di 2,7 m dal p.c.. Da tale profondità si ha una diminuzione del valore di pressione interstiziale (u) fino a valori prossimi allo zero. A partire dalla profondità di 3,5 m dal p.c. si osservano forti oscillazioni: il valore di pressione interstiziale (u) aumenta fino a circa 1000 KPa e decresce fino a circa 70 KPa alla profondità di 3,8 m dal p.c.; da tale profondità si registra un ulteriore aumento pari a circa 1200 KPa, che decresce nuovamente a circa 700 KPa a 5,0 m dal p.c. Si osserva un ulteriore aumento che mostra valori di oltre 1200 KPa alla profondità di 6,0 m dal p.c.; a tale profondità si osserva un brusco calo con valori registrati prossimi allo zero che crescono nuovamente fino a circa 1000 KPa alla profondità di 6,5 m dal p.c. A partire da questa profondità si assiste a un ulteriore brusco calo dei valori di pressione interstiziale (u) fino a valori negativi, che mostrano poi un trend crescente fino a fondo infissione con valori massimi pari a circa 1100 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 13:
 - Profondità indagata: 10,39 m dal p.c.;
 - Nei primi 2,70 m circa dal p.c., si rilevano elevati valori della resistenza alla punta (q_c), che oscillano tra 2,8 e 6,7 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino alla profondità di 8,4 m p.c. la resistenza alla punta oscilla da 1,6 a 4,1 Mpa per la presenza di argille; dalla profondità di 8,4 a 10,3 m dal p.c. la q_c subisce un

lieve aumento oscillando da 3,1 a 5,7 Mpa per la presenza di un livello più compatto di argilla; dalla profondità di 10,3 m dal p.c. la resistenza alla punta subisce un forte abbassamento fino alla profondità di fine infissione (10,39 m dal p.c.) dove raggiunge il valore di 1,5 Mpa.

- La resistenza laterale (f_s) fino alla profondità di 1,4 m dal p.c. tende a crescere, per poi stabilizzarsi e oscillare tra 390 e 590 kPa fino alla profondità 3,3 m dal p.c.; dalla profondità di 3,3 a 8,5 m dal p.c. la resistenza alla punta rimane abbastanza costante oscillando da 150 a 250 kPa; dalla profondità di 8,4 m dal p.c. si ha un aumento della resistenza alla punta, con valori di f_s che oscillano tra 280 e 520 kPa fino a fondo infissione (10,39 m dal p.c.).
- I valori della pressione interstiziale (u) aumentano dal piano di campagna fino ad una profondità di 4,1 m dal p.c., dove arrivano ad una pressione di circa 1200 kPa, per poi subire una fortissima diminuzione fino ad assumere valori negativi da 4,1 a 4,2 m dal p.c.; dalla profondità di 4,2 a 6,7 m dal p.c. si ha un continuo aumento della pressione interstiziale fino a valori di 1750 kPa per poi subire un forte calo alla profondità di 6,8 m dal p.c. dove raggiunge i 500 kPa; dalla profondità di 6,8 a 8,2 m la pressione interstiziale aumenta costantemente fino ad arrivare a valori di 1800 kPa per poi diminuire bruscamente alla profondità 8,2 m dal p.c. dove raggiunge i 300; da 8,2 m dal p.c. la pressione interstiziale aumenta molto repentinamente fino alla profondità di 8,7 m dal p.c. dove arriva a valori prossimi a 0 kPa; dalla profondità di 8,7 m dal p.c. la pressione aumenta costantemente fino a fondo infissione (10,39 m dal p.c.) raggiungendo pressioni interstiziali di 2250 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 14:
 - Profondità indagata: 9,21 m dal p.c..
 - Nei primi 0,6 m dal p.c. si rilevano valori della resistenza alla punta (q_c) che oscillano da 2,5 fino a 3,5 Mpa, presumibilmente per la presenza di suolo caratterizzato da limi sabbiosi e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010); da questa profondità fino a 1,7 m dal p.c. si ha un incremento della resistenza alla punta che arriva fino a 5,5 Mpa (ciò è dovuto alla presenza di suolo molto denso e compatto - SBT, Robertson, 2010). Dalla profondità di 1,7 m dal p.c. fino a fondo infissione i valori di resistenza alla punta si

mantengono abbastanza costanti oscillando tra 2,5 e 4 Mpa (argille - SBT, Robertson, 2010).

- La resistenza laterale (f_s) fino a 1,5 m dal p.c. raggiunge circa 460 kPa per poi diminuire a circa 150 kPa (-2,0 m dal p.c.). Al di sotto, fino a 8,5 m dal p.c., la resistenza laterale resta abbastanza stabile (tra 100 kPa e 250 kPa). Successivamente f_s subisce una sensibile diminuzione fino a circa 150 kPa per poi aumentare, alla profondità di 9,0 m dal p.c., a un valore prossimo a 300 kPa fino a fondo infissione.
- La pressione interstiziale (u) fino a 3,0 m dal p.c. mostra un valore costante (circa 50 kPa). Da questa fino a circa 7,5 m dal p.c. i valori della pressione interstiziale subiscono un lieve ma costante aumento arrivando ad assumere un valore di circa 250 kPa. Al di sotto si ha un repentino aumento della pressione interstiziale che raggiunge circa 400 kPa alla profondità di 8 m dal p.c. e resta costante fino a circa 8,5 m dal p.c.. Successivamente si è registrato un aumento costante dei valori fino a fondo infissione, dove assume un valore pari a circa 600 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 15:
 - Profondità indagata: 8,23 m dal p.c..
 - Nei primi 0,6 m da p.c. si rileva un aumento costante dei valori di resistenza alla punta (q_c) che da 1 MPa arrivano fino a circa 5,2 Mpa; ciò indica la presenza di suolo caratterizzato da sabbie e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010). In seguito i valori di resistenza alla punta subiscono un calo costante fino alla profondità di 1,7 m dal p.c. passando dal valore precedente (5,2 MPa) fino a circa 1,3 Mpa, indicando la presenza di suolo compatto. Successivamente, dalla profondità di 1,7 m dal p.c. fino a fondo infissione, si nota che i valori di resistenza alla punta assumono valori abbastanza costanti intorno ai 2÷2,5 MPa, con alcuni picchi fino a 3,5 MPa alla profondità di 4,5 m e 7,0 m dal p.c. (tale variazione è riconducibile alla presenza di argille).
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta, ma con oscillazioni più significative: si nota infatti che da p.c. fino alla profondità di circa 0,5 m dal p.c. f_s assume valori pari a circa 50 kPa per poi aumentare fino a 250 kPa alla profondità di 1 m dal p.c.. Successivamente si registra una diminuzione abbastanza netta della resistenza laterale che raggiunge i 100 kPa alla profondità di

circa 2 m dal p.c. per poi crescere costantemente fino a registrare valori di circa 300 kPa (a - 4,5 m). Da questo punto in poi il valore della resistenza laterale cala per attestarsi tra 200 kPa e 250 kPa fino a fondo infissione.

- La pressione interstiziale (u) ha inizialmente un trend crescente: intorno al p.c. assume valori pari a circa 50 kPa e tende poi ad aumentare superando anche 1.000 kPa alla profondità di circa 3,5 m dal p.c.. Successivamente si registrano valori che mostrano dei repentini crolli e altrettanto veloci risalite (valori negativi alla profondità di 4 m da p.c.). Fino alla profondità di 4,5 m dal p.c., si ha una risalita e la pressione interstiziale si stabilisce tra circa 750 kPa e 1.100 kPa fino alla profondità di circa 7 m dal p.c.. A questa profondità si registra un nuovo abbassamento che riporta, dopo pochi centimetri, i valori della pressione interstiziale prossimi allo zero. Al di sotto, fino a fondo infissione, la grandezza assume un valore di circa 900 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 16:
 - Profondità indagata: 8,23 m dal p.c..
 - Nei primi centimetri di suolo si nota un aumento repentino dei valori per quanto riguarda la resistenza alla punta (qc) che si attestano a circa 4,5 Mpa fino alla profondità di circa 0,5 m dal p.c., presumibilmente per la presenza di suolo caratterizzato da sabbie e limi (SBT, Robertson, 2010). Da questo punto in poi si ha un aumento del valore della resistenza alla punta fino alla profondità di 1,0 m da p.c. (dove assume un valore pari a circa 7,5 Mpa) per poi avere un nuovo abbassamento a circa 1,4 m dal p.c. (circa 2,5 Mpa) probabilmente legato a suolo compatto (SBT, Robertson, 2010); il valore resta invariato per i successivi 20 cm per la presenza di argilla e argilla sabbiosa (SBT, Robertson, 2010). Successivamente, il valore di resistenza alla punta subisce un aumento arrivando a circa 3 Mpa alla profondità di circa 2 m dal p.c., indicando la presenza di suolo compatto. Da qui fino a fondo infissione qc oscilla tra 2 Mpa e 3 Mpa, con alcuni picchi che sfiorano i 4 Mpa. (presenza di argille).
 - La resistenza laterale (fs) registra un iniziale aumento dei valori che arrivano fino a circa 500 kPa alla profondità di 1,0 m dal p.c., per poi calare a 100 kPa alla profondità di 1,5 m. Successivamente i valori oscillano intorno a 200 kPa fino alla profondità di 4,0 m dal

p.c. per poi aumentare lievemente e attestarsi tra 200 kPa e 300 kPa fino a fondo infissione.

- La pressione interstiziale (u) presenta un aumento costante nel primo metro di suolo indagato (raggiunge circa 600 kPa). Al di sotto si registra un calo fino a 150 kPa a circa 2,5 m dal p.c. e un successivo aumento fino alla profondità di circa 4,3 m dal p.c. dove u raggiunge 600 kPa. Nei successivi 60 centimetri la pressione interstiziale scende repentinamente fino a un valore di circa 100 kPa per poi aumentare (850 kPa) e diminuire nuovamente (valore prossimo a 0 kPa). In seguito si osserva un lento e costante incremento della pressione interstiziale con la profondità: si arriva infatti a valori prossimi a 900 kPa alla profondità di 7,3 m dal p.c.. La pressione interstiziale diminuisce poi ancora una volta arrivando a 300 kPa e si riporta poi a circa 850 kPa alla profondità di circa 7,8 m dal p.c. e crolla a circa 400 kPa immediatamente dopo. Da questo punto fino a fondo infissione si ha un aumento costante fino a circa 700 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 17:
 - Profondità indagata: 9,32 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un trend crescente a partire dal p.c. Fino alla profondità di circa 0,8 m dal p.c., registrando valori massimi pari a 9,0 MPa, in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); a partire da tale profondità si assiste ad una progressiva diminuzione dei valori di resistenza alla punta (q_c), tipici delle argille, che si mantengono costanti a circa 2 MPa fino a 7,3 m dal p.c., profondità a partire dalla quale si osserva un ulteriore aumento dei valori con andamento oscillatorio che mostrano valori massimi pari a circa 6 MPa in corrispondenza di uno strato argilloso più compatto alla profondità di circa 9,0 m dal p.c.
 - I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un andamento crescente fino alla profondità di 1,5 m dal p.c., con valori massimi pari a circa 450 KPa corrispondenti a uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); a partire da tale profondità si registra una diminuzione dei valori di resistenza laterale (f_s) che si mantengono costanti mediamente a circa 150 KPa fino alla profondità di circa 7,5 m dal p.c., in corrispondenza di un importante strato argilloso; a partire da 7,5 m dal

p.c. si osserva un andamento oscillatorio con valori massimi pari a circa 450 KPa in corrispondenza di uno strato argilloso più compatto alla profondità di circa 9,0 m dal p.c.

- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un trend crescente a partire dal p.c. fino alla profondità di 7,3 m dal p.c., in cui si registra un valore superiore a 800 KPa; a partire da tale profondità si osserva un brusco calo del valore di pressione interstiziale (u) fino a circa 100 KPa, che tende ad aumentare nuovamente fino a fondo infissione raggiungendo valori massimi pari a circa 700 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 18:
 - Profondità indagata: 10,19 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un andamento crescente a partire dal p.c. fino a circa 1,0 m con valori massimi pari a circa 7 MPa in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); a partire da tale profondità si assiste a un trend decrescente fino a circa 1,8 m dal p.c., in cui i valori di resistenza alla punta (q_c) mantengono un andamento costante fino a circa 8,5 m dal p.c., mostrando valori medi pari a circa 2,5 MPa, caratteristici di substrati argillosi. Da sottolineare la presenza di un picco di valore prossimo a 3,5 MPa da 4,0 m a 4,5 m dal p.c., in corrispondenza di un livello argilloso più compatto. A partire da 8,5 m dal p.c. si osserva un ulteriore picco con valori massimi registrati pari a circa 4,5 MPa, che decrescono e tendono nuovamente a risalire fino a fondo infissione dove si registra un valore pari a circa 5,5 MPa.
 - I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un andamento crescente fino alla profondità di circa 1,5 m dal p.c., in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), mostrando valori massimi pari a circa 400 KPa; a partire da tale profondità si osserva un trend decrescente del valore di resistenza laterale (f_s) che mostra valori prossimi ai 200 KPa e un picco alla profondità di circa 4,2 m dal p.c. con valori pari a circa 300 KPa, in corrispondenza di uno strato argilloso più compatto; da 4,5 m dal p.c. fino a 8,5 m dal p.c. l'andamento dei valori di resistenza laterale (f_s) mostrano nuovamente un andamento costante con valori medi pari a circa 200 KPa tipici dei substrati argillosi; a partire da tale profondità si osserva

inizialmente un calo con valori prossimi a circa 100 Kpa e un successivo aumento fino a fondo infissione pari a circa 450 KPa.

- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un andamento crescente a partire dal p.c. fino a circa 5,5 m dal p.c., con valori massimi pari a circa 1250 KPa mostrando un brusco calo del valore a circa 4,2 m dal p.c. pari a 250 KPa. A partire da 5,5 m dal p.c. si osserva inizialmente un brusco calo del valore di pressione interstiziale (u) a circa 500 MPa che tende poi a risalire fino a circa 1100 KPa alla profondità di 6,5 m dal p.c.; a circa 6,7 m dal p.c. si osserva un intervallo oscillatorio in cui i valori della pressione interstiziale (u) tendono inizialmente a decrescere fino a circa 200 KPa e risalire a circa 1200 KPa alla profondità di 7,5 m dal p.c.; a partire da tale profondità si assiste a un ulteriore brusco calo a circa 200 KPa che risale fino a circa 1400 KPa alla profondità di 8,6 m dal p.c.; da 8,7 m dal p.c. si registra un ulteriore calo pari a circa 200 KPa fino a circa 600 KPa alla profondità di 9,5 m dal p.c.; a partire da tale profondità si osserva un ulteriore aumento fino a 10 m dal p.c. in cui si registra un valore massimo pari a 1700 KPa, valore che diminuisce a fondo infissione fino a 1000 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 19:
 - Profondità indagata: 12,13 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un andamento crescente raggiungendo valori massimi pari a circa 9 MPa, fino alla profondità di circa 1,0 m dal p.c.; a partire da tale profondità si osserva un costante decremento dei valori di resistenza alla punta (q_c) con valori prossimi allo zero fino alla profondità di circa 7,0 m dal p.c., in corrispondenza di un suolo costituito da materiale organico. Da sottolineare nel tratto da 4,0 a 4,5 m dal p.c. un'interruzione della sequenza a causa della perdita di dati durante l'acquisizione. A partire dalla profondità di 7,0 m dal p.c. si osserva un trend in crescita dei valori di resistenza alla punta (q_c) che si stabilizzano a circa 9,5 m dal p.c. con valori massimi di circa 5 MPa, in corrispondenza di un substrato argilloso compatto; tali valori tendono a diminuire a partire da 11,0 m dal p.c. fino a valori pari a circa 1,5 MPa che risalgono a 3,5 MPa in corrispondenza del fondo infissione.
 - I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un trend crescente fino alla profondità di circa 1,8 m dal p.c. con valori massimi pari a circa 250 KPa; a partire da tale profondità

fino a circa 9,0 m dal p.c. tendono a diminuire con un andamento costante che mostra valori medi di circa 50 KPa. Si sottolinea anche la perdita di dati durante l'acquisizione nel tratto corrispondente a 4,0 e 4,5 m dal p.c. A partire da 9,0 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un trend crescente raggiungendo valori massimi pari a circa 450 KPa alla profondità di circa 9,5 m dal p.c., in corrispondenza di un substrato argilloso compatto; dai 10,0 m da p.c. tali valori tendono a diminuire inizialmente mostrando valori pari a circa 350 KPa e successivamente, a partire da 11,2 m dal p.c. e fino a fondo infissione presentando valori pari a 200 KPa.

- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano valori pari a circa 500 KPa a partire dal piano campagna fino a circa 0,8 m da esso; a partire da tale profondità fino a circa 4,0 m dal p.c. si osservano valori negativi che tendono a risalire costantemente a partire da 4,5 m dal p.c., con valori comunque bassi, di circa 20 KPa fino a circa 7,3 m dal p.c. A partire da tale profondità si osserva la presenza di due lievi picchi alle profondità di 7,3 m dal p.c. e 7,6 m dal p.c. in cui si registrano valori pari a circa 500 KPa, valori che tendono a diminuire e nuovamente a risalire a partire da 8,5 m dal p.c., mostrando valori massimi pari a circa 2000 KPa alla profondità di 9,5 m dal p.c.; a tale profondità si osserva un brusco calo dei valori della pressione interstiziale (u) fino a valori prossimi allo zero, che tendono a risalire fino ad arrivare a un massimo di circa 2500 KPa alla profondità di 11,0 m dal p.c.; a partire da tale profondità si assiste a un nuovo decremento dei valori della pressione interstiziale (u) e una successiva risalita in corrispondenza del fondo infissione pari a circa 2000 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 20:
 - Profondità indagata: 8,29 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un andamento crescente a partire dal piano campagna fino al primo metro da questo, registrando valori massimi pari a circa 6 MPa, in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010). A partire da 1,0 m dal p.c. si osserva un decremento dei valori di resistenza alla punta (q_c) che si stabilizzano mediamente a circa 2,0 MPa, valori caratteristici di substrati argillosi, fino a circa 6,0 m dal p.c.; a partire da tale profondità si registra un andamento oscillatorio dei valori di resistenza

alla punta (qc) che mostrano picchi massimi pari a circa 5 MPa, in corrispondenza di strati argillosi più compatti.

- I valori di resistenza laterale (fs) mostrano un andamento crescente a partire dal piano campagna fino a 1,5 m dal p.c., in cui si registrano valori pari a circa 300 KPa; a partire da tale profondità si assiste ad un decremento dei valori di resistenza laterale (fs) che si stabilizzano presentando valori medi pari a circa 150 KPa fino a circa 6,0 m dal p.c. A partire da tale profondità si registra un andamento crescente e oscillatorio con valori massimi registrati pari a circa 350 KPa alla profondità di circa 8,0 m dal p.c., in corrispondenza di uno strato di materiale argilloso più compatto; da tale profondità e fino a fondo infissione (8,29 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale (fs) diminuiscono nuovamente fino a circa 150 KPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un trend crescente a partire dal piano campagna fino a 4,0 m dal p.c., in cui si registrano valori pari a circa 700 KPa; a partire da tale profondità si osserva un brusco calo del valore a circa 450 KPa, che tende a risalire a partire da circa 4,5 m dal p.c. e ad assumere un andamento costante di 700 KPa fino a circa 6,0 m dal p.c.. A partire da 6,0 m dal p.c. si osserva un ulteriore decremento del valore di pressione interstiziale (u) con valori di circa 200 KPa che tendono a risalire a 500 KPa a circa 6,5 m dal p.c. Da tale profondità e fino a fondo infissione si assiste a un andamento oscillatorio dei valori della pressione interstiziale (u) che mostra picchi minimi pari a circa 500 KPa e picchi massimi pari a circa 1500 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 21:
 - Profondità indagata: 8,90 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (qc) mostrano un andamento crescente dal piano campagna, raggiungendo valori massimi pari a circa 8 MPa che diminuiscono fino a circa 5 MPa alla profondità di 1,5 m dal p.c., in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010). A partire da tale profondità si assiste a un decremento dei valori di resistenza alla punta (qc) fino a 2,0 MPa a circa 3,0 m dal p.c., mentre a partire da tale profondità fino a circa 7,5 m dal p.c. tali valori tendono a stabilizzarsi raggiungendo mediamente valori pari a circa 3 MPa, tipici di substrati argillosi. A partire da 7,5 m dal p.c. e in particolare alla

profondità di 8,0 m da esso si osserva un picco con valori di resistenza alla punta (q_c) pari a circa 8,0 MPa, in corrispondenza di una lente di argilla limosa più compatta. Da 8,0 m dal p.c. e fino a fine infissione si osserva un ulteriore decremento dei valori che arrivano fino a circa 3,5 MPa.

- I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un andamento crescente a partire dal piano campagna e fino a circa 1,7 m dal p.c. con valori massimi pari a circa 300 KPa; a partire da tale profondità si assiste a una diminuzione di tali valori fino a circa 7,0 m dal p.c., con valori medi di circa 100 KPa, coerentemente con le caratteristiche dei substrati argillosi. A partire da circa 7,5 m dal p.c. si osserva un ulteriore aumento dei valori di resistenza laterale (f_s) fino a un massimo di circa 450 KPa in corrispondenza di una lente di argilla limosa più compatta. Da 8,0 m dal p.c. e fino a fine infissione si osserva un ulteriore decremento dei valori che arrivano fino a circa 250 KPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un andamento costante a partire dal piano campagna fino a 3,5 m dal p.c., con valori prossimi allo zero. A partire da tale profondità si osserva un trend crescente con valori pari a circa 700 KPa fino a 6,0 m dal p.c. a partire da 6,5 m dal p.c. si osserva una crescita dei valori della pressione interstiziale (u) con valori di circa 1000 KPa, seguita da un repentino calo a 250 KPa. Tale valore subisce un forte aumento fino a circa 1000 KPa alla profondità di 7,3 m dal p.c. per poi diminuire ulteriormente a circa 700 KPa. Alla profondità di circa 8,0 m dal p.c. si osserva un valore di pressione interstiziale (u) superiore ai 2000 KPa che subisce un nuovo calo a 1250 KPa per poi risalire nuovamente a valori di circa 2000 KPa fino a fondo infissione.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 22:
 - Profondità indagata: 8,26 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un andamento crescente fino ai primi 0,5 m dal p.c., in cui si registrano valori di 8,0 MPa che subiscono un repentino calo a circa 2,5 MPa per poi risalire a circa 5,0 MPa e rimanere costanti fino a circa 1,5 m dal p.c., in corrispondenza di un intervallo costituito da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010). A partire da tale profondità si osserva un decremento dei valori fino a 2,0 Mpa alla profondità di circa 3,5 m dal p.c., tipico dei substrati argillosi; tale valore

subisce un leggero aumento a partire dai 4,0 m dal p.c. fino a fondo infissione, rimanendo costante a circa 3,5 e 4,0 MPa.

- I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un aumento fino a circa 400 KPa a partire dal piano campagna fino a circa 1,5 m, in corrispondenza di un intervallo costituito da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010). A partire da tale profondità si osserva un rapido decremento di tali valori fino a 100 KPa a partire da 2,0 m dal p.c., che oscillano ma rimangono costanti fino a circa 5,5 m dal p.c. con valori medi di circa 150 KPa. A partire da 5,5 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento dei valori di resistenza laterale (f_s) con un picco massimo di circa 300 KPa che diminuisce a 200 KPa alla profondità di 7,5 m dal p.c. e poi risale nuovamente a circa 300 KPa mantenendosi costante fino a fine infissione.
- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un leggero aumento a partire dal piano campagna fino ai primi 0,5 m, profondità alla quale si osserva un brusco calo della pressione interstiziale (u) con valori prossimi allo zero fino a circa 3,5 m dal p.c. A partire da tale profondità si registra un aumento progressivo della pressione interstiziale (u) fino a circa 400 KPa alla profondità di 6,3 m dal p.c.; a tale profondità si osserva un brusco calo della pressione interstiziale (u) fino a circa 200 KPa, che risale a circa 500 KPa alla profondità di circa 6,7 m dal p.c. Si registra un ulteriore calo della pressione interstiziale (u) con valori prossimi a 300 KPa che risalgono progressivamente a 600 KPa fino a fondo infissione.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 23:
 - Profondità indagata: 8,25 m dal p.c..
 - Nei primi 1,6 m dal p.c. si rilevano elevati valori della resistenza alla punta (q_c), soprattutto nei primi metri dal piano di campagna (fino a 4,4 Mpa), per la presenza di suolo compatto (SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 1,6 m dal p.c. fino a fondo infissione (8,25 m dal p.c.), i valori della resistenza alla punta rimangono abbastanza costanti e con valori più bassi rispetto al livello soprastante, oscillando da 1,3 a 3,2 MPa, per la presenza di argille più meno compatte (SBT, Robertson, 2010); le oscillazioni più marcate corrispondono ai livelli argillosi più compatti.

- La resistenza laterale (f_s) presenta andamento simile alla resistenza alla punta (q_c), dal piano di campagna inizia a crescere fino a raggiungere il valore massimo a 0,6 m dal p.c. arrivando a 390 kPa; da 0,6 m dal p.c. la resistenza laterale (f_s) oscilla da 110 a 300 kPa, le oscillazioni maggiori sono in corrispondenza dei livelli più coesivi.
- I valori della pressione interstiziale (u) dal piano di campagna fino alla profondità di 3,7 m non variano molto e si attestano poco sopra i 100 kPa; successivamente la u inizia a salire fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. dove raggiunge 950 kPa; alla profondità di 5,2 m dal p.c. si ha un repentino abbassamento della pressione interstiziale fino a 500 kPa; al di sotto la pressione riprende a salire fino a 6,1 m dal p.c. (1.100 kPa); a questa profondità la pressione interstiziale diminuisce bruscamente fino a 350 kPa, per poi risalire in modo altrettanto repentino fino alla profondità di 6,7 m dal p.c. dove raggiunge 1.300 kPa; da 6,7 m dal p.c. i valori scendono di nuovo fino a raggiungere 50 kPa per poi risalire fino ad una profondità di 7,7 m dal p.c. (1.100 kPa); si ha poi ancora un abbassamento fino a 500 kPa alla profondità di 7,8 m dal p.c.; infine la pressione raggiunge a fondo infissione 900 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 24:
 - Profondità indagata: 10,27 m dal p.c..
 - La resistenza alla punta (q_c) inizialmente ha valori elevati (circa 4 MPa), per poi scendere a 1 MPa ad una profondità di 0,7 m dal p.c. e risalire fino alla profondità di 1,7 m dal p.c. raggiungendo 4,5 MPa (gli alti valori registrati corrispondono a suolo compatto - SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 1,7 m i valori di q_c iniziano a risalire fino a 2,4 m dal p.c. per poi oscillare tra 1,5 MPa e 4,9 MPa, per la presenza di argille (SBT, Robertson, 2010); le variazioni più accentuate corrispondono a livelli di argilla molto compatta.
 - La resistenza laterale (f_s) da 90 kPa raggiunge a 1,5 m dal p.c. raggiunge valori di 310 kPa (in questo intervallo presente suolo compatto - SBT, Robertson, 2010); da questa profondità la f_s scende a valori di 100 kPa fino a 1,8 m dal p.c. per poi variare tra 100 e 190 MPa fino alla profondità di 4,3 m dal p.c.; a tale profondità i valori sono leggermente più alti (150÷360 kPa) fino a 9,3 m dal p.c. (presenza di un livello più coesivo tra 5,5 e 5,8 m dal p.c.); dalla profondità di 9,3 m dal p.c. si ha un aumento

della resistenza laterale (fs) fino alla profondità di fine infissione, con valori che compresi tra 200 e 360 kPa.

- La pressione interstiziale (u) in prossimità del piano di campagna fino a 3,3 m è molto bassa, successivamente inizia a salire fino ad una profondità di 4,6 m dal p.c. dove raggiunge 950 kPa; la pressione subisce poi una forte diminuzione arrivando a valori negativi; alla profondità compresa tra 4,6 e 5,7 m dal p.c. i valori di u variano molto passando da $900 \div 1.500$ kPa a valori inferiori a 0 kPa; dalla profondità di 5,7 m dal p.c. la pressione cresce fino alla profondità di fine infissione dove raggiunge 1.850 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 25:
 - Profondità indagata: 9,69 m dal p.c..
 - Nei primi 1,6 m circa dal p.c., si rilevano elevati valori della resistenza alla punta (qc), che oscilla tra 1,5 e 4,3 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo compatto (SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 1,6 a 3,7 m dal p.c. la resistenza alla punta rimane pressoché costante oscillando tra 1,2 a 1,9 Mpa per la presenza di argille; dalla profondità di 3,7 fino a fine infissione (9,69 m dal p.c.) la qc varia da 1,4 a 3,9 Mpa, i valori più alti corrispondono a piccoli livelli di argille più compatte.
 - Nel primo metro dal piano di campagna i valori della resistenza laterale (fs), aumentano costantemente fino a raggiungere 340 kPa, successivamente decrescono fin alla profondità di 1,9 m p.c.; da qui fino a fondo foro (9,69 m dal p.c.) la resistenza alla punta subisce oscillazioni comprese tra 80kPa e 260 kPa per la presenza di piccoli livelli più o meno coesivi.
 - I valori della pressione interstiziale (u) sono prossimi allo zero kPa fino alla profondità di 2,5 m dal p.c., successivamente la pressione incrementa fino alla profondità 4,2 m p.c. dove raggiunge 1.100 kPa; alla profondità di 4,3 m dal p.c. la pressione interstiziale subisce una forte diminuzione arrivando a 30 kPa; dalla profondità di 4,3 m dal p.c. c'è un aumento fino a raggiungere 1.100 kPa per poi subire un forte abbassamento alla profondità di 5,1 m p.c., dove raggiunge 190 kPa; da questa profondità si registra un aumento fino a 1.200 kPa per poi subire un forte calo alla profondità di 7,6 m dal p.c. (30 kPa); successivamente. la u aumenta fino a fine infissione (9,69 m dal p.c.)

raggiungendo i 1.000 kPa.

6.4. Prova dilatometrica

Nella campagna del 2017 sono state eseguite n. 15 prove dilatometriche denominate DM01÷DM15.

Le prove sono state eseguite con un penetrometro cingolato gommato, modello TG 63-200 KN, capace di una spinta di 200 kN (20 ton), progettato e prodotto da Pagani Geotechnical Equipment di Piacenza, attrezzato con dilatometro piatto Marchetti. Il dispositivo impiegato e le metodologie sono conformi alle seguenti raccomandazioni: ASTM D 6635 - 01 (*Standard Test Method for Performing the Flate Plate Dilatometer. Book of Standards Vol. 04.09, 14 pp*); Eurocode 7, 1997 (*Geotechnical Design. Part 3. Design assisted by field tests, Flat Dilatometer Test (DMT), 8 pp.*); TC16, 2001 (*The DMT in Soil Investigations, A Report by the ISSMGE Committee TC 16, 41 pp*). Le verticali hanno raggiunto il rifiuto strumentale a una profondità inferiore ai 12 m dal p.c. previsti. Di seguito si descrivono le prove eseguite (si vedano le sezioni litologiche nelle tavole allegate):

- Prova dilatometrica DM01:
 - Profondità 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza di un intervallo superficiale dello spessore di circa 1,6 m dal p.c. costituito plausibilmente da un'alternanza di sabbia limosa e limo sabbioso; a maggiore profondità e fino a fondo indagine si registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un'argilla limosa con l'esclusione di un livello di limo argilloso (da 3,80 m a 4,80 m dal p.c.).
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra per l'intervallo definito precedentemente con l'ID (sabbia limosa e limo sabbioso) valori da circa 70 MPa a circa 260 MPa; la colonna litologica sottostante (argilla limosa) mostra valori da 9,4 MPa a 34,1 MPa, mentre nell'intervallo costituito da limo argilloso (da 3,80 m a 4,80 m dal p.c.) si registrano valori da 43,0 a 59,1 MPa.
 - Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) evidenzia, a partire dalla base dell'intervallo superficiale sopra citato, valori da 63 KPa a un massimo di 133 KPa

registrato alla profondità di circa 5,0 m dal p.c., mentre il valore massimo, pari a 165 KPa è stato registrato a una profondità di 3,8 m, in corrispondenza del livello limo argilloso.

- Prova dilatometrica DM02:
 - Profondità 10,4 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza, pur sempre ricordando che questo è un parametro che riflette il comportamento meccanico dei terreni attraversati più che la granulometria in senso stretto, di un intervallo superficiale dello spessore di un paio di metri dal p.c. costituito plausibilmente da sabbia e sabbia limosa; a maggiore profondità e fino a fondo indagine si registra una litologia (materiale) caratterizzata da un'alternanza di livelli argillo/limosi e limo/argillosi.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra per l'intervallo definito precedentemente con l'ID (sabbia e sabbia limosa) valori crescenti da circa 60 MPa a 216 MPa, mentre per la colonna litologica sottostante si registrano valori da 6 MPa a un valore massimo di circa 60 MPa.
 - Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) evidenzia, a partire dalla base dell'intervallo superficiale sopra citato (sabbia e sabbia limosa nei primi 2,0 metri dal p.c.), valori crescenti fino a un massimo di 188 KPa alla profondità di 3,6 m dal p.c che decrescono fino alla profondità di circa 9,0 m dal p.c. a un valore di 60 KPa, per poi risalire a 139 KPa in corrispondenza del fondo foro.
- Prova dilatometrica DM03:
 - Profondità 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza di un intervallo superficiale dello spessore di circa un paio di metri dal p.c. costituito da sabbia e sabbia limosa, mentre a maggiore profondità e fino a fondo indagine si registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo alternato a limo argilloso.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra, per l'intervallo definito precedentemente con l'ID (sabbia e sabbia limosa), valori elevati fino a 346 MPa, che

decregono in funzione della litologia (limo/limo argilloso), fino a un valore minimo di circa 28 MPa.

- Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (c_u) evidenzia valori elevati (fino a un massimo di circa 140-150 KPa) in corrispondenza della litologia del limo argilloso, mentre tali valori tendono a diminuire in funzione delle caratteristiche meccaniche del limo.

- Prova dilatometrica DM04:
 - Profondità 9,2 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza di un intervallo costituito da sabbia per i primi metri e da sabbia limosa con sottili livelli di limo sabbioso per i successivi due metri; a maggiore profondità (circa 4,5 m) e fino a fondo indagine si registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo, alternato a livelli di limo argilloso.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra valori elevati in funzione della litologia sabbiosa dei primi metri dal p.c., pari a un massimo di 296 MPa, valori che mostrano un trend in diminuzione presentando un minimo di circa 21 MPa.
 - Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (c_u) evidenzia valori maggiori in corrispondenza della litologia limosa pari a circa 130 KPa; tali valori mostrano un trend in diminuzione con un valore minimo di circa 70 KPa in corrispondenza dell'argilla limosa.

- Prova dilatometrica DM05
 - Profondità 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza di sabbia limosa in corrispondenza dei primi 1,5 m dal p.c., al di sotto dei quali si evidenzia la presenza di una litologia con caratteristiche meccaniche compatibili a quelle di un limo, che fino a fine indagine si presenta in alternanza con livelli di limo argilloso.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra, per l'intervallo definito

precedentemente con l'ID (sabbia limosa), valori superiori a circa 80 MPa, con un valore massimo registrato pari a circa 180 MPa. In corrispondenza della litologia limosa e limo argillosa si registra un trend decrescente con un valore minimo registrato pari a circa 25 MPa.

- Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) evidenzia, a partire dalla base dell'intervallo superficiale sopra citato (sabbia limosa nei primi 1,5 metri dal p.c.) valori superiori a circa 60 KPa, mostrando un trend crescente in corrispondenza della litologia limosa e limo argillosa registrando valori massimi pari a circa 145 Kpa.
- Prova dilatometrica DM06:
 - Profondità 10,2 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza di sottili livelli alternati di sabbia limosa e limo sabbioso per circa il primo metro da p.c, mentre a partire da circa 2,0 m dal p.c. fino a fine indagine si registra la presenza di una litologia con caratteristiche meccaniche proprie del limo, a cui si alternano livelli più o meno spessi di limo argilloso e di argilla limosa.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra valori superiori a circa 80 MPa in corrispondenza delle porzioni più sabbiose del materiale, mentre si registra un trend in diminuzione in funzione della litologia limosa e argilla limosa, in cui si registrano valori minimi pari a 24,8 MPa.
 - Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) mostra coerentemente valori più elevati in concomitanza di litologie caratterizzate dalla presenza di argilla con valori massimi pari a circa 150 KPa rispetto a quelli rilevati in corrispondenza di litologie più limose che presentano valori massimi di circa 139 Kpa.
- Prova dilatometrica DM07:
 - Profondità da 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra la presenza, pur sempre ricordando che questo è un parametro che riflette il comportamento meccanico dei terreni attraversati più che la granulometria in senso stretto, di un intervallo superficiale dello spessore di un paio di metri dal p.c. costituito plausibilmente da sabbia e sabbia

limosa; a maggiore profondità e fino a fondo indagine l'indagine registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo.

- Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra, per l'intervallo definito precedentemente con l'ID (sabbia e sabbia limosa), valori superiori a circa 70 MPa; la colonna litologica sottostante (limo) presenta valori decrescenti da circa 40 MPa a circa 7 m dal p.c., per poi risalire e definire alcuni picchi di valori prossimi a 70÷85 MPa (sempre limo, dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche).
- Il diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) evidenzia, a partire dalla base dell'intervallo superficiale sopra citato (sabbia e sabbia limosa nei primi 2,0 metri dal p.c.), valori che decrescono da circa 150 kPa a circa 80 kPa alla profondità già indicata di circa 7 m dal p.c., risalendo poi a valori superiori a circa 250 kPa nello spessore inferiore dell'indagine.
- Prova dilatometrica DM08
 - Profondità 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di un'alternanza di livelli sabbiosi e limo sabbiosi per circa 1,5 m dal p.c., mentre a maggiore profondità si registra una litologia compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo a cui si alternano livelli limo argillosi.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra valori che superano i 100 MPa in concomitanza dell'intervallo più superficiale dell'indagine, corrispondente alla litologia sabbiosa, registrando un valore massimo pari a circa 148 MPa. La colonna litologica sottostante mostra un trend in diminuzione, con valori ricompresi tra 97,5 e 26,6 MPa.
 - Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si osservano valori che tendenzialmente non superano i 100 KPa in concomitanza della litologia limosa, mentre si registrano valori superiori nei livelli limo argillosi con un massimo di 150 Kpa.
- Prova dilatometrica DM09:
 - Profondità da 8,60 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza, ricordando che questo

è un parametro che riflette il comportamento meccanico dei terreni attraversati più che la granulometria in senso stretto, di un intervallo superficiale dello spessore di un paio di metri da p.c. costituito da sabbia e sabbia limosa; a maggiore profondità e fino a fondo indagine, si registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo/limo argilloso, con l'esclusione di un sottile intervallo posto poco sopra i 6,0 m da p.c.

- Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra, per i primi 0,50 m, valori da 30 MPa a oltre 150 MPa; per la parte rimanente dell'intervallo definito punto precedente relativo all'ID (sabbia e sabbia limosa, fino a circa 2,0 m) si hanno valori di 60÷70 Mpa; la colonna litologica sottostante (limo) presenta valori compresi fra 30 MPa e 60 MPa.
- Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si osserva, a partire dalla base dell'intervallo superficiale sopra citato (sabbia e sabbia limosa), valori che crescono abbastanza progressivamente da circa 70 kPa a poco più di 150 kPa fino alla profondità di circa 6,2 m per poi decrescere progressivamente a circa 100 kPa.
- Prova dilatometrica DM10:
 - Profondità da 9,60 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) mostra un intervallo superficiale di circa 1,0 m di spessore, costituito prevalentemente da limo sabbioso e sabbia limosa; a maggiore profondità e fino a fondo indagine l'indagine registra una litologia (materiale) compatibile con le caratteristiche meccaniche di un limo/limo argilloso, con l'esclusione di alcuni sottili livelli di limo sabbioso (a 5,80 m dal p.c.) e di sabbia con ghiaia (a 2,20 m dal p.c.).
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) presenta, nello spessore del primo metro, valori da 30 MPa a 60 MPa; fra circa 1,0 e 4,0 m dal p.c. i valori crescono progressivamente da 50 a 80 MPa, con l'esclusione del picco che raggiunge 800 Mpa (sabbia e ghiaia); la colonna litologica sottostante (limo/limo argilloso) è caratterizzata da valori, decrescenti, compresi fra 60 MPa e 35 MPa, fino alla profondità di circa 7,5 m dal p.c.. Inferiormente, fino a fondo foro, M cresce nuovamente fino a circa 90 MPa per poi stabilizzarsi a 70 MPa.

- Prova dilatometrica DM11:
 - Profondità 10 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di una litologia sabbiosa e limo sabbiosa in corrispondenza dei primi 1,5 m dal p.c, mentre a maggiore profondità si riscontrano livelli limosi e limo argillosi con maggiore presenza di argilla a fondo indagine.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) mostra valori elevati con un massimo di circa 350 MPa in corrispondenza della litologia sabbiosa mentre dalla base di questa e fino a fondo indagine si registra un trend in diminuzione con valori minimi pari a circa 5 MPa coerentemente alla litologia argillosa riscontrata a fondo indagine.
 - Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si osservano valori molto eterogenei anche all'interno della stessa categoria litologica con valori minimi di 30 KPa e valori massimi di circa 230 KPa.
- Prova dilatometrica DM12:
 - Profondità 10 m dal p.c.
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di un'alternanza di livelli sabbiosi e sabbioso limosi fino a una profondità di circa 1,5 m dal p.c., mentre a una maggiore profondità e fino a fondo indagine si registra la presenza di una litologia che presenta caratteristiche meccaniche compatibili con quelle del limo, alternata a livelli limo argillosi.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) presenta valori superiori ai 60 MPa in corrispondenza dei primi 1,5 m dal p.c, mentre in concomitanza della litologia limosa e limo argillosa si registrano valori in diminuzione con valori minimi pari a circa 30 MPa.
 - Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si osserva, a partire dalla base del livello sabbioso e sabbioso limoso, valori tendenzialmente crescenti con valori massimi pari a circa 200 KPa in concomitanza della porzione più limo argillosa della colonna stratigrafica, coerentemente con le caratteristiche meccaniche del materiale.
- Prova dilatometrica DM13:
 - Profondità 11,2 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di livelli sabbiosi e

sabbioso limosi per circa i primi 2,0 m dal p.c., mentre a maggiore profondità e fino a fondo indagine si registra la presenza di una litologia limosa e limo argillosa con un'alternanza di livelli più argilloso limosi; da sottolineare, a circa 8 m dal p.c., la presenza di una lente di sabbia.

- Il diagramma del modulo edometrico (M) presenta valori superiori ai 60 MPa con valori massimi pari a circa 200 MPa in corrispondenza dei livelli sabbiosi precedentemente indicati con l'ID, mentre in corrispondenza dei livelli limosi e limo argillosi si registrano valori inferiori, pari a un minimo di circa 30 MPa, coerentemente con le caratteristiche meccaniche del materiale.
- Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si registrano valori inferiori a 100 KPa in corrispondenza della litologia limosa della colonna stratigrafica, mentre in concomitanza delle porzioni più argillose del materiale si registrano valori superiori con massimi fino a circa 200 KPa.
- Prova dilatometrica DM14:
 - Profondità 14 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di livelli sabbioso limosi per i primi 2,0 m dal p.c., mentre a maggiore profondità si registra la presenza di un'alternanza di livelli limosi e limo argillosi. Da sottolineare la presenza di un livello di sabbia limosa a fondo foro.
 - Il diagramma del modulo edometrico (M) presenta valori superiori ai 70 MPa in corrispondenza dei primi 2,0 m dal p.c., con valori massimi pari a circa 275 MPa. In corrispondenza della litologia limosa della colonna si registrano valori inferiori con valori minimi pari a circa 25 MPa.
 - Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si registra tendenzialmente un trend crescente dalla litologia limosa a quella più argillosa, con valori minimi di 58 KPa e valori massimi pari a circa 190 KPa.
- Prova dilatometrica DM15:
 - Profondità 9,6 m dal p.c..
 - Il diagramma dell'indice di materiale (ID) evidenzia la presenza di livelli di sabbia e sabbia limosa alternata a livelli di limo sabbioso per circa i primi 2,0 m dal p.c., mentre

a maggiore profondità e fino a fondo foro si registra la presenza di litologie con caratteristiche meccaniche tipiche di un limo e di un limo argilloso.

- Il diagramma del modulo edometrico (M) presenta valori superiori a circa 100 MPa in corrispondenza dei livelli sabbioso limosi e valori tendenzialmente inferiori in corrispondenza delle litologie limose e limo argillose con valori massimi pari a circa 80 MPa.
- Nel diagramma della resistenza al taglio non drenata (cu) si registrano valori a partire dalla base dell’intervallo sabbioso precedentemente identificato con l’ID, pari a circa 70 KPa, con valori massimi pari a circa 200 KPa e valori minimi pari a circa 60 KPa, coerentemente con le caratteristiche meccaniche del materiale.

6.5. Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti con una sonda perforatrice cingolata.

6.5.1. Campagna del 2015

Nella prima fase di indagine sono stati realizzati i seguenti sondaggi:

- n. 54 (cinquantaquattro) sondaggi a carotaggio continuo denominati S01÷S03, S06÷S12, S14÷S18, S20, S21, S23÷S27, S29, S32÷S34, S37, S42, S43, S45, S47, S53÷S62, S66÷S71, S75÷S81, aventi una profondità di 4,0 m dal p.c.;
- n. 3 (tre) sondaggi a carotaggio continuo denominati S30, S41, S46, aventi una profondità di 7,0 m dal p.c.;
- n. 8 (otto) sondaggi a carotaggio continuo denominati S13, S19, S22, S28, S31, S39, S44 e S51 della profondità di 10,0 m dal p.c.;
- n. 6 (sei) sondaggi a carotaggio continuo denominati S13, S19, S22, S28, S39 e S44 della profondità di 10,0 m dal p.c., attrezzati a piezometro;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S04 della profondità di 15,0 m dal p.c.;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S05 della profondità di 15,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro;

- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S40, della profondità di 20,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S35, della profondità di 35,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro.

Da questi sondaggi sono stati prelevati i campioni indisturbati con fustella tipo Shelby, alle profondità indicate nella tabella 4;

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S1	CI1	1,00 ÷ 1,50	35,85-35,35
S2	CI1	0,80 ÷ 1,30	33,80-33,3
S3	CI1	1,00 ÷ 1,50	34,10-33,60
S4	CI1	1,00 ÷ 1,50	34,275-34,775
	CI2	5,00 ÷ 5,50	30,275-29,775
	CI3	10,50 ÷ 11,00	24,775-24,275
S5	CI1	1,50 ÷ 2,00	33,90-33,40
	CI2	4,00-4,50	31,40-30,90
	CI3	12,00-12,50	23,40-22,90
S6	CI1	1,00-1,50	35,85-35,35
S7	CI1	1,00-1,50	35,35-34,85
S8	CI1	1,00-1,50	35,575-35,075
S9	CI1	1,00-1,50	35,50-35,10
S10	CI1	1,50-2,00	34,90-34,40
S12	CI1	1,00-1,50	36,05-35,55

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S13	CI1	1,00-1,50	34,75-34,25
S14	CI1	1,00-1,45	34,825-34,375
S15	CI1	1,00-1,50	34,275-33,775
S16	CI1	1,00-1,40	34,375-33,975
S17	CI1	0,50-1,00	35,125-34,625
	CI2	1,00-1,50	34,625-34,125
S18	CI1	1,00-1,50	34,70-34,20
S19	CI1	1,50-2,00	33,80-33,30
S20	CI1	0,50-1,00	35,425-34,925
	CI2	1,00-1,50	34,925-34,425
S21	CI1	0,50-1,00	36,05-35,55
	CI2	1,00-1,50	35,55-35,05
S22	CI1	1,00-1,50	36,175-35,675
S23	CI1	1,00-1,50	34,975-34,475
S24	CI1	0,50-1,00	35,50-35,00
	CI2	1,10-1,60	34,90-34,40
S25	CI1	0,50-1,00	36,05-35,55
	CI2	1,50-1,90	35,05-34,65
S26	CI1	1,00-1,50	35,875-35,375
S27	CI1	1,00-1,50	34,80-34,30
S28	CI1	0,50-1,00	37,45-36,95
	CI2	1,30-1,80	36,65-36,15

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S29	CI1	0,50-1,00	36,425-35,925
	CI2	1,00-1,50	35,925-35,425
S30	CI1	1,00-1,50	37,26-36,76
S31	CI1	1,00-1,50	35,925-35,425
S32	CI1	0,50-1,00	37,325-36,825
	CI2	1,00-1,50	36,825-36,325
S33	CI1	0,50-1,00	37,475-36,975
	CI2	1,00-1,50	36,975-36,475
S34	CI1	1,00-1,50	37,65-37,15
S35	CI1	1,00-1,50	36,025-35,525
S37	CI1	1,00-1,50	36,85-36,35
S39	CI1	1,00-1,60	37,925-37,325
S40	CI1	1,50-1,90	36,35-35,95
S41	CI1	0,50-1,00	38,00-37,50
	CI2	1,00-1,50	37,50-37,00
S42	CI1	1,00-1,50	37,975-37,475
S43	CI1	1,00-1,50	38,525-38,025
S44	CI1	1,00-1,50	38,230-37,73
S45	CI1	1,00-1,80	36,65-35,85
S46	CI1	1,50-2,00	35,825-35,325
S47	CI1	1,00-1,50	37,375-36,875

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S51	CI1	1,00-1,50	36,625-36,125
S53	CI1	2,00-2,50	33,65-33,15
S54	CI1	2,00-2,50	33,625-33,125
S55	CI1	2,00-2,50	33,35-32,85
S56	CI1	2,00-2,50	34,260-33,76
S57	CI1	2,00-2,50	33,34-32,84
S58	CI1	2,00-2,50	33,575-33,075
S59	CI1	2,00-2,50	33,475-32,975
S60	CI1	2,00-2,50	33,50-33,00
S61	CI1	2,00-2,50	33,45-32,95
S62	CI1	2,00-2,50	33,125-32,625
S66	CI1	2,00-2,50	33,375-32,875
S67	CI1	2,00-2,50	33,325-32,825
S68	CI1	1,50-2,00	34,60-34,10
S71	CI1	1,50-2,00	38,825-38,325
S75	CI1	1,50-2,00	33,775-33,275
S76	CI1	1,50-2,00	33,825-33,325
S77	CI1	1,50-2,00	34,95-34,45
S78	CI1	1,50-2,00	34,5-34,00
S79	CI1	1,50-2,00	35,45-34,95
S81	CI1	1,50-2,00	37,75-37,25

Tabella 4 - Campioni indisturbati della campagna del 2015.

Sui campioni sopra elencati sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Igetecma s.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) che sono indicate nel § 6.6.

6.5.2. Campagna del 2017

Nella seconda fase di indagine sono stati realizzati i seguenti sondaggi:

- n. 2 (due) sondaggi a carotaggio continuo denominati S87 e S89, aventi una profondità di 4,0 m dal p.c.;
- n. 6 (sei) sondaggi a carotaggio continuo denominati S86, S110, S111, S113, S114 e S115 aventi una profondità di 7,0 m dal p.c.;
- n. 6 (sei) sondaggi a carotaggio continuo denominati S82, S93, S94, S95, S121 e S122 della profondità di 10,0 m dal p.c.;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S88, della profondità di 10,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro;
- n. 9 (nove) sondaggi a carotaggio continuo denominati S83, S85, S92, S97, S98, S99, S100, S109 e S116 aventi una profondità di 15,0 m dal p.c.;
- n. 3 (tre) sondaggi a carotaggio continuo denominati S90, S107 e S112 della profondità di 15,0 m dal p.c., attrezzati a piezometro;
- n. 5 (cinque) sondaggi a carotaggio continuo denominati S84, S91, S96, S117 e S119 della profondità di 32,0 m dal p.c.;
- n.1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S108, della profondità di 40,0 m, attrezzato a piezometro.

In alcuni sondaggi sono state eseguite Standard Penetration Test (S.P.T.), come riassunto nella tabella 5;

Sigla sondaggio	S.P.T.	Profondità [m da p.c.]	Profondità [m s.l.m.]	N1	N2	N3	N _{SPT}
S82	1	3,00 ÷ 3,45	32,871 ÷ 32,421	8	9	10	19
	2	5,00 ÷ 5,45	30,871 ÷ 30,421	5	5	7	12

Sigla sondaggio	S.P.T.	Profondità [m da p.c.]	Profondità [m s.l.m.]	N1	N2	N3	N _{SPT}
	3	9,00 ÷ 9,45	26,871 ÷ 26,421	10	11	13	24
S83	1	3,10 ÷ 3,55	32,48 ÷ 32,03	3	5	7	12
	2	8,00 ÷ 8,45	27,58 ÷ 27,13	6	9	10	19
	3	9,00 ÷ 9,45	26,58 ÷ 26,13	10	11	14	25
S85	1	6,00 ÷ 6,45	33,856 ÷ 39,406	7	7	3	10
	2	10,00 ÷ 10,45	29,856 ÷ 29,406	12	14	18	32
S91	1	2,60 ÷ 3,05	37,951 ÷ 37,501	3	5	8	13
	2	7,00 ÷ 7,45	33,551 ÷ 33,101	6	10	11	21
S92	1	2,10 ÷ 2,55	38,473 ÷ 38,023	3	4	7	11
	2	5,00 ÷ 5,45	35,573 ÷ 35,123	4	6	8	14
S96	1	2,10 ÷ 2,55	37,662 ÷ 37,212	3	5	9	14
	2	4,00 ÷ 4,45	35,762 ÷ 35,312	7	11	12	23
	3	7,00 ÷ 7,45	32,762 ÷ 32,312	9	13	14	27
S97	1	3,50 ÷ 3,95	35,711 ÷ 35,261	7	9	11	20
	2	6,00 ÷ 6,45	33,211 ÷ 32,761	9	12	14	26
S98	1	4,00 ÷ 4,45	33,583 ÷ 33,133	11	14	16	30
	2	7,00 ÷ 7,45	30,583 ÷ 30,133	8	9	12	21
S99	1	3,50 ÷ 3,95	34,353 ÷ 33,903	7	7	9	16
	2	5,10 ÷ 5,55	32,753 ÷ 32,303	6	9	11	20
S100	1	4,00 ÷ 4,45	33,755 ÷ 33,305	6	11	14	25
	2	8,00 ÷ 8,45	29,755 ÷ 29,305	13	15	15	30
S101	1	3,50 ÷ 3,95	34,118 ÷ 33,668	4	6	7	13
	2	9,00 ÷ 9,45	28,618 ÷ 28,168	8	11	13	24
S103	1	3,50 ÷ 3,95	32,328 ÷ 31,878	7	9	9	18
	2	8,00 ÷ 8,45	27,828 ÷ 27,378	11	15	15	30
S104	1	4,00 ÷ 4,45	32,494 ÷ 32,044	6	9	11	20
	2	6,00 ÷ 6,45	30,494 ÷ 30,044	8	12	13	25
S106	1	4,00 ÷ 4,45	34,312 ÷ 33,862	5	6	6	12
	2	6,00 ÷ 6,45	32,312 ÷ 31,862	8	10	12	22
S107	1	3,00 ÷ 3,45	32,016 ÷ 31,566	6	8	7	15
	2	6,00 ÷ 6,45	29,016 ÷ 28,566	9	9	11	20
S109	1	2,60 ÷ 3,05	40,086 ÷ 39,636	10	15	20	35
	2	5,50 ÷ 5,95	37,186 ÷ 36,736	5	7	10	17
S116	1	2,10 ÷ 2,55	34,732 ÷ 34,282	2	3	3	6

Sigla sondaggio	S.P.T.	Profondità [m da p.c.]	Profondità [m s.l.m.]	N1	N2	N3	N _{SPT}
	2	5,00 ÷ 5,45	32,232 ÷ 31,782	8	14	18	32
S117	1	2,60 ÷ 3,05	34,024 ÷ 33,574	3	4	3	7
	2	7,00 ÷ 7,45	29,624 ÷ 29,174	9	16	0	36

Tabella 5 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi.

Da alcuni sondaggi sono stati prelevati campioni indisturbati con fustella tipo Shelby, alle profondità indicate nella tabella 6.

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S82	CI1	1,50 ÷ 2,00	34,371 ÷ 33,871
	CI2	4,50 ÷ 5,00	31,371 ÷ 30,871
S83	CI1	2,50 ÷ 3,00	33,08 ÷ 32,58
	CI2	4,50 ÷ 5,00	31,08 ÷ 30,58
	CI3	11,0 ÷ 11,50	24,58 ÷ 24,08
S85	CI1	1,50 ÷ 2,00	38,356 ÷ 37,856
	CI2	3,00 ÷ 3,50	36,856 ÷ 36,356
	CI3	6,45 ÷ 6,95	33,406 ÷ 32,906
S84	CI2	4,80 ÷ 5,20	34,97 ÷ 34,57
	CI3	9,00 ÷ 9,50	30,77 ÷ 30,27
S87	CI1	2,00 ÷ 2,50	33,823 ÷ 33,323
S88	CI1	1,50 ÷ 2,00	35,67 ÷ 35,17
	CI2	3,50 ÷ 4,00	33,67 ÷ 33,17
S89	CI1	1,50 ÷ 2,00	35,257 ÷ 34,757
S91	CI1	2,00 ÷ 2,50	38,551 ÷ 38,051

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
	CI2	4,50 ÷ 5,00	36,051 ÷ 35,551
	CI3	9,00 ÷ 9,50	31,551 ÷ 31,051
S92	CI1	1,50 ÷ 2,00	39,073 ÷ 38,573
	CI2	3,5 ÷ 4,00	37,073 ÷ 36,573
	CI3	6,50 ÷ 7,00	34,073 ÷ 33,573
S93	CI1	1,30 ÷ 1,80	37,395 ÷ 36,895
	CI2	4,00 ÷ 4,50	34,695 ÷ 34,195
S94	CI1	2,00 ÷ 2,50	36,972 ÷ 36,472
	CI2	3,50 ÷ 4,00	35,472 ÷ 34,972
	CI3	5,50 ÷ 6,00	33,472 ÷ 32,972
S95	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,556 ÷ 36,056
	CI2	4,50 ÷ 5,00	34,556 ÷ 34,056
	CI3	7,50 ÷ 8,00	31,556 ÷ 31,056
S96	CI1	1,50 ÷ 2,00	38,262 ÷ 37,762
	CI2	5,50 ÷ 6,00	34,262 ÷ 33,762
	CI3	9,00 ÷ 9,50	30,762 ÷ 30,262
S97	CI1	0,50 ÷ 1,00	38,711 ÷ 38,211
	CI2	4,00 ÷ 4,50	35,211 ÷ 34,711
S98	CI1	1,50 ÷ 2,00	36,083 ÷ 35,583
	CI2	3,00 ÷ 3,50	34,583 ÷ 34,083
	CI3	5,00 ÷ 5,50	32,583 ÷ 32,083

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S99	CI1	0,50 ÷ 1,00	37,353 ÷ 36,853
	CI2	2,00 ÷ 2,50	35,853 ÷ 35,353
S100	CI1	1,50 ÷ 2,00	36,255 ÷ 35,755
	CI2	3,00 ÷ 3,50	34,755 ÷ 34,255
	CI3	5,00 ÷ 5,50	32,755 ÷ 32,255
S101	CI1	0,50 ÷ 1,00	37,118 ÷ 36,618
	CI2	2,50 ÷ 3,00	35,1183 ÷ 34,618
	CI3	4,00 ÷ 4,60	33,618 ÷ 33,018
S103	CI1	0,50 ÷ 1,00	35,328 ÷ 34,828
	CI2	2,00 ÷ 2,50	33,828 ÷ 33,328
	CI3	4,00 ÷ 4,50	31,828 ÷ 31,328
S104	CI1	1,50 ÷ 2,00	34,994 ÷ 34,494
	CI2	3,00 ÷ 3,50	33,494 ÷ 32,994
S106	CI1	1,50 ÷ 2,00	36,812 ÷ 36,312
	CI2	3,00 ÷ 3,50	35,312 ÷ 34,812
S107	CI1	0,50 ÷ 1,00	34,516 ÷ 34,016
	CI2	2,00 ÷ 2,50	33,016 ÷ 32,516
	CI3	4,00 ÷ 4,50	30,016 ÷ 29,516
S109	CI1	2,00 ÷ 2,50	40,686 ÷ 40,186
	CI2	4,00 ÷ 4,50	38,686 ÷ 38,186
	CI3	7,00 ÷ 7,50	35,686 ÷ 35,186

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S116	CI1	2,50 ÷ 3,00	34,332 ÷ 33,832
	CI2	3,50 ÷ 4,00	33,332 ÷ 32,832
	CI3	6,00 ÷ 6,50	30,832 ÷ 30,332
S117	CI1	2,00 ÷ 2,50	34,624 ÷ 34,124
	CI2	4,50 ÷ 5,00	32,124 ÷ 31,624
	CI3	9,00 ÷ 9,50	27,624 ÷ 27,124
S118	CI1	1,60 ÷ 2,00	34,465 ÷ 34,065
	CI2	3,30 ÷ 4,00	32,765 ÷ 32,065
S119	CI1	1,50 ÷ 2,00	34,852 ÷ 34,352
	CI2	5,50 ÷ 6,00	30,852 ÷ 30,352
	CI3	9,00 ÷ 9,50	27,352 ÷ 26,852
S121	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,498 ÷ 35,998
	CI2	5,00 ÷ 5,50	33,998 ÷ 33,498
	CI3	8,00 ÷ 8,50	30,998 ÷ 30,498
S122	CI1	1,50 ÷ 2,00	37,722 ÷ 37,222
	CI2	3,00 ÷ 3,50	36,222 ÷ 35,722

Tabella 6 - Campioni indisturbati della campagna del 2017.

Sui campioni sopra elencati sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Igetecma s.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) che sono indicate nel § 6.6.

6.5.2.1. Standard Penetration Test

Come detto, durante la perforazione di alcuni sondaggi sono state realizzate prove Standard Penetration Test (S.P.T.) seguendo le norme di riferimento AGI e ASTM; i risultati delle

prove S.P.T., riportati nella tabella 6, permettono di ricavare indicazioni sulle caratteristiche geotecniche del terreno incontrato attraverso correlazioni di natura empirica. Nel caso in esame, considerando la natura dei terreni e le altre indagini a disposizione (campioni indisturbati, prove penetrometriche), si è scelto di determinare l'angolo di attrito interno (utilizzando le formule del Japanese National Railway, di Owasaki & Iwasaki, Meyerhof, Peck-Hanson & Thornburn, Sowers e del Road Bridge Specification) e il modulo edometrico (con le correlazioni di Stroud & Butler¹).

Sigla sondaggio	SPT	Litologia	f [°]	Eed [kPa]
S82	1	Limo deb. sabbioso moderatamente consistente		9.316,32÷11.179,58
	2	Sabbie deb. limose addensate	28,1÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	3	Argille da deb. limose a limose	33,9÷38,2	11.767,98÷14.121,58
S83	1	limo argilloso/argilla limosa	28,4÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	2	sabbia debolmente limose	31,9÷36,8	9.316,32÷11.179,58
	3	argilla limosa	34,4÷38,5	12.258,31÷14.709,98
S84	1	argilla e limi compatti con ghiaia (riporto)	28,4÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	2	argilla deb. limosa consistente	30,0÷35,5	7.354,99÷8.825,99
	3	argilla da moderatamente consistente a consistente	33,2÷37,7	10.787,32÷12.944,78
S85	1	argilla omogenea consistente	27,2÷33,7	4.903,33÷5.883,99
	2	argilla consistente	35,8÷40,3	15.690,64÷18.828,77
S91	1	argilla limosa moderatamente consistente	29,0÷34,8	6.374,32÷7.649,19
	2	argilla deb. limosa consistente	32,7÷37,4	10.296,98÷12.356,38
S92	1	argilla limosa	27,8÷34,0	5.393,66÷6.472,39
	2	argilla molto consistente	29,5÷35,1	6.854,66÷8.237,59
S96	1	Argille molto consistenti	29,5÷35,1	6.864,66÷8.237,59
	2	Argille molto consistenti	33,6÷37,9	11.277,65÷13.533,18
	3	Argille molto consistenti	34,7÷39,0	13.238,98÷15.886,77
S97	1	Argille consistenti	32,3÷37,1	9.806,65÷11.767,98
	2	Argille consistenti	34,5÷37,8	12.748,65÷15.298,37
S98	1	Argille limose	35,4÷39,7	14.709,98÷17.651,97

¹ Valida per litotipi argillosi a media e bassa plasticità.

Sigla sondaggio	SPT	Litologia	f [°]	Eed [kPa]
	2	Argille limose	32,7÷37,4	10.296,98÷12.356,38
S99	1	Argille deb. consistenti	30,5÷35,8	7.845,32÷9.414,38
	2	Argille deb. consistenti	32,3÷37,1	9.806,65÷11.767,98
S100	1	Argille consistenti	34,2÷38,5	12.258,31÷14.709,98
	2	Argille consistenti	35,4÷39,7	14.709,98÷17.651,97
S101	1	Argilla consistente	29,0÷34,8	6.374,32÷7.649,19
	2	Argille consistenti	33,9÷38,2	11.767,98÷14.121,58
S103	1	Limi deb. argillosi consistenti	31,4÷36,5	8.825,99÷10.591,18
	2	Argilla consistente	35,4÷39,7	14.709,98÷17.651,97
S104	1	Limi argillosi consistenti	32,3÷37,1	9.806,65÷11.767,98
	2	Argilla e limi consistenti	34,2÷38,5	12.258,31÷14.709,98
S106	1	argilla e limo	28,4÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	2	argilla e limo	33,2÷37,7	10.787,32÷12.944,78
S107	1	Argille asciutte molto consistenti	30,0÷35,5	7.354,99÷8.825,99
	2	Argille molto consistenti	32,3÷37,1	9.806,65÷11.767,98
S109	1	Limo sabbioso deb. consistente	36,3÷41,5	17.161,64÷20.593,97
	2	Limi argillosi consistenti	31,0÷36,1	8.335,65÷10.002,78
S116	1	limo argilloso deb. sabbioso	26,0÷32,1	2.942,00÷3.530,39
	2	Limi e argille	35,8÷40,3	15.690,64÷18.828,77
S117	1	limo argilloso deb. sabbioso	25,2÷32,5	3.432,33÷4.118,79
	2	limo argilloso	36,4÷41,8	17.651,97÷21.182,36
S118	1	Argille molto compatte	28,4÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	2	Sondaggio a distruzione	32,7÷37,4	10.296,98÷12.356,38
	3	Sondaggio a distruzione	34,2÷38,5	12.258,31÷14.709,98
S119	1	Limi e argille	32,3÷37,1	9.806,65÷11.767,98
	2	Limi e argille	31,4÷36,5	8.825,99÷10.591,18
	3	Sabbia limosa alternata a livelli limo-argillosi	33,2÷37,7	10.787,32÷12.944,78

Tabella 7- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT} .

6.6. Prove geotecniche di laboratorio

Come detto precedentemente, durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati dei campioni indisturbati con fustella tipo Shelby per essere

successivamente inviati al laboratorio Igetecma s.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) per l'esecuzione delle prove geotecniche. Su tutti i campioni prelevati (tabelle 4 e 6) sono state eseguite le seguenti prove:

- prove speditive di consistenza (ASTM 2488), comprensive della fotografia;
- determinazione del contenuto d'acqua (ASTM D 2216);
- analisi granulometrica per sedimentazione (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 422);
- analisi granulometrica per vagliatura per via umida (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 422);
- determinazione limiti di Atterberg (ASTM D 4318);
- determinazione del peso dell'unità di volume (ASTM D 2937, BS 1377 T15/D).

Inoltre, come mostrato nel dettaglio nelle tabelle seguenti su alcuni di essi sono state effettuate le seguenti prove:

- determinazione del peso specifico dei granuli (CNR-UNI 10013, ASTM D 854);
- prova di compressione semplice E.L.L.;
- prova triassiale non consolidata non drenata U.U. (ASTM D 2850);
- prova triassiale consolidata non drenata C.U.;
- prova triassiale consolidata drenata C.I.D. (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 5311);
- prova edometrica (ASTM D 2435);
- prova di taglio diretto (ASTM D 3080).

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CD	Edometrica*
S01-CI1				X
S03-CI1				X
S04-CI1	X			
S04-CI2		X	X	X
S04-CI3	X			
S05-CI1	X			X
S05-CI2	X			X

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CD	Edometrica*
S05-CI3	X			X
S13-CI1				X
S14-CI1				X
S15-CI1				X
S16-CI1				X
S17-CI1		X	X	X
S17-CI2		X	X	X
S18-C1				X
S19-CI1				X
S20-CI1	X			X
S20-CI2	X			X
S21-CI1		X	X	X
S21-CI2		X	X	X
S22-CI1		X	X	X
S23-CI1				X
S24-CI1	X			X
S24-CI2	X			X
S25-CI1				X
S25-CI2				X
S26-CI1		X	X	X
S27-CI1				X
S28-CI1	X			X
S28-CI2	X			X
S29-CI1		X	X	X
S30-CI1				X
S31-CI1				X
S32-CI1	X			
S32-CI2	X			X
S33-CI1		X	X	X
S34-CI1				X
S35-CI1				X
S37-CI1	X			X
S39-CI1				X
S40-CI1				X

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CD	Edometrica*
S42-CI1				X
S43-CI1				X
S44-CI1				X
S45-CI1				X
S46-CI1				X
S51-CI1				X
S71-CI1				X
S75-CI1				X
S76-CI1				X
S78-CI1				X
S79-CI1				X
S81-CI1				X

Tabella 8 - Prove geotecniche di laboratorio “specifiche” eseguite sui campioni indisturbati del 2015.
 * compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CU	Edometrica*	Taglio CD
S82-CI1	X				X
S82-CI2	X				X
S83-CI1	X				X
S83-CI2	X				X
S83-CI3	X				X
S84-CI2	X				X
S84-CI3		X			X
S85-CI1		X		X	
S85-CI2			X		
S85-CI3	X				
S87-CI1	X			X	
S88-CI1		X		X	X
S88-CI2	X			X	
S89-CI1	X			X	
S91-CI1			X	X	
S91-CI2			X	X	

S91-CI3	X			X	
S92-CI1		X	X	X	
S92-CI2		X			X
S92-CI3	X				
S93-CI1		X			X
S93-CI2	X				X
S93-CI3	X				X
S94-CI1	X				X
S94-CI2	X				X
S94-CI3					X
S95-CI1	X				X
S95-CI2					X
S96-CI1			X		X
S96-CI2	X				X
S96-CI3	X				X
S97-CI1			X		X
S97-CI2			X		X
S98-CI1			X		X
S98-CI2		X		X	X
S98-CI3	X				X
S99-CI1			X		X
S99-CI2	X				X
S100-CI1			X		X
S100-CI2		X			X
S100-CI3			X		X
S101-CI1			X		X
S101-CI2			X		X
S103-CI1			X		X
S103-CI2		X			X
S104-CI1	X			X	X
S104-CI2			X		X
S106-CI1			X	X	
S106-CI2		X			X
S107-CI1	X			X	X
S107-CI2		X			X
S107-CI3			X		X

S109-CI1		X		X	X
S109-CI2			X	X	
S109-CI3	X			X	
S116-CI1	X			X	
S116-CI2			X		
S116-CI3	X				
S117-CI1			X	X	
S117-CI2	X			X	X
S117-CI3		X		X	
S118-CI1			X		X
S118-CI2		X			X
S118-CI3	X				X
S119-CI1			X	X	
S119-CI2	X			X	X
S119-CI3	X			X	X
S121-CI1	X			X	X
S121-CI2				X	X
S121-CI3				X	X
S122-CI1		X			X
S122-CI2					X

Tabella 9 - Prove geotecniche di laboratorio “specifiche” eseguite sui campioni indisturbati del 2017.

* compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

6.7. Indagini geofisiche

6.7.1. Sismica a rifrazione

A supporto della progettazione sono stati eseguiti n. 11 (undici) indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e onde Sh denominate RIFR1,÷11, la prima delle quali nella prima fase della campagna (2015) e le altre nel 2017.

La geometria del rilievo denominato RIFR01 ha previsto uno stendimento con distanza intergeofonica di 3 m, per un totale di 72 m; sono state effettuate cinque energizzazioni. L'elaborazione mostra un netto passaggio alla profondità variabile tra 1 e 3 m dal p.c. riconducibile a materiali sciolti poco compatti superficiali e materiali mediamente compatti sottostanti.

Durante la seconda fase di indagine sono stati eseguiti n. 10 (dieci) rilievi aventi una lunghezza di 230 m, ottenuta unendo due stendimenti consecutivi tramite la sovrapposizione di due geofoni. Per ogni linea la distanza intergeofonica è stata di 5 m e sono state effettuate cinque energizzazioni. Nella RIFR2 si rilevano due sismostrati principali, con contatto a circa 8,0 m dal p.c.; quello più profondo presenta una serie di anomalie con una zona a maggior velocità al centro, una possibile zona argillosa nella parte finale e un livello con incremento delle velocità delle onde Sh nella parte bassa della sezione. L'elaborazione dello stendimento RIFR3 mostra una prima unità caratterizzata da un aumento progressivo della velocità delle onde P con la profondità e una seconda unità, a circa 5,0 m dal p.c., con possibile presenza di livelli a minore compattazione nella parte alta e a maggiore compattazione nella parte bassa. Il rilievo della RIFR4 evidenzia un livello superficiale (5,0÷10,0 m dal p.c.) con velocità molto basse ed un livello sottostante dominato da una inversione di velocità. Nella sezione RIFR5 è visibile un passaggio, seppur non molto marcato, alla profondità di circa 9,0 m dal p.c., con un incremento progressivo della velocità delle onde P e Sh all'interno del primo orizzonte. La RIFR6 è in parte alterata dal rumore di fondo della limitrofa viabilità; è comunque visibile una interfaccia piuttosto netta a circa 8,0 m dal p.c. Alla medesima profondità si osserva un contatto nel rilievo RIFR7; all'interno dell'orizzonte più profondo è stata misurata un'inversione di velocità, posta a circa 20 m dal p.c.. Una serie di inversioni di velocità e zone con velocità minore, presumibilmente a una forte eterogeneità granulometrica dei sedimenti, sono state riscontrate anche nello stendimento RIFR8 a partire da 5,0 m dal p.c., profondità che contraddistingue il contatto tra i due sismostrati principali. L'elaborazione della RIFR9 ha individuato un primo livello con velocità delle onde Sh inferiori a 200 m/s e un secondo livello che, da 7,0÷8,0 m fino a 20 m dal p.c. è caratterizzato da una serie di inversioni di velocità. Infine, la geometria della RIFR10 presenta un orizzonte superficiale a bassa compattazione (spessore circa 3,0 m) e un netto passaggio compreso tra 6 e 10 m dal p.c..

6.7.2. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Per definire la categoria di sottosuolo, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018, e quindi per la definizione dell'azione sismica locale e di progetto risulta necessario determinare la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio tra il bedrock sismico ed il piano di imposta delle fondazioni ($V_{s,eq}$). Nel caso in esame per determinare tale parametro sono state

eseguite n. 12 (dodici) indagini sismiche con metodologia MASW, denominate MASW1÷12 (ubicazione delle indagini in allegato), alcune di queste, come indicato nella tabella 10, sono state elaborate congiuntamente con un'indagine HVSr.

L'analisi della dispersione delle onde superficiali, abbinata all'indagine HVSr, ha permesso di calcolare il parametro $V_{s,eq}$, applicando la formula seguente:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (3.2.1 \text{ NTC 2018})$$

Nella tabella 12 sono riportati i valori del parametro $V_{s,eq}$ ottenuti.

sigla	Intervento	$V_{s,eq}$ [m/s]
MASW01*	Derivazione del Fosso Reale	278
MASW02	Derivazione del Fosso Reale Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale	278
MASW03*	Derivazione del Fosso Reale	248
MASW04*	Area di laminazione idraulica A	227
MASW05*	Derivazione del Fosso Reale	328
MASW06*	Nuova pista (al centro)	323
MASW07*	Duna Polo Scientifico (estremità NO)	341
MASW08*	Duna Polo Scientifico (estremità SE)	333
MASW09*	Nuova pista (estremità SE)	318
MASW10*	Nuova pista (estremità NO)	296
MASW11*	Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (inizio)	311
MASW12*	Edificio Area umida Il Piano	300

Tabella 10 - Valori $V_{s,eq}$

* associata una misura di sismica passiva HVSr realizzata al centro dello stendimento.

6.7.3. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)

La caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica di indagine sismica passiva HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – Metodo di Nakamura) è finalizzata all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di sito. Esse sono correlabili ai

cambi litologici presenti sia all'interno della copertura che nell'ammasso roccioso: entrambi possono risultare passaggi litologici che generano fenomeni di possibile amplificazione della sollecitazione sismica.

La misura HVSR1 e 2 oltre a non avere il rispetto ne' dei criteri di affidabilità del picco ne' di quelli di affidabilità della curva del SESAME, è stata ottenuta utilizzando l'80% della registrazione che è durata solo 10 minuti e dunque non può essere utilizzata perché non rappresentativa. Nella prova HVSR3 è stato rilevato un picco a 0,5 Hz ma non vi è il rispetto delle condizioni del SESAME ne' per l'affidabilità della curva ne' per l'affidabilità del picco. Nella prova HVSR4 è stato rilevato un picco a 0,7 Hz ma non vi è il rispetto delle condizioni del SESAME ne' per l'affidabilità della curva ne' per l'affidabilità del picco. Nella prova HVSR5, nella prova HVSR9 e nella prova HVSR11 non è stato rilevato un picco nell'intervallo di frequenza che abbia interesse ingegneristico. Nella prova HVSR6 analizzata per circa quindici minuti, il picco rilevato alla frequenza di 0,47 Hz appare poco attendibile anche per i criteri SESAME che non risultano accettabili per l'affidabilità della curva. Nella prova HVSR7, non è stato rilevato un picco significativo segno evidente che non vi è un contrasto di impedenza rilevabile con questa metodologia. Nella prova HVSR8 è stato rilevato un picco a 0,41 Hz ma non vi è il rispetto delle condizioni del SESAME ne' per l'affidabilità della curva (solo due su tre) ne' per l'affidabilità del picco (solo quattro su sei). Infine nella prova HVSR10 analizzata per appena dodici minuti, il picco rilevato alla frequenza di 0,38 Hz appare poco attendibile anche per i criteri SESAME che non risultano accettabili per l'affidabilità della curva.

6.7.4. Indagine sismica in foro downhole

Nei sondaggi S84, S91, S96, S117, S118 e S119 è stata svolta un'indagine sismica in foro di tipo down-hole; tale indagine prevede l'investigazione del terreno attraverso il posizionamento di un geofono tridimensionale all'interno di un foro di perforazione appositamente attrezzato. Questo tipo di indagine viene utilizzata per determinare la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio tra il bedrock sismico ed il piano di imposta delle fondazioni ($V_{s,eq}$). Tale parametro risulta necessario, come già detto, per individuare la categoria di sottosuolo, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018, e quindi per la definizione dell'azione sismica locale e di progetto. Per i dettagli operativi della metodologia di acquisizione dei dati, si rimanda al rapporto finale dell'indagine eseguita.

L'elaborazione delle onde Sh e delle onde P mostra un progressivo aumento delle velocità con la profondità: nella DH-S84 sono presenti due gradini, a 12,5 m e 19,0 m dal p.c.; nella DH-S91 si osserva un netto accrescimento alla profondità di circa 8,50 m dal p.c.; nella DH-96 sono presenti tre gradini a 5,50 e a 16,5 m dal p.c., nella DH-S117, nella DH-S118 e nella DH-119 sono presenti invece due gradini, rispettivamente a 4,50 12,5 m, a 8,50 e 19,0 m e a 8,5 e 18,5 m dal p.c..

Il valore della $V_{s_{eq}}$ calcolato, a partire dal p.c., utilizzando la formula indicata al § 6.7.2, è riportato nella tabella 11 seguente :

sigla	Intervento	$V_{s_{eq}}$ [m/s] da p.c.
S84-DH	Nuovo ponte sul Fosso Reale in località Case Passerini	243
S91-DH	Viadotto area Polo Scientifico (pressi Baxter)	306
S96-DH	Centrale tecnologica NE	330
S117-DH	Viadotto sul Fosso Reale nei pressi della Vasca di laminazione D	307
S118-DH	Edificio Bilanciamento Vigili del Fuoco	310
S119-DH	Centrale tecnologica SO	302

Tabella 11 - Valori $V_{s_{eq}}$ calcolati a partire dal p.c..

7. Sismicità e definizione dei parametri sismici

7.1. Zona sismica

La nuova classificazione sismica è stata approvata con Deliberazione della Giunta Regionale della Toscana n. 421 del 26 maggio 2014, che ha apportato modifiche (per accorpamento di alcuni Comuni) alla classificazione sismica regionale definita con la Delibera della Giunta Regionale della Toscana n. 878 dell'8 ottobre 2012. L'aggiornamento introdotto con quest'ultima delibera, redatto ai sensi dell'O.P.C.M. del 28 aprile 2006 n. 3519 si era reso necessario al fine di recepire le novità introdotte dall'entrata in vigore delle NTC e di rendere la classificazione sismica maggiormente aderente all'approccio “sito-dipendente” introdotto da tali norme. Inoltre, contestualmente all'entrata in vigore della nuova classificazione sismica, è

stato approvato il regolamento 58/R del 22 ottobre 2012², di attuazione dell'art. 117, comma 2, lettera g) della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio). I comuni di interesse per il presente studio sono inseriti nella zona sismica 3.

7.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato)

A titolo meramente indicativo, al sito interessato dalle opere oggetto della presente relazione. visto il valore della velocità equivalente delle onde di taglio, calcolato a partire dal piano campagna con le indagine geofisiche eseguite (§ 6.7), si assegna la **categoria di sottosuolo C** (*“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.”* - da Tab. 3.2.II del D.M. 17 gennaio 2018 e § C3.2.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019).

7.3. Categoria topografica

Per la determinazione della *categoria topografica*, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C.3.2.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019, viene assegnata la **categoria topografica T1** (*superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$* , Tab. 3.2.III del D.M. 17 gennaio 2018), alla quale corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica S_T pari a 1.0 (Tab. 3.2.V del decreto suddetto).

8. Modellazione geologica

8.1. Sezioni litologiche

Nelle tavole 5÷14 sono mostrate le sezioni nelle quali sono riportate le colonne litologiche delle verticali di indagine di interesse per gli interventi oggetto della presente relazione; la traccia delle sezioni è indicata nell'ubicazione delle indagini. Le colonne litologiche sono state disegnate come di seguito esposto:

- per i sondaggi derivano dalla descrizione di campagna riportata sulle schede della ditta esecutrice;

² *Regolamento di attuazione dell'art. 117, comma 2, lettera g) della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio). Verifiche nelle zone a bassa sismicità. Determinazione del campione da assoggettare a verifica.*

- per le prove penetrometriche CPT sono state ottenute integrando l'interpretazione litologica di Begemann con quella di Schmertmann;
- per le prove penetrometriche con piezocono CPTU sono state ottenute dall'interpretazione litologica di Robertson.

Si specifica che la quota dei sondaggi del 2017 è quella del rilievo effettuato dalla società Ambiente sc e riportata nelle schede stratigrafiche mentre per le altre indagini è ricavata dai punti quotati della base topografica.

8.2. Modello geologico del sottosuolo

Le indagini descritte al capitolo precedente permettono di identificare nell'intera area oggetto della presente relazione geologica un intervallo superficiale, limitato ai primi 2,0÷2,5 m di spessore dal p.c., costituito prevalentemente da limo con argilla debolmente sabbioso e più raramente anche ghiaioso. In questo contesto di uniformità litologica, ai fini della modellazione geologica, è possibile suddividere il sottosuolo interessato dalle opere in oggetto in tre strati, individuabili integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT e, subordinatamente dalle CPTU). Dall'alto verso il basso è quindi possibile schematizzare la seguente successione:

- da 0,00 a 0,30÷1,70 m da p.c.: limo con argilla debolmente sabbioso e, subordinatamente, argilla con limo talvolta debolmente sabbiosa; in alcune zone è presente terreno di riporto costituito prevalentemente da ghiaia e ciottoli in matrice sabbiosa con resti di laterizi;
- da 0,30÷1,70 m a 1,40÷4,00 da p.c.: argilla con limo, talvolta debolmente sabbiosa e, subordinatamente, limo con argilla spesso debolmente sabbioso;
- da 1,40÷4,00 m a (almeno) 10,00 m da p.c.: argilla con limo a tratti debolmente sabbiosa e limo con argilla spesso debolmente sabbioso

A partire da profondità di 20÷25 m dal p.c. (circa 20÷15 m s.l.m.), fino ad almeno 50÷65 m dal p.c. si incontrano, nei pressi della deviazione del nuovo tracciato del Fosso Reale (nella verticale S91, vicino allo stabilimento della Baxter Manufacturing S.p.A. e nei sondaggi profondi eseguiti presso il complesso del Polo Scientifico Universitario) limi argillosi con ghiaia con elementi di dimensioni centimetriche di natura calcarea, calcareo-marnosa, calcareo-

arenacea, o di ghiaia e sabbia grossolana in matrice limosa-argillosa. Intervalli di un paio di metri di spessore costituiti da argilla limosa con ghiaia poligenica si rinvennero anche nei sondaggi profondi realizzati presso la discarica di Case Passerini, a partire dalla profondità di circa 30 m dal p.c. (circa 5÷10 m s.l.m.).

9. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali

L'analisi delle prove di laboratorio (prove edometriche) e delle prove in sito (prove penetrometriche statiche CPT, prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU, prove dilatometriche DT) ha mostrato la presenza di terreni superficiali con un elevato grado di sovraconsolidazione (OCR), concentrata soprattutto nei primi due metri di profondità dal piano campagna e dovuta a processi di essiccamento per temporanea emersione di sedimenti in ambiente di deposizione lacustre-palustre. Tali processi sono annoverati in letteratura fra le cause di preconsolidazione di terreni, fenomeno diverso da quello meccanico dovuto a precarico, con successiva erosione.

Queste evidenze di sovraconsolidazione, che nell'area di progetto assume valori molto variabili sia in senso orizzontale che verticale, sono state registrate anche in corrispondenza di aree limitrofe a quella in oggetto in terreni coesivi del tutto analoghi (argille limose e limi argillosi) e sono documentate sia nelle zone interessate dalla realizzazione delle altre opere previste dal project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035 (in particolare nell'area di progetto della nuova pista, degli argini del nuovo tracciato del Fosso Reale, della duna antirumore a protezione del Polo Scientifico) che, ad esempio, presso l'area di Case Passerini per la progettazione del nuovo impianto di recupero energia da incenerimento rifiuti non pericolosi, presso l'area di Peretola-Castello (in G. Vannucchi "Analisi statistica e sperimentale della compressibilità dei terreni di fondazione nell'area di Peretola-Castello", Rivista Italiana di geotecnica, A.G.I., 1987), presso l'area del Polo Scientifico Universitario di Sesto Fiorentino.

10. Valutazioni sulla possibile liquefazione dei terreni

Ai sensi del § 7.11.3.4 delle NTC2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;

2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

Nel caso in esame, come riassunto nella tabella 12 seguente, è possibile non effettuare la verifica a liquefazione.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa al p.c. < 0.1 g	0,14 g (min) 0,31 g (max)	SI	-
2	Prof. falda > 15 m	>10 m >15 m >40 m	SI NO NO	Informazioni da piezometri
3	$(N_1)_{60} > 30$ $q_{c1N} > 180$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica		NO	Distribuzioni prevalentemente al di fuori dei limiti

Tabella 12- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

In merito al punto 4 si precisa che, dall’analisi delle curve granulometriche, risulta che per la maggior parte dei campioni le curve cumulative presentano un passante sistematicamente superiore al 80%÷85% per la frazione fine, quindi si posizionano esternamente rispetto alla composizione granulometrica determinante la condizione di possibilità di liquefazione.

11. Terre e rocce da scavo

Per la gestione delle terre e rocce da scavo relative a tutti gli interventi in progetto si rimanda allo specifico Piano di Utilizzo delle Terre (PUT).

12. Conclusioni

Lo studio geologico effettuato nell'area interessata dal progetto di realizzazione della nuova pista, delle opere di compensazione, idrauliche e accessorie previste dal Master Plan Project Review 2025-2035 per l'Aeroporto Internazionale Amerigo Vespucci di Firenze, non ha evidenziato la presenza di aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici e sismici contrastanti o limitanti la fattibilità degli interventi.

Viste le caratteristiche di progetto, quelle geologiche e geotecniche e i risultati delle indagini eseguite nel sito in esame (*Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, 2015, 2017*) è stato elaborato il modello geologico (§ 8) e identificata, attraverso indagini geofisiche, la categoria di sottosuolo calcolata rispetto al piano campagna (Categoria di sottosuolo C). Per la consultazione delle schede dei pozzetti geognostici, delle stratigrafie dei sondaggi, dei certificati delle prove penetrometriche e dilatometriche, dei certificati delle analisi geotecniche di laboratorio, dei rapporti finali delle indagini sismiche e per la definizione del modello geotecnico e la determinazione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici, si rimanda ai relativi rapporti di indagine.

Firenze, marzo 2023

dr. geol. Fabio Picchi

dr. geol. Michele Sani

13. Bibliografia

Per redigere i capitoli 3 e 4 sono state consultate e utilizzate le seguenti pubblicazioni:

- AA.VV. (1982) – *Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale in scala 1:250.000*. Note illustrative C.N.R., Prog. Fin. Geod., 429, 203 pp.
- Abbate E., Bortolotti V., Passerini P. & Sagri M. (1970) – *Introduction to the geology of the Northern Apennines*. *Sedimentary Geology* 4, 3-4, 207-249.
- Autorità di Bacino del Fiume Arno (2010) – *Piano di Bacino – Stralcio bilancio idrico*.
- Bartolini C. & Pranzini G. (1981) – *Plio-Quaternary evolution of the Arno Basin drainage*. *Zeit. Geomorph. N.F., Suuppl. Bdo* 40, 77-91.
- Boccaletti M., Corti G., Gargini A., Gasperini P., Piccardi L., Pranzini G., Vannucci G., Moratti G. (1998) – *Geologia urbana di Firenze*. *Geologia dell'ambiente*, anno VI, n.4/98, 9-20.
- Boccaletti M., Moratti G. & Pranzini G. (1997) – *Geologia del bacino di Firenze*, in *Geologia Urbana di Firenze*, Atti del convegno "Geologia delle grandi aree urbane", Bologna, 4/5 novembre 1997, vol. A, 2-9.
- Briganti R., Ciufegni S., Coli M., Polimeni S. & Pranzini G. (2003) – *Underground Florence: Plio-Quaternary evolution of the Florence area*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 122, 1-11.
- Canuti P., Pranzini G. & Sestini G. (1966) – *Provenienza ed ambiente di sedimentazione dei ciottoli del Pliocene di San Casciano (Firenze)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 5, 340-364.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976a) – *Il bacino lacustre di Firenze - Prato - Pistoia. Geologia del sottosuolo e ricostruzione evolutiva*. *Boll. Soc. Geol. It.*, XCVI (4), 1975, 637-660.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976b) – *Ricerche geologiche e idrogeologiche nel sottosuolo della pianura di Firenze*. *Boll. Soc. Geol. It.*, XCVI (4), 1975, 661-692.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976c) – *Gli acquiferi profondi fra Firenze e Pistoia*. *Boll. Ingegn. Prov. Firenze*, 1975, (12), 1-3.
- Coli M., Pini G., Rubellini P. & Agostini A. (2006) – *Firenze - Carta litotecnica*. Ricerca cofinanziata dal Comune di Firenze e Università di Firenze Dip.to Scienze della Terra. SELCA Firenze.
- Coli M., Pranzini G. & Rubellini P. (2012) – *Idrogeologia dell'area fiorentina*. Comune di Firenze e Università di Firenze Dip.to Scienze della Terra.
- Coli M. & Rubellini P. (2007) – *Note di geologia fiorentina*. SELCA 2007.
- Gargini A. & Pranzini G. (1994) – *Map of protection against pollution of aquifers in the Middle Valdarno (Florence-Prato-Pistoia plain)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 48, 923-928.
- Gori P. (1970) – *Osservazioni idrogeologiche e sedimentologiche nell'area compresa fra Campi Bisenzio, Scandicci e Lastra a Signa*. Tesi di laurea inedita, Istituto di Geologia di Firenze.
- Grigioni A. (2012) – *Relazione geologica e idrogeologica. Impianto di recupero energia da incenerimento di rifiuti non pericolosi loc. Case Passerini, Sesto Fiorentino (Firenze)*, 1-158.
- Guazzone G. (1971) – *Ricerca sulle falde acquifere profonde fra Firenze e Pistoia. Parte I. Indagine geologica*. Quaderni dell'Istituto di ricerca sulle acque, 6, 42-53.
- Pandeli E. (2008) – *La pianura di Firenze-Prato-Pistoia nel quadro dell'evoluzione geologica dell'Appennino Settentrionale*. In: *Un piano per la Piana: idee e progetti per un parco*.

Atti del convegno 9-10 maggio 2008 – Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, Università di Firenze, 1-16.

Pranzini G. (1994) – *Water resources of the Arno Basin*. Mem. Soc. Geol. It., 48, 785-794.

Pranzini G. (2008) – *Idrogeologia della piana fiorentina*. In: *Un piano per la Piana: idee e progetti per un parco*. Atti del convegno 9-10 maggio 2008 – Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, Università di Firenze, 1-15.

* * *