



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

COMPENSAZIONI AMBIENTALI E PAESAGGISTICHE
CAP4 - AREA DI COMPENSAZIONE "IL PIANO DI MANETTI" DI
SIGNA - Relazione Geologica Il Piano di Manetti

Livello di Progetto

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO PROGETTUALE
A LIVELLO MINIMO DI PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

LIV PSA	REV 02	DATA EMISSIONE MARZO 2024	SCALA -	CODICE FILE COMPLETO FLR-MPL-PSA-CAP4-011-GL-RT_Rel Geo Manetti TITOLO RIDOTTO Rel Geo Manetti
------------	-----------	------------------------------	------------	---

02	03/2024	EMISSIONE PER PROCEDURA VIA-VAS	M. SANI	F.BOSI	L. TENERANI
01	03/2023	EMISSIONE PER APPROVAZIONE IN LINEA TECNICA DI ENAC	M.SANI	F.BOSI	L. TENERANI
00	10/2022	EMISSIONE PER DIBATTITO PUBBLICO	M.SANI	F.BOSI	L. TENERANI
REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

<p>COMMITTENTE PRINCIPALE</p>  <p>ACCOUNTABLE MANAGER Dott. Vittorio Fanti</p>	<p>GRUPPO DI PROGETTAZIONE</p>  <p>DIRETTORE TECNICO Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631</p>	<p>SUPPORTI SPECIALISTICI</p>  <p>TERRA & OPERE S.R.L. SOCIETÀ D'INGEGNERIA CONSULENZE GEOLOGICHE</p> <p>SUPPORTO SPECIALISTICO Dott. Geol. Michele Sani Ordine dei Geologi della Toscana n°383</p>
<p>POST HOLDER PROGETTAZIONE Ing. Lorenzo Tenerani</p>	<p>RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Arch. Filippo Bosi Ordine degli Architetti di Firenze n. 9004</p>	
<p>POST HOLDER MANUTENZIONE Ing. Nicola D'Ippolito</p>		
<p>POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO Geom. Luca Ermini</p>		

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
1.2. Descrizione delle opere e degli interventi.....	7
1.3. Individuazione dei vincoli presenti.....	8
2. Fasi di lavoro.....	9
3. Geologia.....	10
3.1. Evoluzione tettonica del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia.....	10
3.2. Geologia e stratigrafia della Piana di Firenze.....	13
3.2.1. <i>Substrato pre-lacustre</i>	13
3.2.2. <i>Depositi pre-lacustri</i>	14
3.2.3. <i>Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano</i>	14
3.2.4. <i>Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia</i>	14
3.2.4.1. Argille turchine AUCTT.....	15
3.2.4.2. Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti.....	15
3.2.5. <i>Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)</i>	15
3.2.6. <i>Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)</i>	16
3.3. Orizzonti "Firenze".....	16
3.3.1. <i>Orizzonte "Firenze 1"</i>	16
3.3.2. <i>Orizzonte "Firenze 2"</i>	17
3.3.3. <i>Orizzonte "Firenze 3"</i>	18
3.3.4. <i>Orizzonte "Firenze 4"</i>	19
3.3.5. <i>Considerazioni sull'andamento degli orizzonti "Firenze"</i>	20
3.4. Geologia dell'area di intervento.....	22
3.4.1. <i>Sintema di Firenze-Prato-Pistoia</i>	22
3.4.1.1. <i>Subsintema delle conoidi di chiusura (FTP2)</i>	22
3.4.2. <i>Depositi olocenici</i>	22
3.4.2.1. <i>Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna1)</i>	22
3.4.2.2. <i>Depositi alluvionali attuali (b)</i>	23
3.4.2.3. <i>Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5)</i>	23
4. Idrogeologia.....	23
4.1. Aspetti idrogeologici generali.....	23
4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area.....	26
4.3. Superficie piezometrica.....	28
5. Geomorfologia e stabilità.....	29
5.1. Introduzione.....	29
6. Classi di pericolosità.....	29
6.1. Pericolosità geologica.....	30
6.2. Pericolosità idraulica.....	30
6.2.1. <i>L.R. 41/2018</i>	30
6.3. Pericolosità sismica.....	31
7. Classi di fattibilità.....	31
7.1. Fattibilità geologica.....	31
7.2. Fattibilità idraulica.....	33
7.3. Fattibilità sismica.....	33
8. Risultati delle indagini eseguite.....	33
8.1. Generalità.....	33
8.2. Pozzetti geognostici.....	38
8.3. Prove penetrometriche.....	38
8.3.1. <i>Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)</i>	45

8.4. Sondaggi a carotaggio continuo.....	49
8.4.1. <i>Standard Penetration Test</i>	49
8.5. Prove geotecniche di laboratorio.....	50
8.5.1. <i>Campioni rimaneggiati (da pozzetti geognostici)</i>	50
8.5.2. <i>Campioni indisturbati (da sondaggi a carotaggio continuo)</i>	50
8.5.2.1. Interpretazione prove di laboratorio.....	52
8.6. Indagini geofisiche.....	52
8.6.1. <i>Prospezioni geoelettriche</i>	52
8.6.2. <i>Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)</i>	52
8.6.3. <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)</i>	53
9. Sismicità e definizione dei parametri sismici.....	53
9.1. Zona sismica.....	53
9.2. Parametri sismici.....	54
9.2.1. <i>Aspetti generali</i>	54
9.2.2. <i>Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato)</i>	55
9.2.3. <i>Categoria topografica</i>	55
9.2.4. <i>Parametri dell'azione sismica locale</i>	55
10. Modellazione geologica e geotecnica.....	55
10.1. Modello geologico del sottosuolo.....	55
10.1.1. <i>Opere di presa, rilevato e centro visite in progetto</i>	56
10.1.2. <i>Argini da realizzare</i>	57
10.2. Modello geotecnico.....	57
10.2.1. <i>Valori caratteristici dei parametri geotecnici</i>	58
10.2.1.1. <i>Aspetti generali</i>	58
10.2.1.2. <i>Opere di presa, rilevato e centro visite in progetto</i>	60
10.2.1.3. <i>Argini da realizzare</i>	61
10.2.2. <i>Considerazioni sui terreni coesivi superficiali</i>	62
11. Liquefazione.....	66
12. Terre e rocce da scavo.....	67
13. Indicazioni relative alla realizzazione dei lavori.....	67
13.1. Indicazioni inerenti la gestione delle acque di aggettamento.....	67
13.2. Indicazioni sulla necessità di opere provvisorie e loro tipologia.....	68
13.3. Indicazione sulla tutela dei suoli interessati dalle aree di cantiere.....	68
13.4. Indicazione degli interventi di ripristino delle aree a fine cantiere.....	68
14. Conclusioni.....	68
15. Bibliografia.....	70

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Ubicazione dell'area di progetto in scala 1:10.000.	11
Figura 2 - <i>Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi et al., 1976b)</i>	18
Figura 3 - Carta geologica in scala 1:10.000.	25
Figura 4 - Carta idrogeologica in scala 1:10.000.	27
Figura 5 - Carta geomorfologica in scala 1:10.000.	32
Figura 6 - <i>Ubicazione delle indagini geognostiche realizzate in scala 1:10.000</i>	37
Figura 7 - Aree omogenee per il modello geologico (scala 1:7.500).	59
Figura 8 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati nell'area di progetto.	64

Figura 9 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati nell'area di progetto. 64
Figura 10 - Sezione litotecnica lungo l'argine del Fiume Bisenzio 65
Figura 11 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi ubicati presso l'area di progetto. 66

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classi di permeabilità. 26
Tabella 2 - Misure piezometriche. eseguite a febbraio 2018. 29
Tabella 3 - Classi di fattibilità geologica. 33
Tabella 4 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi. lungo il Fiume Bisenzio. 34
Tabella 5 - Campioni indisturbati prelevati dai sondaggi lungo il Fiume Bisenzio. 35
Tabella 6 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi. 36
Tabella 7 - Campioni indisturbati della campagna del 2015. 38
Tabella 8 - Elaborazione statistica prove penetrometriche. 45
Tabella 9- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT} 50
Tabella 10 - Prove geotecniche "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati. 52
Tabella 11 - Valori $V_{s_{eq}}$ 53
Tabella 12 - Spessori degli strati nelle "aree omogenee" individuate. 58
Tabella 13 - Valori caratteristici per l'area di intervento (lato Bisenzio). 60
Tabella 14 - Valori caratteristici area di progetto argini. 62
Tabella 15 - Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione. 67

ELABORATI FUORI TESTO

Allegato A – Indagini geognostiche e prove geotecniche di laboratorio
Allegato B – Indagini sismiche
Allegato C – Azione sismica

* * *

1. Premessa

1.1. Generalità

Il presente documento costituisce la Relazione Geologica dell'intervento all'area di compensazione "Il Piano di Manetti", ubicata nel territorio del Comune di Signa (Provincia di Firenze - figura 1), parte integrante della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale (o Masterplan) al 2035 dell'aeroporto di Firenze, qui sviluppata e dettagliata ad un livello tecnico ritenuto congruo con le finalità della presente fase procedurale, comunque non inferiore a quello del progetto di fattibilità tecnica ed economica di cui all'art. 41 del D. Lgs. n. 36/2023.

Il citato approfondimento tecnico viene previsto ad integrazione della Sezione Generale della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale al 2035, predisposta in aderenza alle normative e/o regolamenti specifici del settore aeronautico, rispetto alla quale si pone l'obiettivo di elaborare ulteriori elementi tecnici di studio, dettaglio, analisi e progettazione, ritenuti necessari ai fini del compiuto espletamento dei procedimenti amministrativi (di compatibilità ambientale e di autorizzazione) ai quali risulta per legge assoggettato lo strumento del Piano di Sviluppo Aeroportuale, così integrato in modo da rafforzarne la valenza e la funzione progettuale, strettamente interconnessa con quella pianificatoria e programmatica di investimento.

Le informazioni di seguito riportate vanno, pertanto, analizzate in stretta correlazione rispetto ai più ampi ed estesi aspetti tecnico-economici trattati all'interno dei documenti afferenti alla Sezione Generale del 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 analisi e comprensione della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale.

La citata Project Review costituisce la nuova formulazione tecnica delle previsioni progettuali e di investimento che ENAC prevede di attuare, nel medio-lungo periodo (orizzonte 2035, coerente con quello del Piano Nazionale degli Aeroporti in fase di aggiornamento), relativamente all'infrastruttura aeroportuale di Firenze, redatta dal Gestore aeroportuale di intesa con l'Ente regolatore in attuazione degli obblighi di miglioramento, ottimizzazione e sviluppo dell'aeroporto insiti nel contratto di concessione che lega lo stesso Gestore alle

Istituzioni dello Stato (Ministero delle Infrastrutture e ENAC) per la gestione totale dell'infrastruttura aeroportuale (bene dello Stato). Ne consegue che l'insieme documentale di cui la presente relazione costituisce parte integrante deve essere visto e analizzato nella propria autonomia e indipendenza sostanziale, per quanto inevitabilmente consequenziale rispetto al precedente Masterplan 2014-2029 col quale risultano ancora sussistenti più elementi di dialogo che, tuttavia, ci si pone l'obiettivo di non assurgere a valenza prodromica e a funzionalità necessaria per una completa illustrazione, definizione e comprensione del nuovo Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035.

Si auspica, infine, di aver esaurientemente e correttamente tradotto e trasferito, all'interno della documentazione di cui al nuovo Masterplan 2035, quel prezioso bagaglio di esperienza e quell'insieme di utili risultanze derivanti dal dialogo costruttivo e dialettico che, nell'ultimo decennio, ha visto in più momenti la partecipazione di ENAC, del Gestore aeroportuale, degli Enti/Amministrazioni interessati, delle Istituzioni nazionali e regionali, dei vari stakeholders e della cittadinanza attiva intorno ai temi relativi al trasporto aereo, alla multimodalità della mobilità, al ruolo della rete aeroportuale territoriale toscana e al futuro dello scalo aeroportuale di Firenze, che ENAC vede sempre più strategico, integrato e funzionale alla rete nazionale ed europea dei trasporti.

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 2017 per la *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci e la successiva integrazione del febbraio 2018 relativa all'area in oggetto, determina le classi di fattibilità dell'intervento (geologica, idraulica e sismica), e contiene la modellazione geologica, geotecnica e sismica del terreno.

1.2. Descrizione delle opere e degli interventi

Visti gli elaborati progettuali redatti dallo Studio di Architettura Montieri-Macchi di Milano, la presente relazione geologica avente come oggetto l'area di compensazione ecologica e idraulica denominata Il Piano valuterà le seguenti opere principali:

- lago avente una superficie di circa 25 ha e una profondità compresa tra 0,8 e 1,4 m, che

occuperà la gran parte dei terreni di progetto;

- argini perimetrali, per uno sviluppo di circa 2,8 km, di altezza pari a 6,0 m (quota finale di progetto 40,50 m s.l.m.);
- opere di presa, ubicate nella porzione sud-orientale del sito, lungo gli argini attuali del Fiume Bisenzio;
- un fabbricato adibito a centro visite, costituito da un piano fuori terra ed uno interrato, che sorgerà su un terrapieno di dimensioni circa 70 x 100 m ed altezza 5,50 m.

Il volume lordo dell'edificio è pari a circa 2.050 mc, pertanto ricade nella classe d'indagine 3 ai sensi del Decreto del Presidente della Giunta Regionale 19 gennaio 2022 n. 1/R¹ e del relativo *Allegato 1 - Linee guida sulle tipologie e classi di indagini geologiche, geofisiche e geotecniche da allegare ai progetti da presentare ai sensi dell'art. 3 del Reg. 1R/2022.*

Suddetta classe è riferita alle opere di volume totale inferiore a 6000 metri cubi e altezza in gronda inferiore a 20 metri. Nell'ambito di tale classe, sono effettuate le seguenti indagini:

- a) *Per la determinazione dell'azione sismica una campagna d'indagine sismica di superficie, ai sensi di quanto definito al paragrafo 2, punto 2, lettera b);*
- b) *Per la parametrizzazione del volume geotecnico significativo, ai sensi di quanto definito al paragrafo 2, punto 2, lettere a) e c), almeno 2 verticali di indagine di cui una è rappresentata da un sondaggio geognostico a carotaggio continuo dotata di piezometro per la misura della falda e con prelievo di campione/i indisturbato/i su cui realizzare idonee prove sulle terre e sulle rocce presso laboratori compresi nell'elenco di cui al servizio tecnico centrale del Consiglio superiore dei lavori pubblici. Nel caso in cui la litologia non permetta di prelevare campioni indisturbati, sono eseguite almeno prove penetrometriche in foro di tipo SPT. In presenza di problematiche di versante sono altresì prodotte verifiche di stabilità del pendio e del complesso opera-pendio.*

1.3. Individuazione dei vincoli presenti

L'area in esame dal punto di vista dei principali vincoli territoriali presenta la seguente situazione:

¹ *Regolamento di attuazione dell'articolo 181 della legge regionale 10 novembre 2014 n. 65 (Norme per il governo del territorio). Disciplina sulle modalità di svolgimento delle attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico.*

- l'area di intervento non è interessata dal Vincolo Idrogeologico ai sensi del Regio Decreto Legge n. 3267 del 30 dicembre 1923²;
- l'intera area ricade all'interno del Sito di Interesse Regionale (SIR) *45 Stagni della Piana Fiorentina* e dell'Area Protetta di interesse locale A.N.P.I.L. di Focognano;
- si tratta di un'area di notevole interesse pubblico (D.M. 20 maggio 1967 e D.M. 23 giugno 1967) per la fascia di rispetto di 300 m dalla linea di mezzzeria delle Autostrade A1 e A11;
- l'area oggetto di studio ricade interamente all'interno delle Aree sensibili già vulnerate da fenomeni di esondazioni e soggette a rischio idraulico (art. 3 PTCP);
- i territori coperti da foreste e da boschi (lettera g, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004) per le fasce lungo le sponde del Fosso Reale;
- una porzione a sud che rientra nella classe *Corso d'acqua iscritto nella tavola dei vincoli della Provincia (D. Lgs. 42/2004, ex L. 431/85)*.
- una porzione a sud che rientra all'interno del vincolo paesaggistico ai sensi del Codice dei beni culturali e del paesaggio (D.Lgs. 42/2004), punto c del comma 1 dell'art. 142 del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004 n.42 avente come oggetto *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, che indica, tra le aree tutelate per legge, *i fiumi, i torrenti, i corsi d'acqua iscritti negli elenchi previsti dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque ed impianti elettrici, approvato con regio decreto 11 dicembre 1933, n. 1775, e le relative sponde o piedi degli argini per una fascia di 150 metri ciascuna*;
- zone gravate da usi civici (lettera h, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004).

2. Fasi di lavoro

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

- consultazione delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Regolamento Urbanistico del Comune di Signa;
- 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;

² *Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani.*

- 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;
- attribuzione della fattibilità agli interventi in progetto dal punto di vista geologico, idraulico e sismico (si veda il § 7);
- utilizzo delle indagini geognostiche che costituivano la *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., nel 2017;
- utilizzo delle indagini geognostiche che costituivano la *Campagna di indagini geognostiche integrative nell'area di compensazione ecologica e idraulica "Il Piano"* eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., nel 2018;
- analisi dei risultati delle indagini geognostiche a disposizione per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione (si veda il § 8);
- definizione della categoria di sottosuolo secondo l'approccio semplificato ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (si veda il § 9.1)
- determinazione dei parametri sismici (si veda l'allegato C);
- elaborazione del modello geologico del sito e del modello geotecnico di sottosuolo (§ 10);
- indicazione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici ricavati (§ 10.2.1);
- valutazioni in merito alla suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione (§ 11).

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.

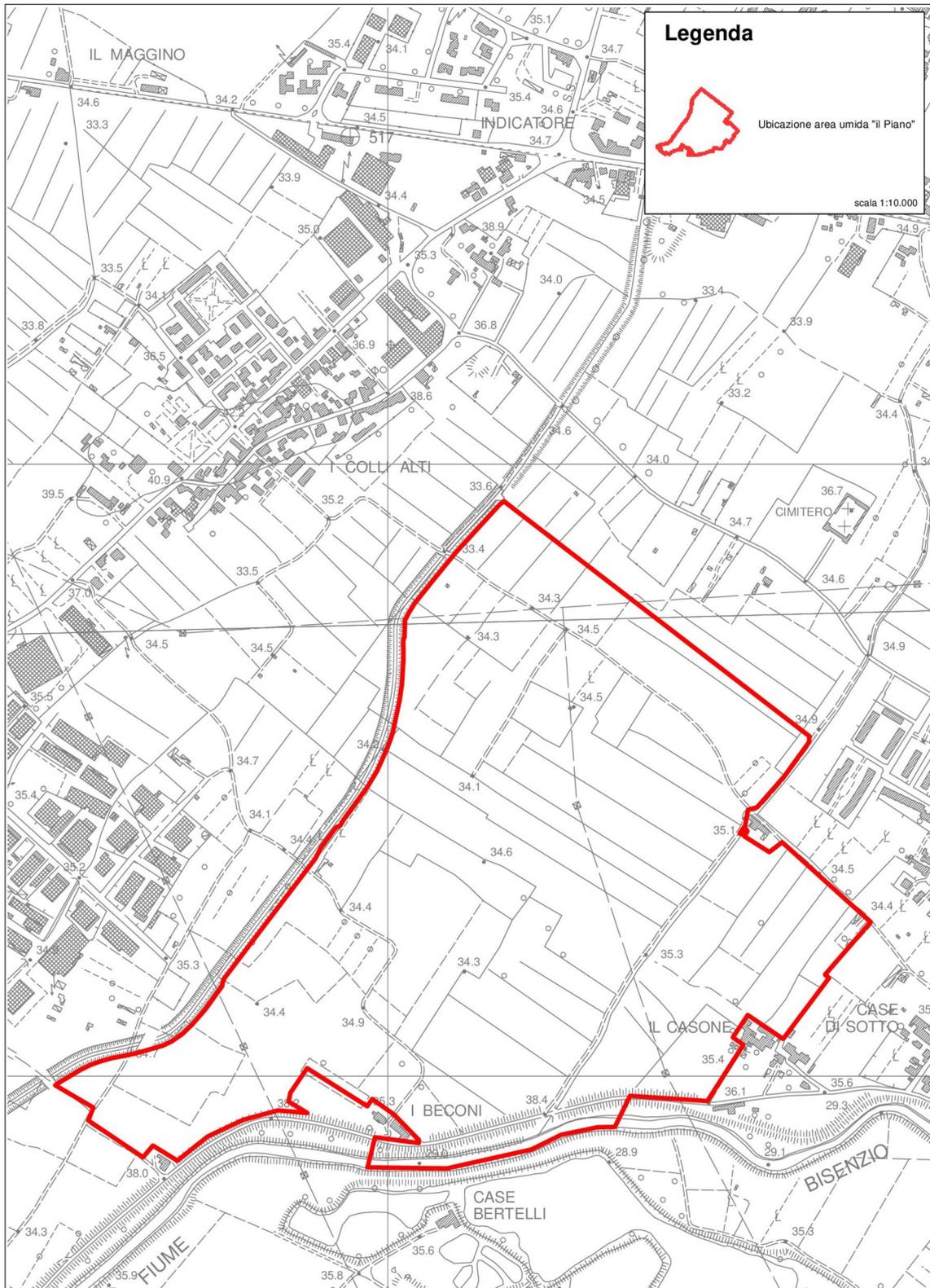


Figura 1 - Ubicazione dell'area di progetto in scala 1:10.000.

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 frammenti 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 2), 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.

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.

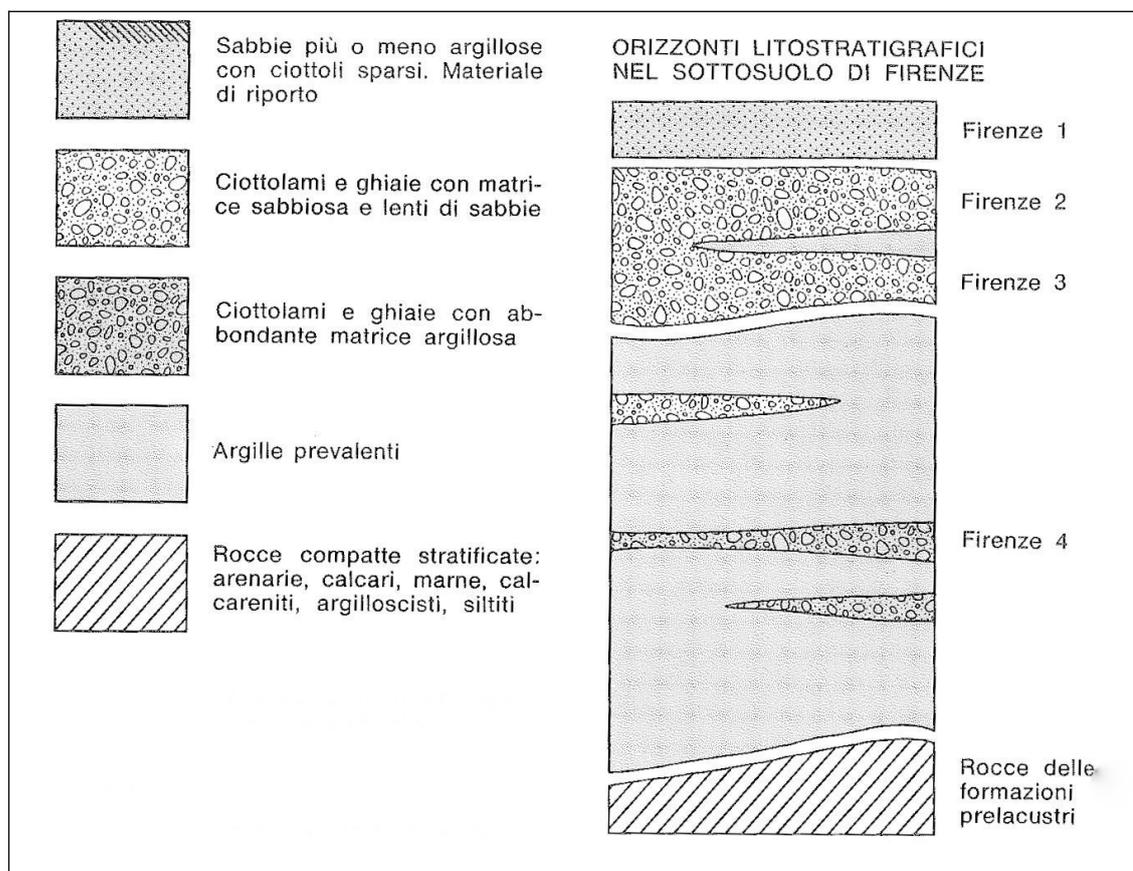


Figura 2 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi *et al.*, 1976b).

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.

3.3.5. 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

Nell'area in cui verrà realizzata l'opera di compensazione in oggetto affiorano il Sintema di Firenze-Prato-Pistoia (Subsintema delle conoidi di chiusura, FTP2) e i Depositi Olocenici, rappresentati dai Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1), Depositi alluvionali attuali (b) e dai Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) come mostrato nella carta geologica riportata nella figura 3, disegnata utilizzando i Fogli n. 263140 e 275020 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, deposti 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 Capecchi *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. Sintema di Firenze-Prato-Pistoia

3.4.1.1. Subsintema delle conoidi di chiusura (FTP2)

Questa unità è costituita da ghiaie sabbioso-limose con clasti generalmente ben arrotondati e localmente ben cementati. I clasti sono prevalentemente di natura calcarea riferibili alle Formazioni di Sillano e Monte Morello. L'età è compresa tra il Pliocene superiore e il Plesistocene inferiore.

3.4.2. Depositi olocenici

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

Si tratta di depositi di origine alluvionale costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali, di 1° ordine [bna1] i quali compongono la quasi totalità dei terreni affioranti nell'area della carta geologica. Gli interventi oggetto della presente relazione saranno realizzati interamente sui terrazzi fluviali di 1° ordine (bna1). Dall'esame della documentazione inerente

le campagne di indagine effettuate si evince che, dal punto di vista meramente litologico, nell'area interessata dai lavori in progetto sono presenti, sulla base delle stratigrafie riportate nell'allegato A, terreni sia coesivi (limo sabbioso e argilloso, argilla da limosa/sabbiosa a compatta) che incoerenti (sabbia da fine a grossolana, livelli di ghiaia).

3.4.2.2. 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.

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

L'unità raggruppa tutti quei depositi connessi direttamente con l'attività umana. Comprende quindi terreni di riporto, rilevati stradali, terreni di bonifica per colmata. In particolare, nell'area investigata, essi costituiscono gli argini del Fiume Bisenzio.

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 $10^{-3} \div 10^{-7}$ 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 rinvergono 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 valle (da $1,0 \div 1,5$ % a 0,2 %), per l'aumento dei valori di trasmissività dei sedimenti.

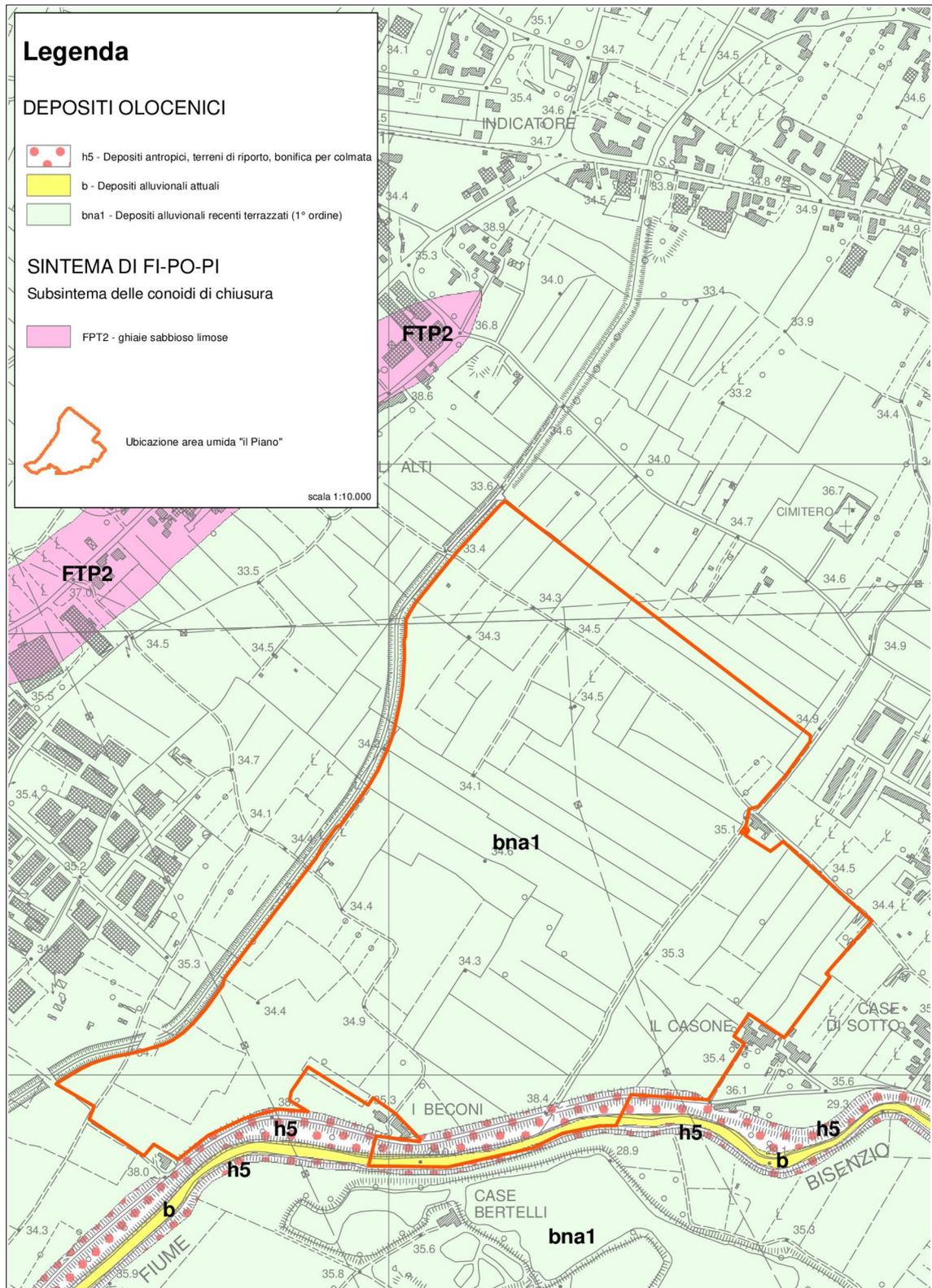


Figura 3 - Carta geologica in scala 1:10.000.

4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area

Per quanto riguarda le caratteristiche idrogeologiche della principale unità geologica presente (bna1), è possibile stimare la permeabilità su base qualitativa, in funzione degli elementi da cui essa dipende (caratteristiche litologiche dei terreni affioranti, presenza di pozzi, densità del reticolo idrografico - figura 4). 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 (bna1) è in genere bassa e diminuisce o aumenta in corrispondenza rispettivamente dei livelli fini o grossolani.

Durante le perforazioni dei sondaggi attrezzati a piezometro (S126, S128) e di quelli ubicati sull'argine del Fiume Bisenzio (S124, S125 - figura 6) è stata rinvenuta acqua. La spiegazione dell'acqua rinvenuta sta nel fatto che il sottosuolo dell'area esaminata, costituito da terreni fini 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. Poiché il sottosuolo dell'area esaminata appare costituito da terreni fini in massima parte rappresentati da argille e limi si tratta di acquicludi 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. La permeabilità delle altre formazioni geologiche affioranti, anch'essa primaria, è generalmente molto bassa per i Depositi antropici (h5), bassa per il Sintema delle conoidi di chiusura (FTP2) e media per i Depositi alluvionali attuali (b).

Nella carta idrogeologica riportata nella figura 4, le formazioni geologiche presenti nell'area in studio 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)	molto bassa
2	Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1) Sintema delle conoidi di chiusura (FTP2)	bassa
3	Depositi alluvionali attuali (b)	media
4	-	alta
5	-	molto alta

Tabella 1 - Classi di permeabilità.

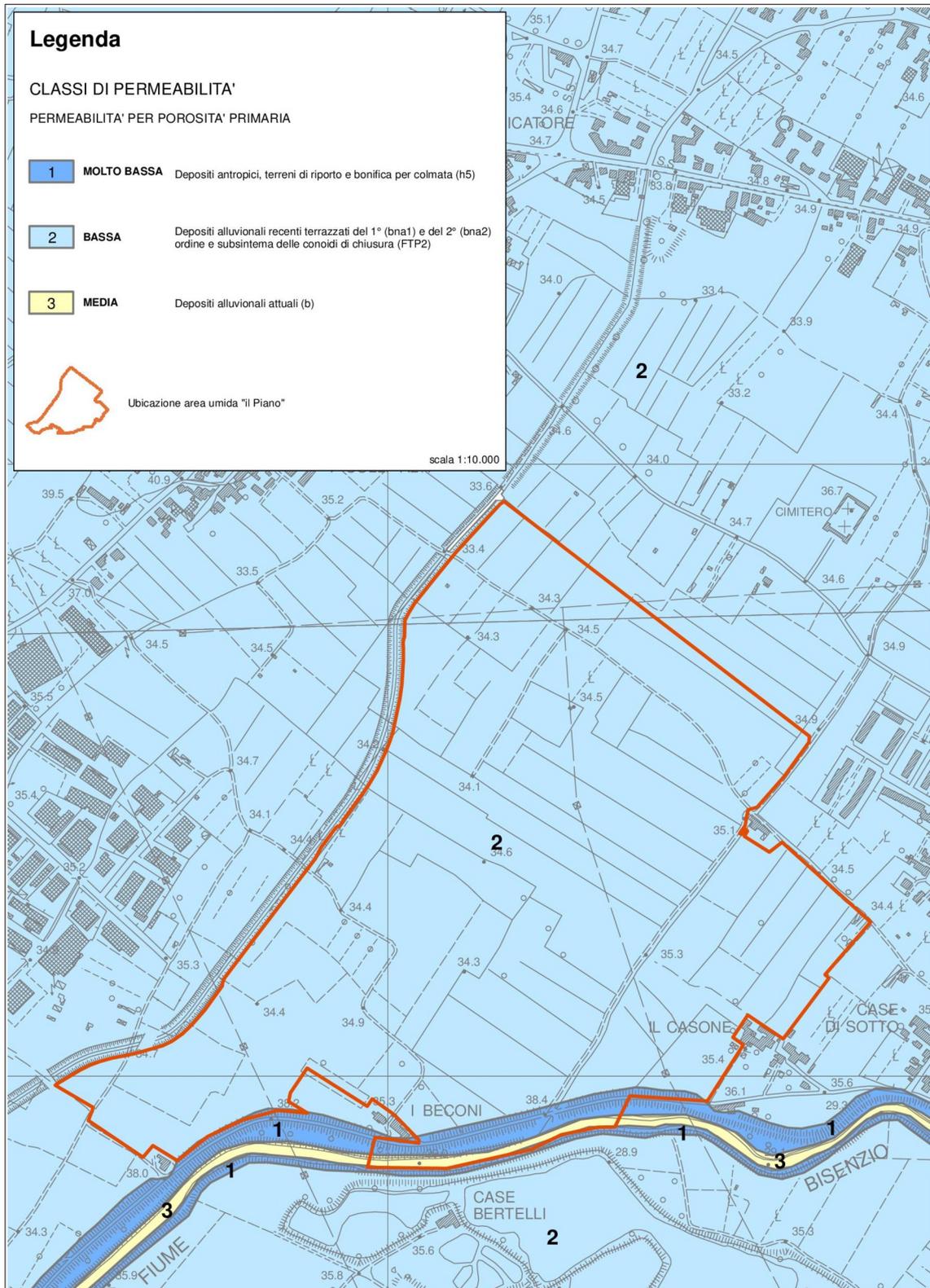


Figura 4 - Carta idrogeologica in scala 1:10.000

Volendo invece fornire un valore indicativo del coefficiente di permeabilità K, si può far riferimento a quello ottenuto dalle prove edometriche dei sondaggi (si veda il § 8.5) che risulta compreso tra 1,53E-11 m/sec (campione S128-CI2, argilla limosa) e 1,45E-09 m/sec (campione S125-CI2 limo argilloso debolmente ghiaiosa sabbiosa).

4.3. Superficie piezometrica

Come detto, durante l'esecuzione di alcuni sondaggi 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 due metri 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 dell'opera in progetto è previsto uno scavo massimo di 2,00 m che coinvolgerà 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 in progetto 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 strettamente di interesse e rilevato a sud nella zona dell'Osmannoro (§ 4.1).

Nella campagna di indagini geonostiche di riferimento per il presente studio, sono stati realizzati due piezometri (S126 e S128, si veda il § 8.1 e la tavola 1), ubicati uno a nord est

e uno a sud ovest dell'area di progetto; le misure piezometriche effettuate indicano le quote riportate nella tabella 2:

sigla piezometro	quota [m s.l.m.]	profondità [m da p.c.]
S126	32,24	2,95
S128	33,27	1,12

Tabella 2 - Misure piezometriche. eseguite a febbraio 2018.

E' fondamentale sottolineare che, come detto, 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. Nello specifico del piezometro S126 e S128, è ragionevole che si tratti di semplice acqua di ritenzione, come illustrato al paragrafo precedente.

5. Geomorfologia e stabilita'

5.1. Introduzione

L'area umida "Il Piano di Manetti" sarà realizzata nel Comune di Signa, tra gli abitati di Colli Bassi e San Mauro, in prossimità dei toponimi I Beconi e Il Casone ed è delimitata a sud da Via Argine Strada che corre parallela al Fiume Bisenzio. La zona è pianeggiante ed è posta tra le quote di circa 34 e 35 m s.l.m.. In relazione all'andamento della superficie topografica, il terreno in esame non mostra forme o processi significativi fatta eccezione per quelli legati all'attività antropica. In particolare sono presenti canali di scolo e fossi di drenaggio delle acque meteoriche e, le forme principali individuate, sono i rilevati arginali cartografati come *Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata*.

6. Classi di pericolosità

L'area di intervento ricade interamente nel Comune di Signa che è dotato del Piano Strutturale e del Regolamento Urbanistico e dunque delle Carte di pericolosità previste dalla legislazione vigente.

6.1. Pericolosità geologica

La carta della *Pericolosità geomorfologica* (Regolamento Urbanistico Comunale - Tavola GI 01 del giugno 2010) classifica l'area di progetto in classe di pericolosità geologica bassa (G1).

Per quanto riguarda il Piano di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, Stralcio Assetto Idrogeologico (PAI) la zona in oggetto non è classificata nella cartografia a livello di sintesi e di dettaglio (Perimetrazione delle aree con pericolosità da fenomeni geomorfologici di versante - livello di sintesi, scala 1:25.000).

6.2. Pericolosità idraulica

Nella carta della *Pericolosità idraulica* (Regolamento Urbanistico Comunale - Tavola GI 03 del giugno 2010) l'area di intervento immediatamente adiacente al Fiume Bisenzio ricade in classe di pericolosità idraulica elevata I.3; la suddetta tavola individua inoltre l'intera area di cui si tratta nella presente relazione tra quelle oggetto di opere idrauliche, in particolare la cassa di espansione di tipo A // Casone.

In riferimento al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), adottato dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale nella seduta di Comitato Istituzionale Integrato n. 231 del 17 dicembre 2015 ed entrato in vigore in data 1 gennaio 2016, che rappresenta il riferimento in materia di pericolosità e rischio di alluvioni, l'area risulta caratterizzata dalla classe di pericolosità idraulica P3 (stralcio n. 264 del marzo 2016). Per quanto riguarda il rischio di alluvione (stralcio n. 264 del marzo 2016) l'area Il Piano ricade in un'area classificata in classe R2.

6.2.1. L.R. 41/2018

In data 30 settembre 2018 è entrata in vigore la Legge Regionale 24 luglio 2018 n. 41 avente come oggetto *Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni). Modifiche alla l.r. 80/2015 e alla l.r. 65/2014* (pubblicata sul Bollettino Ufficiale della Regione Toscana n. 33 del 1

agosto scorso) che costituisce la nuova norma di riferimento per le aree a rischio alluvioni. Con tale legge *"la Regione, al fine di ridurre le conseguenze negative, derivanti dalle alluvioni, per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche, nonché al fine di mitigare i fenomeni di esondazione e dissesto idrogeologico, disciplina la gestione del rischio di alluvioni in relazione alle trasformazioni del territorio e la tutela dei corsi d'acqua"* (art. 1, comma 1 della legge suddetta).

L'art. 18 della L.R. 41/2018 fornisce le disposizioni transitorie per la classificazione delle nuove classi di pericolosità: le aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti corrispondono alle aree classificate dai piani strutturali, dai piani regolatori, dai piani di assetto idrogeologico come aree a pericolosità molto elevata mentre le aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti corrispondono alle aree a pericolosità idraulica elevata.

6.3. Pericolosità sismica

La carta della *Pericolosità sismica ZMPSL* (Regolamento Urbanistico Comunale - Tavola GI 02 del giugno 2010) è stata redatta solo per i centri abitati pertanto la zona in esame non risulta classificata da un punto di vista sismico.

7. Classi di fattibilità

Nella *Relazione geologico-tecnica di fattibilità (ai sensi del DPGR 26/R/2007)* a supporto del Regolamento Urbanistico Comunale, sono presenti due tabelle, una per la fattibilità degli interventi di trasformazione (tabella 2) e una, non di interesse per la presente relazione, relativa alla fattibilità degli interventi sul patrimonio edilizio esistente.

7.1. Fattibilità geologica

Vista la classe di pericolosità geologica bassa – G1 (§ 6.1), riferendosi ai concetti generali esposti nella normativa attualmente vigente le fattibilità assegnate agli interventi in progetto, sono riportate nella tabella 3 seguente. L'art. 32 delle Norme Tecniche di Attuazione del Regolamento Urbanistico Comunale, non detta prescrizioni per la classe di fattibilità FG1 mentre per la classe di fattibilità FG1 recita: *si prescrivono a livello edificatorio indagini geognostiche commisurate all'entità dell'intervento.*

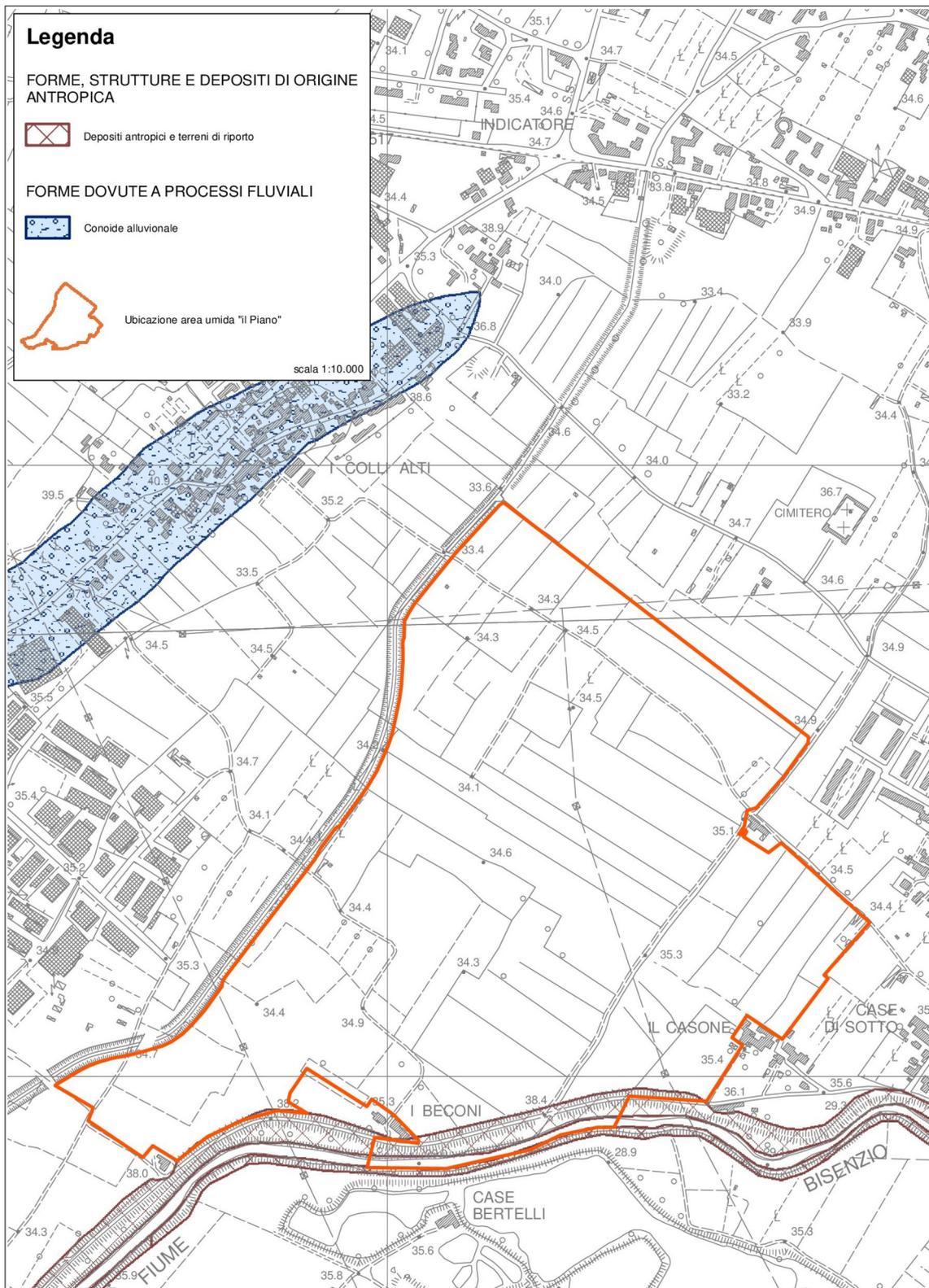


Figura 5 - Carta geomorfologica in scala 1:10.000

Si rimanda pertanto alle indicazioni contenute nel presente documento sottolineando che esso è basato su dati ottenuti da indagini geognostiche eseguite nell'area di intervento.

Pericolosità	Opera in progetto	Fattibilità
G1 - bassa	Lago	FG1 senza particolari limitazioni
	Argini, terrapieno, opere di presa, Centro Visite	FG2 con normali vincoli

Tabella 3 - Classi di fattibilità geologica.

7.2. Fattibilità idraulica

Viste le tipologie di intervento previste e vista la classe di pericolosità idraulica elevata I.3 (§ 6.2) si ritiene di attribuire una classe di fattibilità idraulica condizionata FI3 a tutte le opere da realizzare. In merito alle prescrizioni di cui all'art. 32 si vedano gli altri elaborati progettuali.

7.3. Fattibilità sismica

Per quanto riguarda infine la fattibilità sismica, seppur l'area non sia classificata, sono state eseguite apposite indagini sismiche.

8. Risultati delle indagini eseguite

8.1. 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 Aeroporto Engineering S.r.l., nella prima fase (2015) della *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci e nella *Campagna di indagini geognostiche integrative nell'area di compensazione ecologica e idraulica "Il Piano"* di febbraio 2018. Di seguito si elencano nel dettaglio le indagini geognostiche realizzate per lo studio delle caratteristiche litologiche, stratigrafiche e meccaniche dei terreni presenti nell'area di progetto, (ubicate come mostrato nella figura 6).

- Per le opere di presa in adiacenza al Fiume Bisenzio, per il rilevato e il Centro visite:
 - n. 2 (due) prove penetrometriche statiche denominate CPT63 e CPT64, che hanno raggiunto una profondità di 8,60 m dal p.c., eseguite dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca;

- n. 1 (una) prova penetrometrica statica con piezocono denominata CPTU26, che ha raggiunto una profondità di circa 15,00 m dal p.c., eseguita dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S82, avente una profondità di 10,0 m dal p.c.;
- n. 2 (due) sondaggi a carotaggio continuo denominati S124 e S125, aventi una profondità di 20,0 m dal p.c.;
- esecuzione di Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite nei sondaggi, come riassunto nella tabella 4;
- prelievo di campioni indisturbati con fustella di tipo Shelby dai sondaggi realizzati, alle profondità indicate 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
	3	9,00 ÷ 9,45	26,871 ÷ 26,421	10	11	13	24
S124	1	2,50 ÷ 2,95	36,32 ÷ 35,87	5	6	6	12
	2	5,50 ÷ 5,95	33,32 ÷ 32,87	5	8	14	22
	3	16,50 ÷ 16,95	22,32 ÷ 21,87	7	9	11	20
S125	1	1,50 ÷ 1,95	36,99 ÷ 36,54	3	4	4	8
	2	8,50 ÷ 8,95	29,99 ÷ 29,54	8	8	12	20
	3	18,00 ÷ 18,45	20,49 ÷ 20,04	9	10	13	23

Tabella 4 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi. lungo il Fiume Bisenzio.

- sui campioni suddetti sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Elletipi S.r.l. di Ferrara che sono descritte nel § 8.5;
- esecuzione di n. 1 (una) indagine geofisica di superficie mediante metodologia di tipo Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) denominata MASW12, associata ad una misura di sismica passiva Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr), realizzate dalla società Geosol s.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena);

- esecuzione di n. 3 (tre) stendimenti di tomografia elettrica denominati GEOEL01÷03 eseguiti dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca;

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
S124	CI1	1,00 ÷ 1,50	37,82 ÷ 37,32
	CI2	4,00 ÷ 4,50	34,82 ÷ 34,32
	CI2	10,00 ÷ 10,50	28,82 ÷ 28,32
S125	CI1	2,50 ÷ 3,00	35,99 ÷ 35,49
	CI2	4,50 ÷ 5,00	33,99 ÷ 33,49
	CI3	12,00 ÷ 12,50	26,49 ÷ 25,99

Tabella 5 - Campioni indisturbati prelevati dai sondaggi lungo il Fiume Bisenzio.

- Per la realizzazione degli argini perimetrali:
 - n. 9 (nove) pozzetti geognostici con escavatore meccanico denominati PG308÷PG316 aventi una profondità di 1,40 m dal p.c.;
 - prelievo di n. 2 (due) campioni rimaneggiati da ciascuno dei pozzetti sui quali sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Elletipi S.r.l. di Ferrara che sono descritte nel § 8.5;
 - n. 8 (otto) prove penetrometriche statiche denominate CPT65÷CPT72, che hanno raggiunto profondità comprese tra 8,40 e 12,60 m dal p.c., eseguite dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca;
 - n. 4 (quattro) prove penetrometriche statiche con piezocono denominate CPTU27÷CPTU30, che hanno raggiunto una profondità di circa 15,00 m dal p.c., eseguite dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca;

- n. 2 (due) sondaggi a carotaggio continuo denominati S127 e S129, aventi una profondità di 15,0 m dal p.c.;
- n. 2 (due) sondaggi a carotaggio continuo denominati S126 e S128, aventi una profondità di 15,0 m dal p.c.; attrezzati a piezometro;
- esecuzione di Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite nei sondaggi, come riassunto nella tabella 6;
- prelievo di campioni indisturbati con fustella di tipo Shelby dai sondaggi realizzati, alle profondità indicate nella tabella 7;
- sui campioni suddetti sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Elletipi S.r.l. di Ferrara che sono descritte nel § 8.5

Sigla sondaggio	S.P.T.	Profondità [m da p.c.]	Profondità [m s.l.m.]	N1	N2	N3	N _{SPT}
S126	1	4,50 ÷ 4,95	30,69 ÷ 30,24	5	7	9	16
	2	7,00 ÷ 7,45	27,69 ÷ 27,24	3	5	5	10
S127	1	4,50 ÷ 4,95	30,22 ÷ 29,77	3	5	6	11
	2	7,00 ÷ 7,45	27,22 ÷ 26,77	4	5	6	11
S128	1	4,50 ÷ 4,95	29,89 ÷ 29,44	4	5	7	12
	2	7,00 ÷ 7,45	26,89 ÷ 26,44	3	5	6	11
S129	1	4,50 ÷ 4,95	30,52 ÷ 30,07	4	5	7	12
	2	7,00 ÷ 7,45	27,52 ÷ 27,07	3	5	6	11

Tabella 6 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi.

- esecuzione di n. 3 (tre) indagini geofisiche di superficie mediante metodologia di tipo Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) denominate MASW13÷MASW15, associate a una misura di sismica passiva Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR), realizzate dalla società Bierregi S.r.l. di Lucca.

Infine su tutta l'area sono stato realizzati n. 60 (sessanta) pozzetti geognostici con escavatore meccanico, indicati in verde nella figura 6, aventi lo scopo di prelevare campioni da sottoporre ad analisi chimiche di supporto alla redazione del Piano di Utilizzo delle Terre (PUT).



Figura 6 - Ubicazione delle indagini geognostiche realizzate in scala 1:10.000.

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S126	CI1	4,00 ÷ 4,50	31,19 ÷ 30,69
	CI2	7,00 ÷ 7,50	28,19 ÷ 27,69
S127	CI1	4,00 ÷ 4,50	30,22 ÷ 29,72
	CI2	7,00 ÷ 7,50	27,22 ÷ 26,72
S128	CI1	4,00 ÷ 4,50	30,39 ÷ 29,89
	CI2	7,00 ÷ 7,50	27,39 ÷ 26,89
S129	CI1	4,00 ÷ 4,50	31,02 ÷ 30,52
	CI2	7,00 ÷ 7,50	28,02 ÷ 27,52

Tabella 7 - Campioni indisturbati della campagna del 2015.

L'allegato A raccoglie le stratigrafie dei sondaggi con le foto delle cassette catalogatrici, i certificati delle prove penetrometriche e i certificati delle analisi geotecniche di laboratorio. Nell'allegato B è invece riportato il rapporto finale delle indagini sismiche.

8.2. Pozzetti geognostici

I pozzetti geognostici (figura 6) sono stati eseguiti con escavatore meccanico cingolato a benna rovescia allo scopo di prelevare campioni da sottoporre ad analisi geotecniche di supporto alla progettazione degli argini (§ 8.5). I saggi hanno indagato uno spessore di 1,40 m dal p.c. incontrando, al di sotto di circa 0,5 m di terreno vegetale (argille limose con resti di apparati radicali), argille limose o argille e limi di colore marrone.

8.3. Prove penetrometriche

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 i certificati nell'allegato A):

- Prova penetrometrica statica CPT 63:
 - 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 presenza di livelli di limi e/o sabbie tra 0,6÷0,8 m dal p.c. e livelli di torbe/argille organiche a diversi intervalli di profondità (1,8÷2,0 m, 4,0÷4,8 m, 5,2÷5,4 m, 7,4÷7,6 m e da 9,4÷9,6 m dal p.c.);
 - a partire dal piano di campagna la resistenza alla punta qc cresce fino alla profondità 0,8 m dal p.c. per poi decrescere fino a 2,8 m dal p.c.; da questa profondità i valori della resistenza alla punta risalgono fino alla profondità di 7,4 m dal p.c., per poi decrescere arrivando però successivamente al rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale fs tende a crescere dal piano di campagna fino alla profondità di 7,6 m dal p.c., successivamente tendono a decrescere per raggiungere poi il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 64:
 - 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 presenza di livelli di limi e/o sabbie tra 0,2÷1,0 m dal p.c. e livelli di torbe/argille organiche a profondità varie (1,8÷2,2 m, 3,0÷3,2 m, 3,4÷3,6 m, 5,2÷5,4 m e da 8,4÷8,6 m dal p.c.);
 - a partire dal piano di campagna la resistenza alla punta qc ha valori molto alti fino alla profondità di 1,0 m da p.c.; successivamente i valori decrescono fino a 3,2 m da p.c.; da questa profondità i valori della resistenza alla punta qc risalgono fino alla profondità di 6,8 m da p.c., successivamente hanno un leggero calo fino alla profondità di rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale fs cresce dal piano di campagna fino alla profondità di 7,4 m da p.c., successivamente tende a decrescere leggermente fino alla profondità alla quale si ha il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 65:

- profondità indagata: 12,6 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 francamente sabbiosi tra 0,4÷0,6 m e 8,8÷9,0 m dal p.c., livelli di limi e/o sabbie (0,2÷0,4 m, 0,6÷0,8 m, 1,0÷1,2 m, 4,6÷4,8 m, 9,0÷9,4 m, 10,2÷10,4 m, 11,2÷11,4 m, 11,8÷12,2 m e da 12,4÷12,6 m dal p.c.) e livelli di torbe/argille organiche (2,0÷2,4 m, 3,0÷3,2 m, 3,4÷4,4 m, 5,0÷5,6 m, 6,0÷6,4 m, 7,2÷7,4 m, 7,6÷8,6 m, 10,6÷10,8 m, 11,0÷11,2 m e da 11,4÷11,6 m dal p.c.);
- a partire dal piano di campagna la qc ha valori molto alti fino alla profondità di 1,4 m dal p.c.; successivamente i valori decrescono fino a - 2,4 m dal p.c.; la resistenza alla punta qc poi risale fino a 3,0 m dal p.c., per poi decrescere fino alla profondità di 4,6 m dal p.c.; da questa profondità la qc aumenta fino a 7,0 m dal p.c., successivamente decresce fino alla profondità di 8,2 m dal p.c. dove si ha un forte incremento della resistenza alla punta (fino alla profondità di 9,2 m) per poi decrescere ancora fino a 11,6 m dal p.c.; al di sotto resistenza alla punta cresce fino a raggiungere il rifiuto strumentale.
- La resistenza laterale fs tende a crescere fino alla profondità di 1,6 m dal p.c., successivamente diminuisce fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 66:
 - 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 livelli di limi e/o sabbie tra 0,8÷1,0 m dal p.c. e livelli di torbe/argille organiche (1,6÷2,0 m, 2,6÷2,8 m, 3,4÷3,6 m, 3,8÷4,8 m, 5,0÷5,6 m, 5,8÷6,0 m e da 7,8÷8,0 m dal p.c.);
 - la resistenza alla punta ha valori molto alti per i primi 0,6 m dal p.c. e decresce poi fino alla profondità di 2,2 m dal p.c.; da tale profondità i valori della qc risalgono fino al rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale fs cresce dal piano di campagna fino a - 1,2 m; al di sotto i valori diminuiscono fino alla profondità di 2,6 m dal p.c. e, successivamente, la resistenza

laterale tende a crescere fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 67:
 - profondità indagata: 9,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la prova ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe/argille organiche a varie profondità (1,6÷2,6 m, 3,8÷4,0 m, 4,2÷5,0 m, 8,4÷8,6 m e da 8,8÷9,2 m dal p.c.);
 - a partire dal piano di campagna la qc sale fino a 1,4 m dal p.c. e successivamente i valori decrescono fino alla profondità di 2,4 m.; da questa i valori della resistenza alla punta risalgono fino alla profondità di 8,6 m dal p.c. per poi scendere leggermente fino a raggiungere il rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale tende a crescere fino alla profondità di 8,8 m dal p.c., per poi decrescere fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 68:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la prova ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe/argille organiche (1,4÷2,6 m, 2,8÷4,0 m e da 8,8÷9,0 m dal p.c.) e un livello di limi e/o sabbie alla profondità compresa tra 6,8 e 7,2 m dal p.c.;
 - a partire dal piano di campagna la qc aumenta per i primi 0,8 m dal p.c., al di sotto i valori decrescono fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. e, fino a 4,2 m da p.c. ,rimangono piuttosto costanti; da - 4,2 m dal p.c. la resistenza alla punta risale fino alla profondità di 8,6 m dal p.c. per poi scendere leggermente fino alla profondità di rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale cresce dal piano di campagna fino alla profondità di 2,8 m dal p.c.; con i valori di fs oscillano poi leggermente fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 69:
 - profondità indagata: 8,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la CPT ha incontrato argille e/o limi con presenza di livelli di

torbe/argille organiche (1,4÷1,8 m, 2,0÷3,0 m e da 3,2÷3,8 m dal p.c), un livello di limi e/o sabbie alla profondità compresa tra 7,8 e 8,0 m da p.c. e un livello iniziale di sabbie e/o ghiaie tra 0,2 e 0,4 m da p.c.;

- a partire dal piano di campagna la qc sale fino a - 1,0 m da p.c.; successivamente i valori decrescono fino alla profondità di 3,2 m da p.c. per poi crescere fino a raggiungere il rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale cresce fino alla profondità di 2,6 m dal p.c., con valori che oscillano leggermente fino a 8,0 m dal p.c. per poi crescere raggiungendo il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 70:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la prova ha incontrato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe/argille organiche (1,4÷2,6 m, 3,2÷4,0 m, 4,2÷4,6 m, 4,8÷5,4 m, 5,6÷6,0 m e da 8,6÷8,8 m dal p.c) e un livello di limi e/o sabbie tra 0,2 e 0,6 m dal p.c.;
 - a partire dal piano di campagna la qc sale per i 0,6 m iniziali, diminuendo poi fino alla profondità di 2,4 m dal p.c.; successivamente si ha un nuovo aumento e, da 6,2 m fino a 8,0 m dal p.c., la resistenza alla punta decresce leggermente per poi risalire fino alla profondità di rifiuto strumentale;
 - la fs cresce dal piano di campagna fino a 1,6 m dal p.c., successivamente i valori di resistenza laterale oscillano leggermente fino alla profondità di rifiuto strumentale.
 - Prova penetrometrica statica CPT 71:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la verticale ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe/argille organiche alle profondità di 2,0÷3,0 m e da 3,4÷3,6 m dal p.c e livelli di limi e/o sabbie a varie profondità (0,4÷0,6 m, 0,6÷0,8 m, 5,8÷6,0 m e da 8,0÷8,2 m dal p.c);
 - a partire dal piano di campagna la resistenza alla punta qc cresce fino alla profondità 0,6 m dal p.c.; successivamente i valori decrescono fino a 2,4 m dal p.c.; da tale

- profondità la qc risale (fino a - 6,2 m dal p.c.) per poi mostrare un leggero calo fino alla profondità di 8,0 m dal p.c.; successivamente i valori crescono raggiungendo il rifiuto;
- la resistenza laterale cresce dal piano di campagna fino alla profondità di 1,6 m dal p.c.; successivamente i valori tendono a decrescere fino a 4,2 m dal p.c. per poi oscillare leggermente fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 72:
 - profondità indagata: 9,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann, integrata con quella di Schmertmann, la CPT ha incontrato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2÷0,4 m, 0,6÷0,8 m e da 5,4÷5,8 m dal p.c) e livelli di torbe/argille organiche (2,4÷3,2 m, 3,6÷4,4 da 7,6÷7,8 m dal p.c);
 - la qc cresce dal p.c. fino a 1,4 m e. successivamente mostra un decremento fino alla profondità di 4,2 m dal p.c.; da tale profondità i valori della resistenza alla punta risalgono fino alla profondità di 5,8 m dal p.c., per poi decrescere fino a 8,0 m dal p.c.; infine si osserva un aumento fino alla profondità di rifiuto strumentale;
 - la resistenza laterale fs cresce fino alla profondità di 3,0 m dal p.c.; successivamente i valori tendono a decrescere fino a 5,8 m dal p.c. per poi risalire e restare pressoché costanti fino al rifiuto strumentale.

Tenendo conto delle principali suddivisioni individuabili sulle verticali delle prove penetrometriche secondo le interpretazioni litologiche di riferimento, i parametri geotecnici forniti dalla ditta esecutrice (allegato A), sono stati elaborati statisticamente sulla base del 5° percentile della distribuzione dei dati per il calcolo del valore caratteristico (si veda il § 10.2.1) ottenendo i risultati riportati nella tabella 8.

Sigla	Valore caratteristico k	Natura coesiva		Natura granulare	
		c _u [kPa]	Mo [kPa]	f* [°]	Mo [kPa]
CPT63	da 0,20 a 1,60 m da p.c.	77,91	7.355	27,05	7.943
	da 1,60 a 3,60 m da p.c.	45,08	4.271	26,00	3.530
	da 3,60 a 6,00 m da p.c.	82,59	8.385	27,68	8.385
	Da 6,00 a 8,00 m da p.c.	96,34	10.150	28,21	10.150

Sigla	Valore caratteristico k	Natura coesiva		Natura granulare	
		c _u [kPa]	Mo [kPa]	f* [°]	Mo [kPa]
CPT64	da 0,20 a 1,60 m da p.c.	76,16	7.355	27,05	7.943
	da 1,60 a 4,00 m da p.c.	55,03	4.903	27,00	5.884
	da 4,00 a 5,60 m da p.c.	91,83	8.826	28,04	8.826
	da 5,60 a 8,60 m da p.c.	108,28	11.768	28,85	11.768
CPT65	da 0,20 a 4,00 m da p.c.	67,34	12.356	28,04	13.533
	da 4,00 a 4,80 m da p.c.	67,21	5.605	27,00	5.443
	da 4,80 a 5,80 m da p.c.	87,01	7.649	27,54	7.649
	da 5,80 a 8,60 m da p.c.	74,70	8.679	27,22	8.679
CPT66	da 0,20 a 1,60 m da p.c.	78,48	11.180	28,10	12.356
	da 1,60 a 3,60 m da p.c.	62,06	5.593	26,59	6.178
	da 3,60 a 6,20 m da p.c.	85,18	7.355	28,00	7.355
	da 6,20 m a 8,40 m da p.c.	83,77	10.591	28,28	9.709
CPT67	da 0,20 a 1,80 m da p.c.	67,90	8.532	27,70	8.679
	da 1,80 a 3,40 m da p.c.	69,95	5.940	27,04	6.767
	da 3,40 a 6,80 m da p.c.	83,73	7.649	27,59	7.649
	da 6,80 a 9,40 m da p.c.	90,76	9.709	28,28	9.709
CPT68	da 0,20 a 1,60 m da p.c.	49,54	10.444	27,37	12.651
	da 1,60 a 4,60 m da p.c.	66,95	5.702	26,59	6.178
	da 4,60 a 7,40 m da p.c.	88,12	8	27,57	7.943
	da 7,40 a 9,00 m da p.c.	89,88	9.856	28,18	9.856
CPT69	da 0,20 a 2,60 m da p.c.	89,75	12.651	28,47	12.651
	da 2,60 a 4,20 m da p.c.	63,70	5.605	28,00	7.061
	da 4,20 a 6,20 m da p.c.	86,38	8.679	27,81	8.679
	da 6,20 a 8,40 m da p.c.	68,70	10.003	28,03	10.003
CPT70	da 0,20 a 1,60 m da p.c.	77,20	13.533	28,88	15.004
	da 1,60 a 4,20 m da p.c.	71,78	5.884	26,54	6.178
	da 4,20 a 5,80 m da p.c.	82,52	8.385	27,68	8.385

Sigla	Valore caratteristico k	Natura coesiva		Natura granulare	
		c _u [kPa]	Mo [kPa]	f* [°]	Mo [kPa]
	da 5,80 a 9,60 m da p.c.	85,54	8.532	27,61	8.532
CPT71	da 0,20 a 2,60 m da p.c.	71,16	15.151	27,99	17.946
	da 2,60 a 3,80 m da p.c.	66,69	5.940	26,89	6.472
	da 3,80 a 5,20 m da p.c.	80,43	7.061	27,28	7.061
	da 5,20 a 9,00 m da p.c.	88,62	10.003	27,99	10.297
CPT72	da 0,20 a 1,40 m da p.c.	165,57	19.858	31,14	19.711
	da 1,40 a 2,80 m da p.c.	91,86	11.180	28,29	11.180
	da 2,80 a 5,00 m da p.c.	78,12	7.355	27,57	7.355
	da 5,00 a 8,60 m da p.c.	97,97	10.003	28,54	10.003

Tabella 8 - Elaborazione statistica prove penetrometriche.

* Secondo la correlazione di Meyerhof.

8.3.1. Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

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 la profondità di 15 m dal p.c., tranne la CPTU30 che si è interrotta a 11,35 m dal p.c. (rifiuto strumentale). Di seguito si descrivono le prove eseguite (si vedano i certificati nell'allegato A):

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 26:
 - Profondità indagata: 15,05 m dal p.c.;
 - dal piano di campagna fino alla profondità di 1,40 m la resistenza alla punta (qc) cresce fino ad arrivare ad un valore pari a 6,44 MPa, corrispondenti a sabbie e limi sabbiosi e argille e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010); successivamente la resistenza alla punta decresce fino alla profondità di 8,56 m dal p.c. dove raggiunge 1,56 MPa; da questa

- profondità fino a fondo infissione i valori della q_c oscillano tra 2,99 MPa e 3,37 MPa; tra a profondità di 13,00 m e 13,70 m dal p.c. si hanno valori più alti della resistenza alla punta per la presenza di livelli più compatti; i terreni attraversati dalla prova penetrometrica corrispondono ad argille e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010);
- la resistenza laterale (f_s) dal p.c. cresce fino a 7,40 m dal p.c. raggiungendo valori di 300 kPa per poi decrescere fino alla profondità di 12,60 m dal p.c. dove si raggiungono 235 kPa; successivamente si ha una nuova diminuzione il restante spessore indagato;
 - la pressione neutra presenta valori negativi per quasi tutta la colonna investigata, solo alle profondità comprese tra 5,70 e 6,00 m, 6,20 e 6,30 m e tra 6,70 e 8,50 m dal p.c. i valori risultano superiori a 0 kPa (raggiungendo anche 26,07 kPa).
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 27:
 - Profondità indagata: 15,04 m dal p.c.;
 - dal piano di campagna fino a 9,50 m dal p.c. la q_c rimane costante su valori compresi tra 0,98 e 3,36 MPa, corrispondenti ad argille e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010); successivamente la resistenza alla punta cresce sensibilmente tra 9,26 m e 10,88 m dal p.c. (valori compresi tra 5,53 e 45,86 MPa, corrispondenti a litologie sabbiose e limi sabbiosi - SBT, Robertson, 2010); da 10,88 m dal p.c. fino al termine della prova la resistenza alla punta (q_c) si stabilizza su valori bassi oscillando tra 0,70 e 12,03 MPa, corrispondenti a litologie argillose e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010);
 - i valori di f_s dal piano di campagna crescono fino alla profondità di 7,10 m dal p.c. raggiungendo i 197,59 kPa; successivamente la resistenza laterale decresce fino a - 9,16 m dal p.c. dove raggiunge 1,52 kPa; da questa profondità fino a 11,30 m dal p.c. f_s varia molto (valori compresi tra 25,78 e 250 kPa) e successivamente sale fino a raggiungere 428,00 kPa a 13,10 m dal p.c.; da tale profondità fino a fondo infissione la resistenza laterale decresce;
 - la pressione neutra (si mostra costante su valori compresi tra 0 e 80,00 kPa fino alla profondità di 8,20 m dal p.c., successivamente il parametro u decresce fino a 11,80 m dal p.c. raggiungendo valori negativi; dalla profondità di 11,8 m dal p.c. la pressione neutra (u) cresce fino a 13,00 m dal p.c. dove raggiunge i 750,00 kPa; al di sotto si registra un forte calo (valori prossimi a 0 kPa alla profondità di 13,00 m dal p.c.); dalla

profondità di 13,00 m dal p.c. fino a fondo infissione si ha un aumento della pressione interstiziale che raggiunge un valore pari a 680 kPa.

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 28:
 - Profondità indagata: 15,01 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta aumenta per i primi 0,83 m ($q_c=8,84$ Mpa) per poi decrescere fino alla profondità di 3,70 m dal p.c. dove raggiunge 1,30 Mpa; le litologie presenti sono argille, argille limose, limi sabbiosi e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010); nell'intervallo compreso tra 3,70 m e 7,93 m dal p.c., i valori di q_c rimangono costanti, oscillando tra 1,00 e 2,09 MPa, successivamente la resistenza alla punta aumenta fino al termine della prova, in questo intervallo di profondità si hanno oscillazioni dei valori di resistenza alla punta, in prossimità di livelli più compatti o che presentano litologie differenti, che talora possono arrivare anche a 10,87 MPa; nell'intervallo di profondità compreso tra 7,93 m a 15,01 m le litologie presenti sono argille, argille limose, limi sabbiosi e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010);
 - la resistenza laterale (f_s) dal piano di campagna cresce fino a 1,58 m dal p.c. dove raggiunge i 385,96 kPa, successivamente decresce fino alla profondità di 3,70 m dal p.c. dove raggiunge 1,3 kPa; dalla profondità 3,70 m dal p.c. la resistenza laterale (f_s) cresce fino alla profondità di 9,06 m dal p.c. dove raggiunge i 347.59 kPa per poi decrescere fino alla profondità di 13,60 m dal p.c. dove raggiunge i 25,42 kPa; dalla profondità di 13,60 m dal p.c. la resistenza laterale (f_s) cresce fino alla profondità di 14,44 m dal p.c. dove raggiunge i 359.18 kPa per poi decrescere fino a fondo infissione;
 - la pressione neutra (u) rimane su valori bassi e prossimo allo zero fino alla profondità di 9,0 m dal p.c, oscillando tra -12,25 e 37,09 kPa, dove decresce e si attesta su valori negativi fino al termine della prova.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 29:
 - Profondità indagata: 15,16 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta (q_c) cresce dal piano di campagna fino alla profondità di 1,03 m dal p.c. dove raggiunge 6,26 Mpa; successivamente decresce fino a 3,64 m dal p.c. ($q_c= 0,82$ Mpa); le litologie presenti sono argille, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010); da questa la resistenza alla punta tende ad aumentare

fino a fondo infissione; in questo intervallo di profondità sono presenti oscillazioni che portano anche a valori molto alti, fino a 488.50 MPa, dovuti alla presenza di argille, argille limose, limi argillosi, più compatti e la presenza di sabbie e limi sabbiosi (SBT, Robertson, 2010);

- il parametro f_s cresce fino alla profondità di 1,71 m dal p.c. dove raggiunge i 308,8 kPa, successivamente diminuisce fino a 3,51 m dal p.c. dove raggiunge i 90,26 kPa; da tale profondità la resistenza laterale varia tra 41,62 e 189,74 kPa fino a 9,00 m dal p.c.; al di sotto, fino a 15,16 m dal p.c., la resistenza laterale (f_s) mostra notevole variabilità per la presenza di livelli a differente grado di compattazione e/o differente litologia;
- la pressione neutra (u) dal piano di campagna fino a - 11,3 m dal p.c. ha valori prossimi a 0 kPa; al di sotto cresce molto fino a fondo infissione raggiungendo anche valori superiori a 1.143 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 30:
 - Profondità indagata: 11,35 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta (q_c) dal p.c. oscilla su valori compresi tra 1,04 e 3,1 MPa, successivamente i valori aumentano fino a raggiungere il rifiuto strumentale ($q_c = 5,84$ Mpa); le litologie presenti sono argille, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010);
 - la resistenza laterale (f_s) dal piano di campagna cresce fino alla profondità di 6,39 m dal p.c., dove raggiunge 226,57 kPa, e successivamente decresce fino alla profondità di 10,40 m dal p.c. dove raggiunge 35,68 kPa; dalla profondità di 10,40 m dal p.c. la resistenza alla punta cresce fino a 10,68 m dal p.c. raggiungendo un valore di 201,52 kPa per poi decrescere fino alla profondità del rifiuto strumentale;
 - la pressione neutra (u) dal piano di campagna cresce fino alla profondità di 2,90 m dal p.c. dove raggiunge un valore di 135,93 kPa, successivamente decresce fino alla profondità 5,82 m dal p.c. dove si hanno valori negativi; dalla profondità di 5,82 m dal p.c. la pressione neutra cresce fino a 10,51 m dal p.c. dove raggiunge un valore di 43,91 kPa per poi decrescere fino alla profondità del rifiuto strumentale dove mostra valori negativi.

I risultati delle CPTU sono stati confrontati con quelli delle CPT ai fini della definizione

del modello geologico e geotecnico.

8.4. Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti con una sonda perforatrice cingolata; la stratigrafia e le fotografie delle cassette contenenti le carote sono riportate nell'allegato A. Come si osserva, in corrispondenza del piano di campagna (senza considerare il rilevato arginale attraversato con i sondaggi S124 e S125), al di sotto di terreno rimaneggiato (assente in S82), si incontrano per la maggior parte terreni coesivi quali limo sabbioso e argilloso e argilla spesso compatta e consistente. All'interno di tali materiali, a profondità e spessori variabili, si possono incontrare strati di sabbia con livelli di ghiaia (a 12,80 m dal p.c. in S124, dal 17,10 m dal p.c. in S125), o sabbia mista a ghiaia (a 15,50 m dal p.c. in S124, a 7,00 e 10,90 m dal p.c. in S126, a 13,60 in S129).

8.4.1. Standard Penetration Test

Come detto, durante la perforazione di alcuni sondaggi sono state realizzate delle 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 9, 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 & Butler³).

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	156,57÷294,20	11.767,98÷14.121,58
S124	1	Sabbie fini debolmente limose	28,42÷34,41	7.892,39÷17.659,82
	2	Limi sabbioso-argillosi consistenti	143,52÷269,68	10.787,32÷12.944,78
	3	Sabbia e ghiaia	30,36÷37,07	10.669,64÷26.948,67

³ Valida per litotipi argillosi a media e bassa plasticità.

Sigla sondaggio	SPT	Litologia	f [°]	Eed [kPa]
S125	1	Sabbia fine debolmente limosa	26,88÷32,89	6.503,77÷13.015,39
	2	Limi sabbioso-argillosi consistenti	130,47÷245,17	9.806,65÷11.767,98
	3	Sabbia da fine a media	30,89÷37,93	11.711,10÷30.432,00
S126	1	Argille consistenti	104,38÷196,13	7.845,32÷9.414,38
	2	Sabbie debolmente limose con ghiaie	27,63÷33,67	4.903,33÷5.883,99
S127	1	Argille compatte	71,76÷134,84	5.393,66÷6.472,39
	2	Argille compatte	71,76÷134,84	5.393,66÷6.472,39
S128	1	Argille compatte	78,85÷147,10	5.883,99÷7.060,79
	2	Argille compatte	71,76÷134,84	5.393,66÷6.472,39
S129	1	Argille compatte	78,85÷147,10	5.883,99÷7.060,79
	2	Argille compatte	71,76÷134,84	5.393,66÷6.472,39

Tabella 9- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT} .

8.5. Prove geotecniche di laboratorio

8.5.1. Campioni rimaneggiati (da pozzetti geognostici)

Come detto al § 8.1 durante l'esecuzione dei saggi con escavatore meccanico sono stati prelevati in totale n. 18 (diciotto) campioni disturbati per essere successivamente inviati al laboratorio Elletipi S.r.l. di Ferrara per l'esecuzione delle prove. Su tutti i campioni prelevati 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).

I risultati delle prove sono riassunti nella tabella dell'allegato A che contiene anche i certificati del laboratorio.

8.5.2. Campioni indisturbati (da sondaggi a carotaggio continuo)

Come scritto al § 8.1 durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati dei campioni indisturbati con fustella tipo Shelby per essere successivamente inviati al laboratorio geotecnico per l'esecuzione delle prove. Su tutti i campioni prelevati

(tabella 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 nella tabella 10 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 di taglio diretto C.D.;
- 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 CU	Edometrica*	Taglio CD
S28-CI1	X			X	
S28-CI1	X			X	
S91-CI1			X	X	
S91-CI2			X	X	
S91-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	

Tabella 10 - Prove geotecniche "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati.

* compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

8.5.2.1. Interpretazione prove di laboratorio

I parametri geotecnici ottenuti dalle prove di laboratorio sono riassunti nella tabella riportata nell'Allegato A.

8.6. Indagini geofisiche

8.6.1. Prospezioni geoelettriche

Sono state eseguite n. 3 (tre) tomografie elettriche con sviluppo sulla sommità dell'attuale argine del Fiume Bisenzio finalizzate a indagare le caratteristiche del materiale che costituisce il corpo arginale al fine di valutazioni progettuali per la realizzazione delle opere di presa e per la problematica dei sifonamenti. Ogni acquisizione realizzata è costituita da 48 elettrodi con distanza pari a 3,5 m e lunghezza complessiva 164,5 m; le tre stese sono state sovrapposte per metà in modo da coprire l'intera lunghezza dell'argine da investigare, ottenendo un unico profilo geoelettrico (si veda l'allegato B). Si osserva una certa omogeneità del rilevato arginale: è possibile distinguere un elettrostrato più superficiale, avente uno spessore pari a circa 5-6 m, caratterizzato da elevata resistività (mediamente 80÷100 Ohm*m) che decresce progressivamente con la profondità, fino a individuare un secondo elettrostrato a bassa resistività che va da 6 m circa fino a mediamente 20 m dal p.c. (argine). Al di sotto di questa profondità la resistività aumenta nuovamente (elettrostrato n.3), riportandosi su valori fino a 60÷70 Ohm*m.

8.6.2. 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 quattro indagini sismiche con metodologia MASW, denominate MASW13÷MASW15 (figura 6) elaborate congiuntamente con l'indagine HVSR.

Per i dettagli operativi delle metodologie di acquisizione dei dati, si rimanda al rapporto finale nell'allegato B. 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 11 sono riportati i valori del parametro $V_{s,eq}$ ottenuti.

sigla	Intervento	$V_{s,eq}$ [m/s]
MASW12	Centro Visite e argini sud-est	300
MASW13	Argini sud-ovest	284
MASW14	Argini ovest	249
MASW15	Argini nord	246

Tabella 11 - Valori $V_{s,eq}$.

8.6.3. 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. I contrasti di impedenza eventuali possono essere correlabili ai cambi litologici presenti sia all'interno della copertura che nell'ammasso roccioso. In entrambi i casi si possono avere passaggi litologici che generano fenomeni di possibile amplificazione della sollecitazione sismica.

Nell'unica prova effettuata (HVSR12) non vi è il rispetto di tutte le condizioni del SESAME per quanto riguarda l'affidabilità del picco. La misura, ottenuta utilizzando il 92% della registrazione che è durata 20 minuti, ha rilevato un picco a 105 Hz.

9. Sismicità e definizione dei parametri sismici

9.1. 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 2012⁴, di attuazione dell'art. 117, comma 2, lettera g) della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio). Il Comune di Signa è inserito nella "zona sismica 3" (in fascia di pericolosità C, contraddistinta da $a_g \leq 0,125 g$, secondo il D.P.G.R. 19 gennaio 2022, n. 1/R, in vigore dal 20 febbraio 2022).

9.2. Parametri sismici

9.2.1. Aspetti generali

La stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido, viene definita tramite un approccio sito-dipendente. Come riportato al § 3.2 del D.M. 18 gennaio 2018 e al § C3.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019, è possibile fare riferimento all'*Allegato A* del D.M. 14 gennaio 2008 nel quale i parametri necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto vengono calcolati attraverso le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (nella *Tabella 1 - Allegato B* del medesimo decreto NTC2008 vengono forniti, per ciascuno dei 10.751 nodi della griglia che costituisce il reticolo, i valori di a_g , F_0 e T^*c , per nove valori del periodo di ritorno: 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2.475 anni).

Nel presente studio si è utilizzato il software fornito dalla ditta GeoStru che permette di calcolare gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per un generico sito del territorio nazionale. Mediante questo programma è possibile, inserendo le coordinate e le caratteristiche progettuali del sito, ottenere direttamente i parametri relativi al computo dell'azione sismica di progetto.

⁴ *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.*

9.2.2. *Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato)*

Visto il valore della velocità equivalente delle onde di taglio calcolato dall'indagine sismica (§ 8.6.2) al sito in oggetto 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).

9.2.3. *Categoria topografica*

In considerazione dell'ubicazione dell'area di progetto, 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, al sito di intervento 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).

9.2.4. *Parametri dell'azione sismica locale*

Come detto, per ricavare i valori dei parametri dell'azione sismica locale per l'area di progetto, si è utilizzato il programma fornito dalla ditta GeoStru assegnando al sito le coordinate geografiche (WGS84) pari a 43,79272 e 11,11601 long (relative al Centro Visite). Per determinare gli spettri di risposta elastici del sito, tenuto conto degli effetti locali dovuti all'amplificazione sia stratigrafica che topografica, devono essere assegnati i seguenti parametri (forniti dal progettista):

- vita nominale della struttura (V_N) 50 anni (Opere ordinarie);
- classe d'uso pari a classe II strutture con normali affollamenti;
- coefficiente d'uso (C_U) pari a 1,0;
- vita o periodo di riferimento per l'azione sismica ($V_R = V_N * C_U$) pari a 50 anni.

Il report riassuntivo dei parametri sismici determinati con il software GeoStru costituisce l'allegato C.

10. Modellazione geologica e geotecnica

10.1. Modello geologico del sottosuolo

Viene di seguito definito un modello geologico distinto per la porzione dell'area interessata dagli interventi principali (opere di presa, rilevato, centro visite) e per l'area sulla quale insisteranno gli argini perimetrali.

10.1.1. Opere di presa, rilevato e centro visite in progetto

Il sottosuolo dell'area in oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in quattro strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT) e la geoelettrica. Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- strato 0 (argine): limo sabbioso argilloso;
- strato A, da 0,00 a 1,60÷2,00 dal p.c.: limo argilloso da debolmente sabbioso a sabbioso e, subordinatamente, limo con argilla debolmente sabbioso;
- strato B, da 1,60÷2,00 a 3,60÷4,00 dal p.c.: limo argilloso debolmente sabbioso;
- strato C, da 3,60÷4,00 a 5,60÷6,60 dal p.c.: limo con argilla sabbioso;
- strato D, da 5,60÷6,60 a 12,50÷12,80 dal p.c.: limo argilloso sabbioso e limo con argilla debolmente ghiaioso.

Al di sotto (sondaggi S124 e S125) si incontra sabbia da fine a media con sottili livelli di ghiaie passante a sabbia e ghiaia o sabbia grossolana alternata a ghiaia media-grossolana.

Nella figura 10 è mostrata una sezione litotecnica rappresentativa del modello geologico e geotecnico dell'area lungo gli argini del Fiume Bisenzio nella quale sono riportate le verticali di indagine di interesse per gli interventi previsti in questa porzione oggetto della presente relazione. Le colonne litotecniche sono state disegnate come di seguito esposto:

- per i sondaggi derivano dalle risultanze delle analisi granulometriche e, in assenza di campioni, dalla descrizione di campagna riportata sulle schede della ditta esecutrice;
- per le prove penetrometriche CPT sono state ottenute sulla base delle diverse caratteristiche geomeccaniche.

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

10.1.2. Argini da realizzare

Il sottosuolo dell'area interessata dalla realizzazione degli argini oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in quattro strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT), in funzione delle quali sono stati individuati gli spessori distinti per singole "aree omogenee" (tabella 12 e figura 7).

Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- strato A: limo argilloso da debolmente sabbioso a sabbioso e, subordinatamente, limo con argilla debolmente sabbioso;
- strato B: limo argilloso debolmente sabbioso;
- strato C: argilla con limo e limo con argilla da debolmente sabbioso a sabbioso (o debolmente ghiaioso);
- strato D: limo con argilla, prevalentemente ghiaioso o debolmente ghiaioso e subordinatamente argilla con limo debolmente sabbiosa (settore nord) e sabbia con limo argillosa debolmente ghiaiosa (settore sud-ovest).

10.2. Modello geotecnico

Anche nel caso della modellazione geotecnica viene distinta l'area di progetto delle opere di presa, rilevato e centro visite e quella interessata dalla realizzazione degli argini; nei paragrafi seguenti si riportano pertanto i valori caratteristici dei parametri geotecnici per le due zone suddette.⁵

⁵ Per quanto riguarda il modulo edometrico il valore caratteristico riportato nelle tabelle del § 10.2.1 è rappresentativo del singolo strato individuato per il modello geologico e geotecnico. Sarà cura del progettista geotecnico attribuire eventuali ulteriori valori del modulo edometrico a strati di spessore inferiore per il calcolo dei cedimenti.

strato	da [m s.l.m.]	a [m da p.c.]	strato	da [m s.l.m.]	a [m da p.c.]
Settore 1 (CPT64, CPTU27, CPT65, S126, CPT66)			Settore 2 (CPT66, CPT67, S127, CPTU28)		
A	0,20	1,60÷4,00	A	0,20	1,60÷1,80
B	1,60÷4,00	3,60÷4,80	B	1,60÷1,80	3,40÷3,60
C	3,60÷4,80	5,60÷6,20	C	3,40÷3,60	6,20÷6,80
D	5,60÷6,20	8,40÷8,60	D	6,20÷6,80	8,40÷9,40
Settore 3 (CPTU28, CPT68, CPT69)			Settore 4 (CPT69, S128, CPTU29, CPT70, CPT71)		
A	0,20	1,60÷2,60	A	0,20	1,60÷2,60
B	1,60÷2,60	4,20÷4,60	B	1,60÷2,60	3,80÷4,20
C	4,20÷4,60	6,20÷7,40	C	3,80÷4,20	5,20÷6,20
D	6,20÷7,40	8,40÷9,00	D	5,20÷6,20	8,40÷9,60
Settore 5 (CPT71, S129, CPTU30, CPT72, CPT63)			Settore 6 (CPT63, S124, CPTU26, S82, S125, CPT64)		
A	0,20	1,60÷2,60	A	0,00	1,60÷2,00
B	1,60÷2,60	2,80÷3,80	B	1,60÷2,00	3,60÷4,00
C	2,80÷3,80	5,00÷6,00	C	3,60÷4,00	5,60÷6,60
D	5,20÷6,20	8,00÷9,00	D	5,60÷6,60	12,00÷14,00

Tabella 12 - Spessori degli strati nelle "aree omogenee" individuate.

10.2.1. Valori caratteristici dei parametri geotecnici

10.2.1.1. Aspetti generali

Secondo l'EuroCodice 7 (EC7), il valore caratteristico è il *valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento*, per una serie teoricamente illimitata di valori. Significa, quindi, che solo una percentuale di valori, pari alla probabilità prefissata, risulterà inferiore al valore caratteristico. Con riferimento all'EC7, il valore *soglia* di probabilità di non superamento è il 5% (5° percentile o frattile). Nelle NTC 2018 per valore caratteristico di un parametro s'intende *una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato* (§ 6.2.2. del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019).

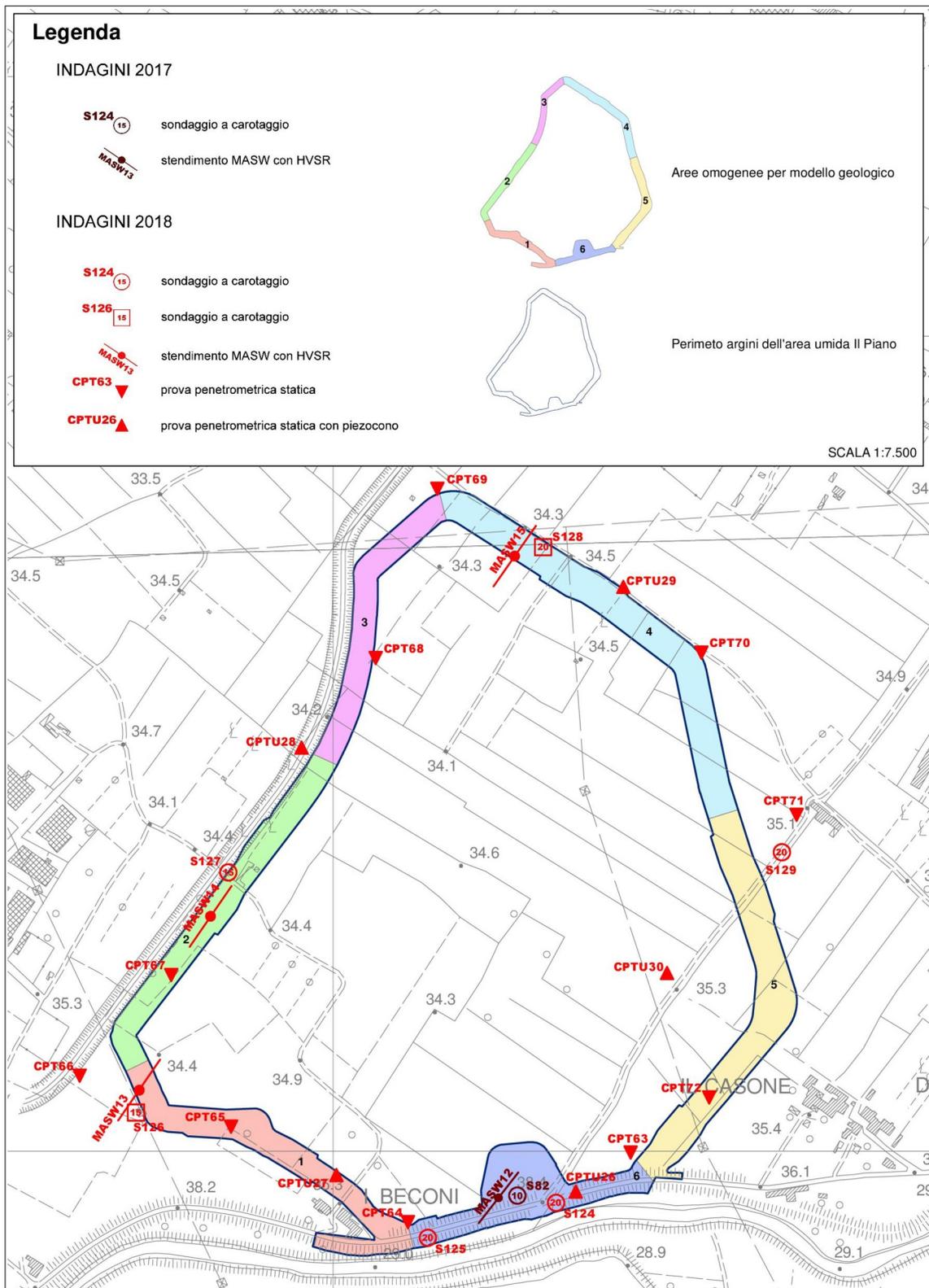


Figura 7 - Aree omogenee per il modello geologico (scala 1:7.500).

Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire a una scelta corretta dei valori caratteristici appare giustificato, secondo la Circolare, il riferimento a valori prossimi ai *valori medi* quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (come nel caso di fondazioni superficiali, fondazioni su pali relativamente alla resistenza laterale, verifiche di stabilità, opere di contenimento, di scatolari, di paramenti in terre rinforzate associati a rilevati stradali), mentre valori prossimi ai *valori minimi* dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno (come nel caso di fondazioni su pali relativamente alla resistenza di punta).

Per il progetto in questione, per il quale si possono prevedere compensazioni sia stratigrafiche che strutturali, le NTC indicano l'assunzione, come già accennato, di valori caratteristici prossimi al *valore medio* dei parametri geotecnici (unica deroga a questa assunzione è data dall'adozione di valori caratteristici prossimi ai *minimi* (riferimento al valore del 5° percentile) dei parametri geotecnici per quelle condizioni di rottura localizzata).

10.2.1.2. Opere di presa, rilevato e centro visite in progetto

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 10.1.1, in funzione delle opere in progetto e dei relativi volumi significativi, si riportano nella tabella 13 i valori caratteristici dei parametri geotecnici per la porzione in lungo gli argini del Fiume Bisenzio (indagini di riferimento: CPT63, CPT64, CPTU26 S82, S124, S125):

da [m p.c.]	a [m p.c.]	strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	g [kN/m ³]	Ed [kPa]
		0	3,42	31,78	42,99	19,10	5.070
0,00	1,60÷2,00	A	4,82	23,89	76,16	19,27	5.090
1,60÷2,00	3,60÷4,00	B	5,4	25,29	45,08	18,50	4.271
3,60÷4,00	5,60÷6,60	C	10,8	27,68	45,20	18,70	5.814
5,60÷6,60	12,00÷14,00	D	2,42	24,93	96,34	19,25	4.550

Tabella 13 - Valori caratteristici per l'area di intervento (lato Bisenzio).

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati così ottenuti:

- peso di volume g, dalla media dei risultati della prova di laboratorio eseguita sui campioni indisturbati;

- angolo di attrito interno f , coesione drenata c' e resistenza non drenata c_u dello strato 0 dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- coesione drenata c' degli strati A, B e D dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove triassiali;
- coesione drenata c' e resistenza non drenata c_u dello strato C dalle prove di laboratorio sul campione S82-C1;
- angolo di attrito interno f degli strati A, B, e D dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- angolo di attrito interno f dello strato C dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove penetrometriche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove di laboratorio;
- resistenza non drenata c_u degli strati A, B e D dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove di laboratorio;
- modulo edometrico E_d degli strati 0 e A dalla prova edometrica rispettivamente sul campione S125-C1 e S125-C2 (per gradino di pressione pari a 196,2 kPa)⁶;
- modulo edometrico E_d dello strato B dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove penetrometriche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche;
- modulo edometrico E_d dello strato C dalla prova edometrica sul campione S82-C2 (per gradino di carico pari a 197 kPa);
- modulo edometrico E_d dello strato D dalla prova edometrica sul campione S125-C3 (per gradino di carico pari a 196,2 kPa)⁷.

10.2.1.3. Argini da realizzare

Come detto al § 10.1.2 la suddivisione in settori per la modellazione geologica è stata definita con lo scopo di evidenziare nel dettaglio gli spessori degli strati individuati in funzione delle caratteristiche geomeccaniche delle prove penetrometriche. Da un punto di vista geotecnico è invece possibile considerare un modello unico per l'area di progetto degli argini

⁶ Con il medesimo carico il modulo edometrico per il campione S124-C1 è pari a 6.760 kPa (strato 0) e per il campione S124-C2 è 5.760 kPa (strato A).

⁷ Il modulo edometrico del campione S124-C3 è pari a 4.970 kPa (stesso gradino di carico).

perimetrali. Sulla base della tipologia dell'opera in progetto e del volume significativo, si assegnano i seguenti valori caratteristici (tabella 14):

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	g [kN/m ³]	Ed [kPa]
0,20	1,60 ⁸	A	8,36	28,28	82,10	19,27	4.050
1,6	3,40÷4,80 ⁹	B	4,87	26,99	66,03	19,10	3.360
3,40÷4,80	5,60÷6,20 ¹⁰	C	7,42	25,79	45,20	19,10	4.550
5,60÷6,20	8,40÷9,00 ¹¹	D	5,28	27,71	46,55	19,13	3.470

Tabella 14 - Valori caratteristici area di progetto argini.

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati così ottenuti:

- peso di volume g, dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- coesione drenata c' dalla media dei risultati delle prove di laboratorio;
- angolo di attrito interno f e coesione non drenata c_u degli strati A e B dalla media dell'elaborazione statistica delle prove penetrometriche;
- angolo di attrito interno f e coesione non drenata c_u degli strati C e D dalla media dei risultati delle prove di laboratorio;
- modulo edometrico Ed dalle prove edometriche (per gradino di pressione pari a 98,1 kPa) dei campioni S124-C2 (strato A), S125-C2 (strato B), S128-C1 (strato C), S125-C3 (strato D).

10.2.2. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali

L'analisi delle prove di laboratorio (prove edometriche) e delle prove in sito (prove penetrometriche statiche CPT e prove penetrometriche con piezocono CPTU) ha mostrato la presenza di terreni superficiali con un moderato grado di sovraconsolidazione (OCR), concentrata soprattutto nei primi metri di profondità dal piano campagna e qui probabilmente dovuta, almeno in parte considerato l'ambiente deposizionale a carattere prevalentemente

⁸ Spessori maggiori si ritrovano nelle CPT69 e CPT71 (2,60 m) e nella CPT65 (4,00 m).

⁹ Spessore inferiore si ritrova nella CPT72 (profondità base fino a 2,80 m).

¹⁰ Spessori di poco inferiori si ritrovano nelle CPT71 e CPT72 (profondità base rispettivamente fino a 5,20 e 5,00 m) e di poco superiori nella CPT67 e CPT68 (rispettivamente 6,80 e 7,40 m).

¹¹ Spessori di poco inferiori si ritrovano nella CPT63 (profondità base fino a 8,00 m) e di poco superiori nella CPT70 (profondità base 9,60 m).

fluviale, a processi di essiccamento localizzato per temporanea emersione di sedimenti in ambiente di deposizione a più bassa energia, oppure per processi di escursione della falda, processi che sono annoverati in letteratura fra le cause di preconsolidazione di terreni, fenomeni diversi da quello meccanico dovuto a precarico (con successiva erosione). Tali evidenze di sovraconsolidazione, anche di entità maggiore benché notevolmente variabili, sono state registrate anche in corrispondenza di aree limitrofe a quella in oggetto e sono documentate, 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.

Per quanto riguarda l'area "Il Piano", ma ciò è valido anche per le altre aree circostanti oggetto delle opere previste dal Masterplan Project Review 2025-2035, la sovraconsolidazione assume valori molto variabili sia in senso orizzontale che verticale. Le figure 8 e 9 seguenti mostrano, rispettivamente, la pressione di preconsolidazione (da prova edometrica) e l'OCR conseguente (rapporto fra la pressione di preconsolidazione e la pressione verticale efficace alla profondità di campionamento del terreno) ricavate dai campioni di terreno prelevati dai sondaggi eseguiti in corrispondenza del tracciato dei futuri argini e del centro visite da realizzare. I valori di OCR sono tali da far considerare i terreni campionati come "moderatamente sovraconsolidati ($OCR < 5$). Si ricorda che i campioni S124-C1 e S125-C1 sono prelevati da terreni costituenti l'argine esistente ubicato lungo il Fiume Bisenzio.

Nella figura 11, invece, i valori di OCR dei campioni prelevati dai sondaggi eseguiti nell'area oggetto della presente relazione sono posizionati alla profondità di prelievo, evidenziando quanto detto riguardo alla maggiore concentrazione della sovraconsolidazione nei primi metri di spessore dal p.c..

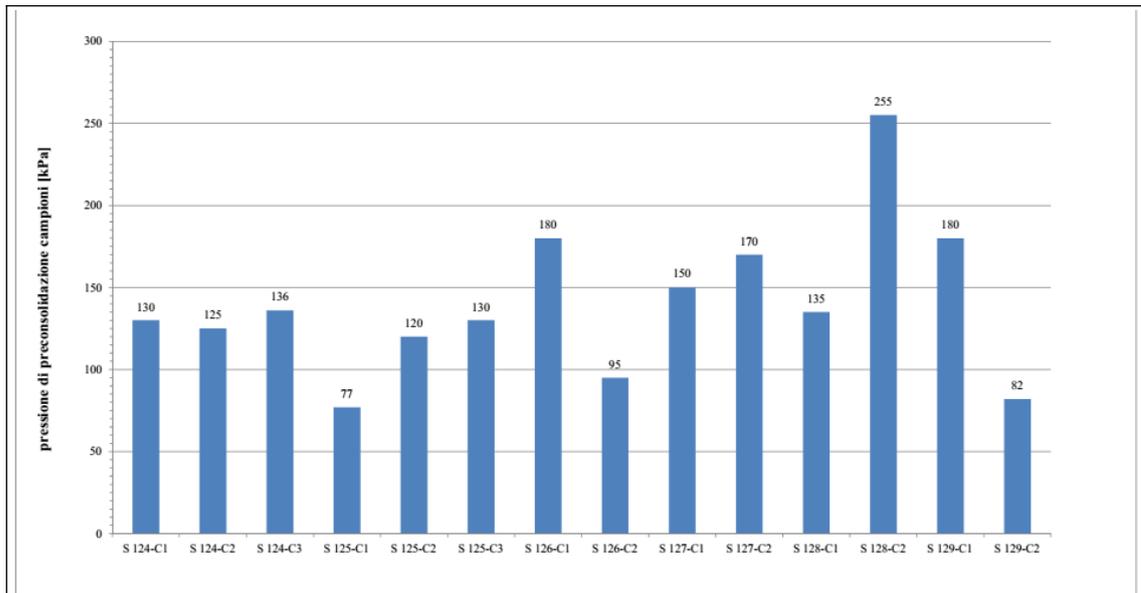


Figura 8 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati nell'area di progetto.

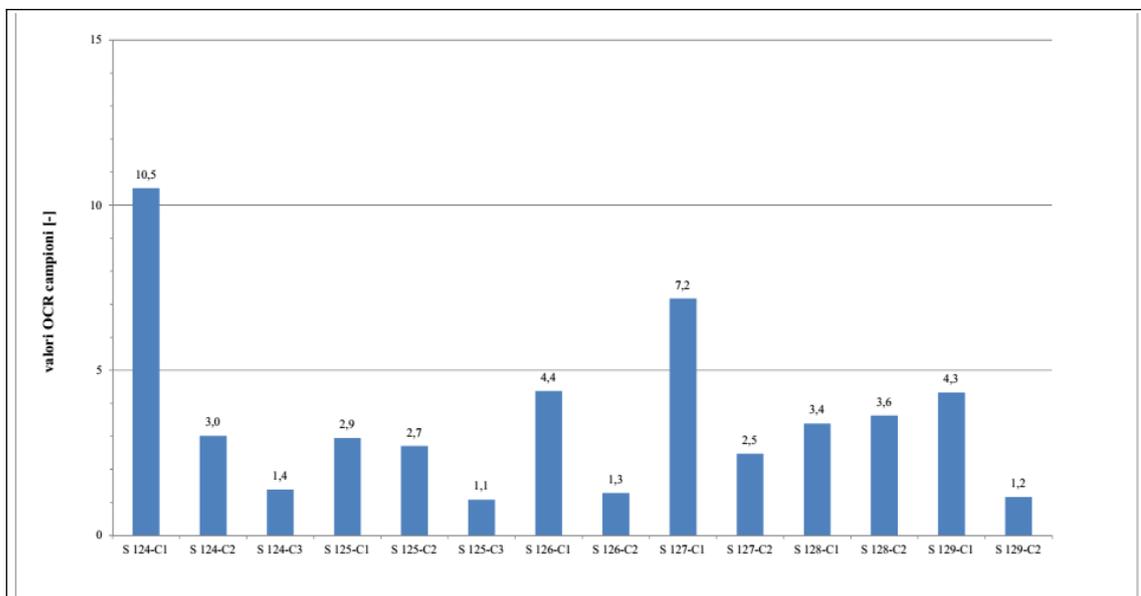


Figura 9 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati nell'area di progetto.

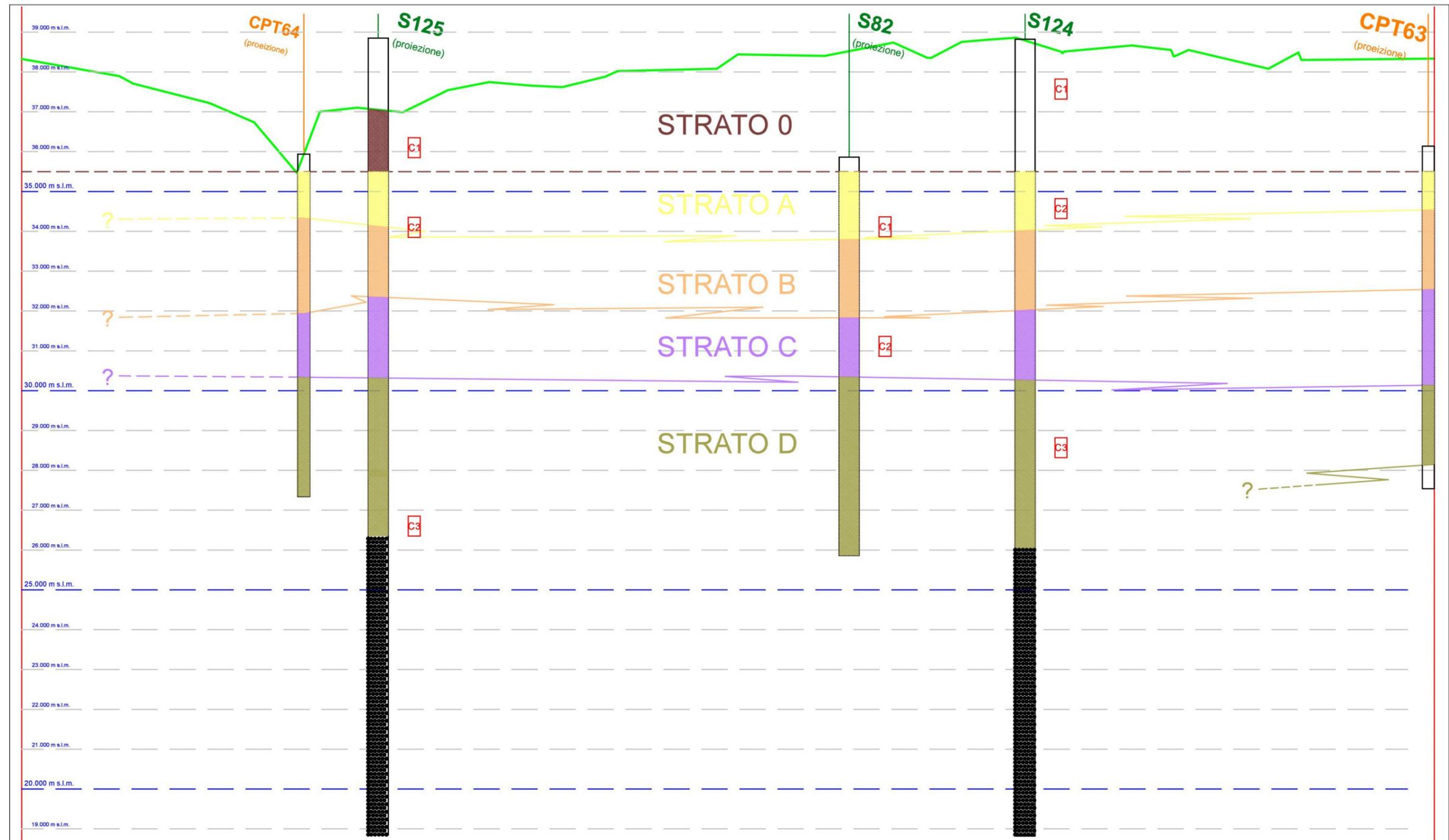


Figura 10 - Sezione litotecnica lungo l'argine del Fiume Bisenzio

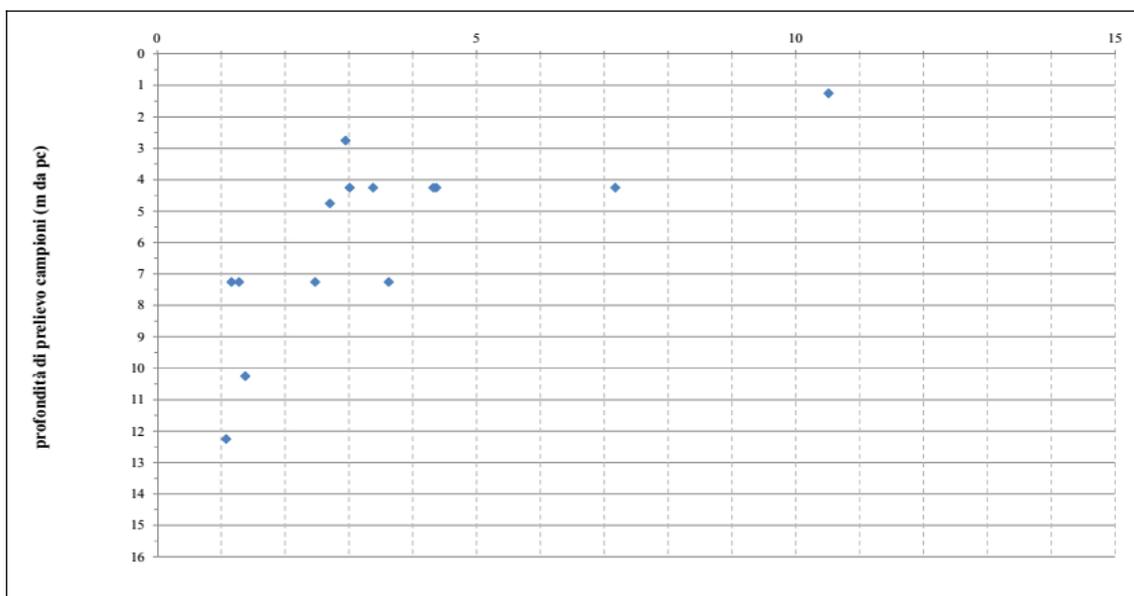


Figura 11 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi ubicati presso l'area di progetto.

11. Liquefazione

Ai sensi del § 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano di campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1 g;
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 15, 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	0,129 g (SLV)	SI	Vedi allegato C
2	Prof. falda > 15 m	>15,0 m	NO	Informazioni da sondaggi
3	(N ₁) ₆₀ > 30 qc _{1N} > 180	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Fuso granulometrico dei campioni di riferimento al di fuori dei limiti della liquefazione (Tsuchida, 1970)

Tabella 15 - Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

In merito al punto 4, si precisa che le curve granulometriche dei campioni più superficiali prelevati nel terreno in posto, presentano un passante sistematicamente superiore al 90% per la frazione fine, quindi si posizionano esternamente rispetto alla composizione granulometrica determinante la condizione di possibilità di liquefazione, tranne che per il campione S82-C11 (70% circa).

12. Terre e rocce da scavo

Per la gestione delle terre e rocce da scavo si rimanda allo specifico Piano di Utilizzo delle Terre (PUT).

13. Indicazioni relative alla realizzazione dei lavori

13.1. Indicazioni inerenti la gestione delle acque di aggettamento

In base a quanto riportato nel § 4.3 i primi metri di terreno, interessati dagli scavi delle opere di progetto sono caratterizzati da totale assenza di falda o dalla presenza di sporadici orizzonti idrici, legati alla ritenzione idrica delle argille, non produttivi a carattere del tutto saltuario. Lo scavo in progetto sarà estremamente limitato quindi si può prevedere la necessità di aggettare acque soltanto con lavori di scavo aperti nelle stagioni piovose e comunque per portate estremamente limitate.

A causa delle specifiche caratteristiche litologiche dei terreni affioranti nell'area, i quali risultano dotati di una permeabilità bassa o molto bassa che limita molto o addirittura impedisce l'infiltrazione nel sottosuolo, in occasione dei periodi di pioggia possono formarsi dei ristagni di acqua in superficie che possono perdurare anche per molti giorni.

13.2. Indicazioni sulla necessità di opere provvisorie e loro tipologia

Lo scavo sarà limitato pertanto non sussiste la necessità di ricorrere a opere provvisorie di sostegno.

13.3. Indicazione sulla tutela dei suoli interessati dalle aree di cantiere

La sostanziale bassa permeabilità dei suoli che si troveranno sul fondo degli scavi è una naturale garanzia di tutela per i suoli e per le acque sotterranee del più profondo dei fondi scavi. Resta naturalmente doveroso assumere da parte della Direzione dei Lavori tutti gli accorgimenti tecnici necessari alla protezione del terreno di fondo scavo da possibili fenomeni di inquinamento causati dal passaggio dei mezzi d'opera.

13.4. Indicazione degli interventi di ripristino delle aree a fine cantiere

Non si ravvisano interventi di ripristino particolari a eccezione delle normali attività di pulizia e smaltimento dei rifiuti prodotti dal cantiere.

14. Conclusioni

Lo studio geologico effettuato nell'area in cui è prevista la realizzazione dell'opera di compensazione ecologica e idraulica denominata "Il Piano di Manetti" nel territorio comunale di Signa (Provincia di Firenze), non ha evidenziato la presenza di aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici e sismici contrastanti o limitanti la fattibilità dell'intervento. Per quanto riguarda l'esame delle problematiche idrauliche si rimanda agli altri elaborati progettuali.

Viste le caratteristiche di progetto, quelle geologiche e geotecniche ed i risultati delle indagini eseguite nel sito di intervento (*Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, 2017 e 2018*) è stato elaborato il modello geologico e geotecnico (§ 10.1) del sottosuolo indicando i valori caratteristici dei parametri geotecnici (§ 10.2.1) da adottare

cautelativamente. A partire dalla categoria di sottosuolo identificata attraverso indagini geofisiche di tipo MASW e HVSr (Categoria di sottosuolo C) e in base a vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento forniti dal progettista, sono stati forniti i parametri dell'azione sismica locale (riportati nell'allegato C).

Firenze, marzo 2024

dr. geol. Fabio Picchi

dr. geol. Michele Sani

15. 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.

* * *