



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

DUNA ANTIRUMORE -DUN
Duna Antirumore - Relazione Geologica con la
parametrizzazione del terreno

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-DUN1-006-GL-RT_Rel Geo DUN TITOLO RIDOTTO Rel Geo DUN
------------	-----------	------------------------------	------------	---

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.....	9
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.....	12
3.2.1. <i>Substrato pre-lacustre</i>	12
3.2.2. <i>Depositi pre-lacustri</i>	13
3.2.3. <i>Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano</i>	13
3.2.4. <i>Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia</i>	13
3.2.4.1. <i>Argille turchine AUCTT</i>	14
3.2.4.2. <i>Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti</i>	14
3.2.5. <i>Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)</i>	14
3.2.6. <i>Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)</i>	15
3.3. Orizzonti "Firenze".....	15
3.3.1. <i>Orizzonte "Firenze 1"</i>	15
3.3.2. <i>Orizzonte "Firenze 2"</i>	16
3.3.3. <i>Orizzonte "Firenze 3"</i>	17
3.3.4. <i>Orizzonte "Firenze 4"</i>	18
3.3.5. <i>Considerazioni sull'andamento degli orizzonti "Firenze"</i>	18
3.4. Geologia dell'area di intervento.....	20
3.4.1. <i>Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna)</i>	21
3.4.1.1. <i>bna1</i>	21
3.4.2. <i>Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5)</i>	21
4. Idrogeologia.....	22
4.1. Aspetti idrogeologici generali.....	22
4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame.....	23
4.3. Superficie piezometrica.....	27
5. Geomorfologia e stabilità.....	28
5.1. Introduzione.....	28
5.1.1. <i>Forme di origine antropica</i>	28
5.1.2. <i>Forme dovute e processi fluviali</i>	30
6. Classi di pericolosità.....	30
6.1. Pericolosità geologica.....	30
6.2. Pericolosità idraulica.....	30
6.3. Pericolosità sismica.....	31
7. Classi di fattibilità.....	31
7.1. Fattibilità geologica.....	31
7.2. Fattibilità idraulica.....	31
7.3. Fattibilità sismica.....	32
8. Risultati delle indagini eseguite.....	32
8.1. Generalità.....	32
8.2. Prove penetrometriche.....	34
8.3. Sondaggi a carotaggio continuo.....	39
8.4. Prove geotecniche di laboratorio.....	39
8.5. Indagini geofisiche.....	41

8.5.1. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).....	41
8.5.2. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr).....	41
9. Sismicità e definizione dei parametri sismici.....	42
9.1. Zona sismica.....	42
9.2. Parametri sismici.....	42
9.2.1. Aspetti generali.....	42
9.2.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato).....	43
9.2.3. Categoria topografica.....	43
9.2.4. Parametri dell'azione sismica locale.....	43
10. Modellazione geologica e geotecnica.....	44
10.1. Sezioni litologiche.....	44
10.2. Modello geologico del sottosuolo.....	44
10.3. Modello geotecnico.....	45
10.3.1. Valori caratteristici dei parametri geotecnici.....	45
10.3.1.1. Aspetti generali.....	45
10.3.1.2. Settore nord-ovest (A).....	46
10.3.1.3. Settore centro-occidentale (B).....	47
10.3.1.4. Settore centro-orientale.....	48
10.3.1.5. Settore sud-orientale.....	49
10.3.2. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali.....	50
11. Liquefazione.....	52
12. Terre e rocce da scavo.....	53
13. Indicazioni relative alla realizzazione dei lavori.....	54
13.1. Indicazioni inerenti la gestione delle acque di aggettamento.....	54
13.2. Indicazioni sulla necessità di opere provvisorie e loro tipologia.....	54
13.3. Indicazione sulla tutela dei suoli interessati dalle aree di cantiere.....	54
13.4. Indicazione degli interventi di ripristino delle aree a fine cantiere.....	54
14. Conclusioni.....	54
15. Bibliografia.....	56

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Ubicazione dell'area di progetto in scala 1:10.000.	8
Figura 2 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecci et al., 1976b).	16
Figura 3 - Carta geologica in scala 1:5.000.	24
Figura 4 - Carta idrogeologica in scala 1:5.000	26
Figura 5 - Carta geomorfologica in scala 1:5.000	29
Figura 6 - Ubicazione delle indagini geognostiche realizzate (in scala 1:5.000). La zona di intervento per il modello geotecnico è stata suddivisa in quattro aree omogenee (A, B, C, e D).	33
Figura 7 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno dell'area di base della duna, posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).	51
Figura 8 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno dell'area di base della duna, posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).	51
Figura 9 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi ubicati all'interno dell'area di base della duna.	52

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classi di permeabilità.	27
Tabella 2 - Campioni indisturbati.	35
Tabella 3 - Elaborazione statistica prove penetrometriche.	39
Tabella 4 - Prove geotecniche "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati.	40
Tabella 5 - Valori caratteristici settore A (nord-ovest).	47
Tabella 6 - Valori caratteristici settore B (centro-occidentale).	47
Tabella 7 - Valori caratteristici settore C (centro-orientale).	48
Tabella 8 - Valori caratteristici settore D (sud-orientale).	49
Tabella 9 - Parametri statistici dei parametri dalle prove edometriche.	52
Tabella 10 - Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	53

ALLEGATI FUORI TESTO

Allegato A – Indagini geognostiche e prove di laboratorio, indagini sismiche, azione sismica

* * *

1. Premessa

1.1. Generalità

Il presente documento costituisce la Relazione Geologica dell'intervento della duna antirumore a protezione del Polo Scientifico, ubicata nel territorio del Comune di Sesto Fiorentino (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 2015 e nel 2017 per le due fasi della *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, determina le classi di fattibilità dell'intervento (geologica, idraulica e sismica), e contiene la modellazione geologica, geotecnica e sismica del terreno.

1.2. Descrizione delle opere e degli interventi

La duna sarà realizzata in terra, per la protezione dal rumore dell'area del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino e avrà le seguenti dimensioni: lunghezza lato lungo circa 1.250 m, lunghezza lato corto orientale circa 115 m, lunghezza lato corto occidentale circa 280 m, altezza 10 m.

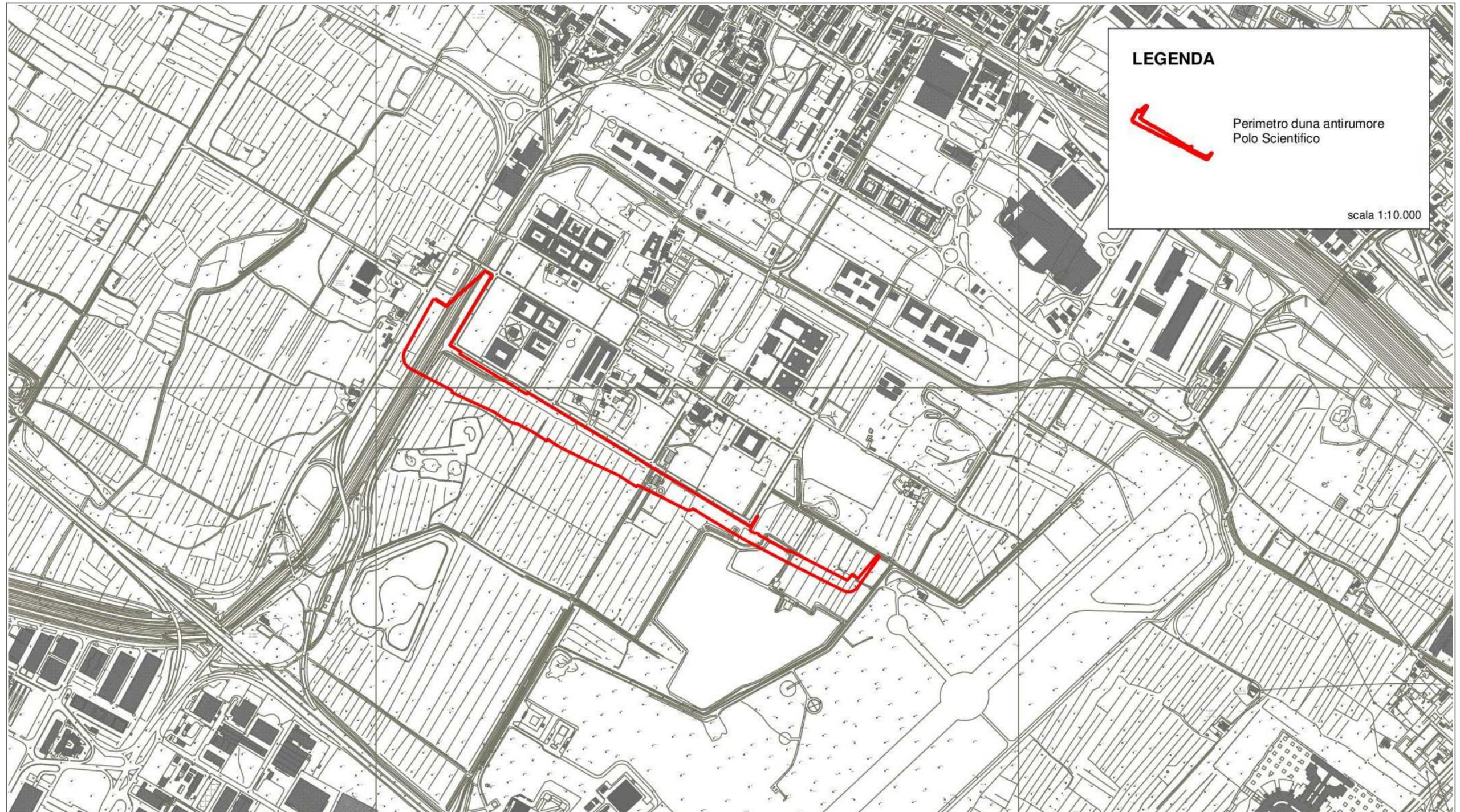


Figura 1 - Ubicazione dell'area di progetto in scala 1:10.000.

Vista la tipologia di opera prevista, il progetto non è identificabile dalle classi d'indagine di cui al Decreto del Presidente della Giunta Regionale 19 gennaio 2022 n. 1/R¹ il quale non risulta quindi applicabile.

1.3. Individuazione dei vincoli presenti

L'area in cui sarà realizzata la duna anti rumore dal punto di vista dei principali vincoli territoriali presenta la seguente situazione:

- l'area di intervento non è interessata dal Vincolo Idrogeologico ai sensi del Regio Decreto Legge n. 3267 del 30 dicembre 1923²;
- l'area è parzialmente interna al Vincolo aeroportuale (Fascia di rispetto perimetrale m. 300 pendenza 1/7);
- l'area di intervento ricade, nella parte sud-orientale, nel vincolo paesaggistico riguardante la fascia di rispetto di 300 metri intorno al lago di Peretola, ai sensi del Codice dei beni culturali e del paesaggio (punto b 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 territori contermini ai laghi compresi in una fascia della profondità di 300 metri dalla linea di battigia, anche per i territori elevati sui laghi*);
- i territori coperti da foreste e da boschi (lettera g, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004) per la fascia ripariale del Lago di Peretola e le fasce lungo le sponde del Fosso Reale;
- l'area di intervento ricade, per una piccola parte, nel Sito di Interesse Regionale (SIR) 45 Stagni della Piana Fiorentina.
- 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 Piano Strutturale intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino e al Secondo Regolamento Urbanistico del Comune di Sesto Fiorentino;
- presa visione del Piano di Bacino del Fiume Arno – Stralcio Assetto idrogeologico (PAI - Norme di attuazione ed allegati) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale

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..*

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

dell'Appennino Settentrionale;

- presa visione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;
- esecuzione di alcuni sopralluoghi sul posto e nelle aree immediatamente limitrofe, per prendere visione della situazione attuale, per la comprensione della situazione geomorfologica e della stabilità generale del sito;
- attribuzione della fattibilità agli interventi in progetto dal punto di vista geologico, idraulico e sismico (si veda il § 7);
- utilizzo delle indagini geognostiche che costituiscono 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 2015 e nel 2017;
- analisi dei risultati delle indagini geognostiche a disposizione per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione (si veda il § 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 (§ 10.3.1);
- 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. Il bacino di Firenze-Prato-Pistoia presenta una geometria a semi-graben fortemente asimmetrica, con un

marginale 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 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 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, deposti 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 Sistema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, in particolare alle Argille turchine AUCTT., Capecchi *et al.* (1976b) hanno fatto corrispondere l'Orizzonte Firenze 4 (si veda il § 3.3.4).

3.2.5. Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)

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

3.2.6. Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)

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

3.3. Orizzonti "Firenze"

In Capecchi, Guazzone, Pranzini, (1976b), sono stati identificati e definiti quattro livelli denominati "orizzonti Firenze" (figura 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.

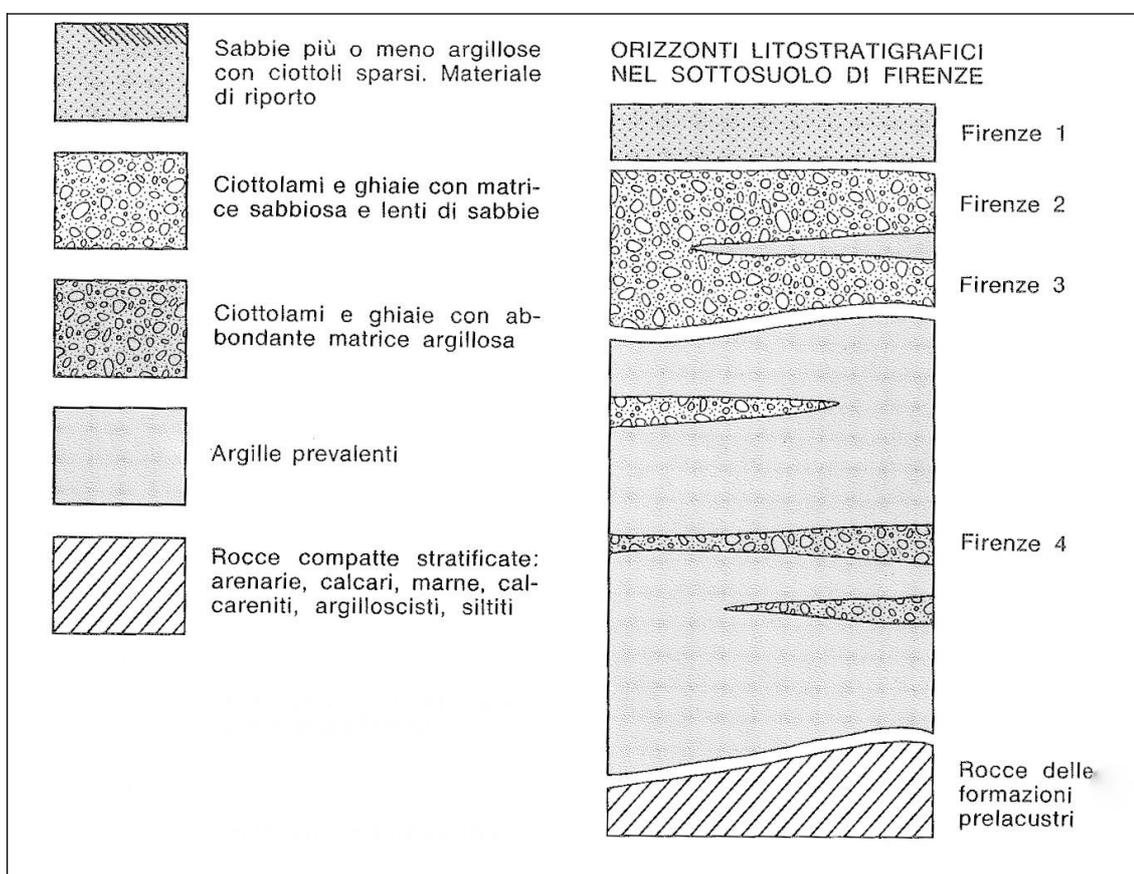


Figura 2 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi et al., 1976b).

3.3.2. Orizzonte "Firenze 2"

Si tratta di depositi fluviali incoerenti che presentano notevoli e rapide variazioni granulometriche sia in senso verticale che orizzontale composti da ciottolami, ghiaie e sabbie. La frazione argillosa è di solito assai scarsa tanto da permettere una buona permeabilità. E' in

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

3.3.3. Orizzonte "Firenze 3"

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

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

3.3.4. Orizzonte "Firenze 4"

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

3.3.5. 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 la duna anti rumore a protezione del Polo Scientifico affiorano i Depositi Olocenici, in particolare ai Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1) e i Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) come mostrato nella carta

geologica riportata nella figura 3, disegnata utilizzando i Fogli n. 275040 e 275080 della Carta Geologica Regionale della Regione Toscana – Servizio Geologico Regionale (*Progetto Carg*). Nel capitolo 3.2, è stato descritto il sottosuolo della piana di Firenze, costituito da sedimenti plio-quadernari di riempimento del bacino fluvio-lacustre formatosi a seguito della fase tettonica distensiva appenninica, depositi sulle rocce del paleoinvaso. I Depositi alluvionali recenti terrazzati corrispondono ai depositi del Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti, § 3.2.6), secondo la classificazione UBSU (Unconformity-bounded Stratigraphic Units) e possono essere inoltre correlati all'Orizzonte Firenze 1 e all'Orizzonte Firenze 2 di Capecchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3).

3.4.1. Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna)

Si tratta di depositi di origine alluvionale costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali, di 1° ordine [bna1] e di 2° ordine [bna2] i quali compongono la totalità dei terreni affioranti nell'area della carta geologica. La duna anti rumore oggetto della presente relazione sarà realizzata interamente sui terrazzi fluviali di 1° ordine (bna1).

3.4.1.1. bna1

Dall'esame della documentazione inerente le campagne di indagine effettuate si evince che, dal punto di vista meramente litologico, nell'area interessata dalla costruzione della duna anti rumore a protezione del Polo Scientifico affiorano, al di sotto di alcuni decimetri (0 – 0,60 m dal piano di campagna) del terreno vegetale oppure di terreni di riporto, argille e limi a tratti debolmente sabbiosi. Il colore del terreno in posto nelle porzioni più superficiali è giallastro per passare a grigio ad alcuni metri di profondità. Durante la perforazione dei sondaggi nella campagna 2017 non è stata rinvenuta presenza di acqua.

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

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

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 acquitrando 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 $10^{-3} \div 10^{-7}$ 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 rinvencono all'interno dei depositi lacustri delle argille azzurre, appartenenti al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, sono ubicate falde confinate, peraltro alimentate con difficoltà dal fatto di essere disperse in potenti serie argillitiche. Nella piana di Firenze le isofreatiche indicano, come andamento generale, un flusso di falda che dai rilievi collinari si dirige verso il Fiume Arno, con una componente verso ovest in modo concorde con la direzione di flusso dell'Arno. Il gradiente idraulico diminuisce dalle zone pedecollinari verso il centro della valle (da 1,0÷1,5 % a 0,2 %), dovuta all'aumento dei valori di trasmissività dei sedimenti.

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

Per quanto riguarda le caratteristiche idrogeologiche della principale unità geologica presente (bna), è possibile stimare la permeabilità su base qualitativa, in funzione degli elementi da cui dipende (caratteristiche litologiche dei terreni affioranti, presenza di pozzi, densità del reticolo idrografico) (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 (S39, S94, S95, S121, S122) non è stata rinvenuta acqua ad eccezione del sondaggio S39. La spiegazione dell'acqua rinvenuta nel sondaggio S39 sta nel fatto che per terreni a granulometria fine si assiste a una elevata porosità, a una elevata ritenzione idrica ma a una bassa porosità efficace.

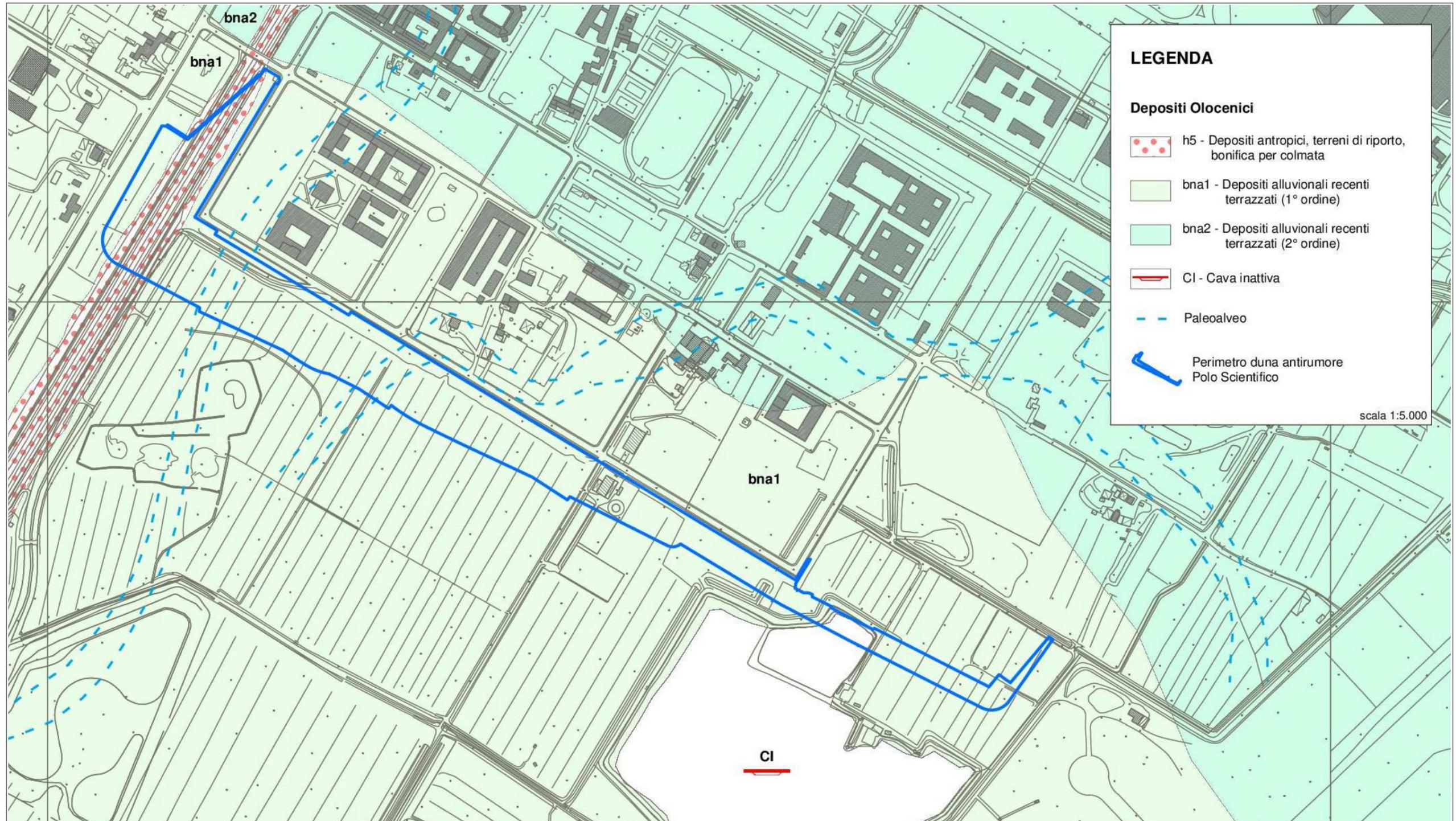


Figura 3 - Carta geologica in scala 1:5.000.

Nelle argille e nei limi vi può quindi essere acqua (il sondaggio S39 è stato perforato a novembre), ma poiché vi è alta ritenzione idrica, la stessa non circola: in questi casi si parla di acquicludo.

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.

Per quanto concerne la permeabilità dei Depositi antropici (h5), anch'essa primaria, è generalmente molto bassa.

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.



Figura 4 - Carta idrogeologica in scala 1:5.000

Come detto precedentemente, nelle lenti di ghiaie e sabbie che si rinvennero all'interno dei depositi lacustri delle argille azzurre, appartenenti al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, sono ubicate falde confinate, peraltro alimentate con difficoltà dal fatto di essere disperse in potenti serie argillitiche. Nella piana di Firenze le isofreatiche indicano, come andamento generale, un flusso di falda che dai rilievi collinari si dirige verso il Fiume Arno, con una componente verso ovest in modo concorde con la direzione di flusso dell'Arno. Il gradiente idraulico diminuisce dalle zone pedecollinari verso il centro della valle (da 1,0÷1,5 % a 0,2 %), dovuta all'aumento dei valori di trasmissività dei sedimenti.

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 e bna2)	bassa
3	-	media
4	-	alta
5	-	molto alta

Tabella 1 - Classi di permeabilità.

4.3. Superficie piezometrica

Come detto, durante l'esecuzione della quasi totalità dei sondaggi realizzati non è stata riscontrata la presenza di acqua; è comunque opportuno fare alcune precisazioni in merito alle interferenze eventualmente presenti e prevedibili tra gli interventi in progetto e le acque di sottosuolo. Come detto nei capitoli precedenti, la zona in studio presenta schematicamente le seguenti caratteristiche idrogeologiche:

- superficialmente è presente un livello dello spessore di un paio di metri al di sotto del piano di campagna, che a seconda della stagione, può essere interessato da saturazione alla profondità compresa tra 0 e 1,5 m; questo livello non ha alcun valore e interesse dal punto di vista della risorsa idrica;
- al di sotto di 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 scotico di modesta entità 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 la duna anti rumore 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 (§ 3).

5. Geomorfologia e stabilità

5.1. Introduzione

Il Polo scientifico è ubicato nella porzione sud-orientale del Comune di Sesto Fiorentino, nei pressi delle località Val di Rose e Pian di Quinto (figura 1). La duna anti rumore a protezione di tale sito avrà una forma circa a "L" rovesciata e il lato lungo sarà parallelo a Via Carlo Albero Funaioli e quello corto sarà ubicato sul Fosso Reale, parallelamente a Via dell'Osmannoro. La zona è pianeggiante ed è posta tra le quote di circa 37 e 42 m s.l.m.. La carta geomorfologica (figura 5) è stata elaborata a partire dai medesimo elaborato delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Piano Strutturale intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino e al Secondo Regolamento Urbanistico del Comune di Sesto F.no e integrata con il lavoro di campagna. Le forme individuate sono state classificate in base all'origine e e distinte in tre gruppi che vengono di seguito descritti.

5.1.1. Forme di origine antropica

Tra le forme legate all'attività antropica si osservano il rilevato arginale del Fosso Reale (Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata) e il lago di Peretola che rappresenta una cava inattiva.

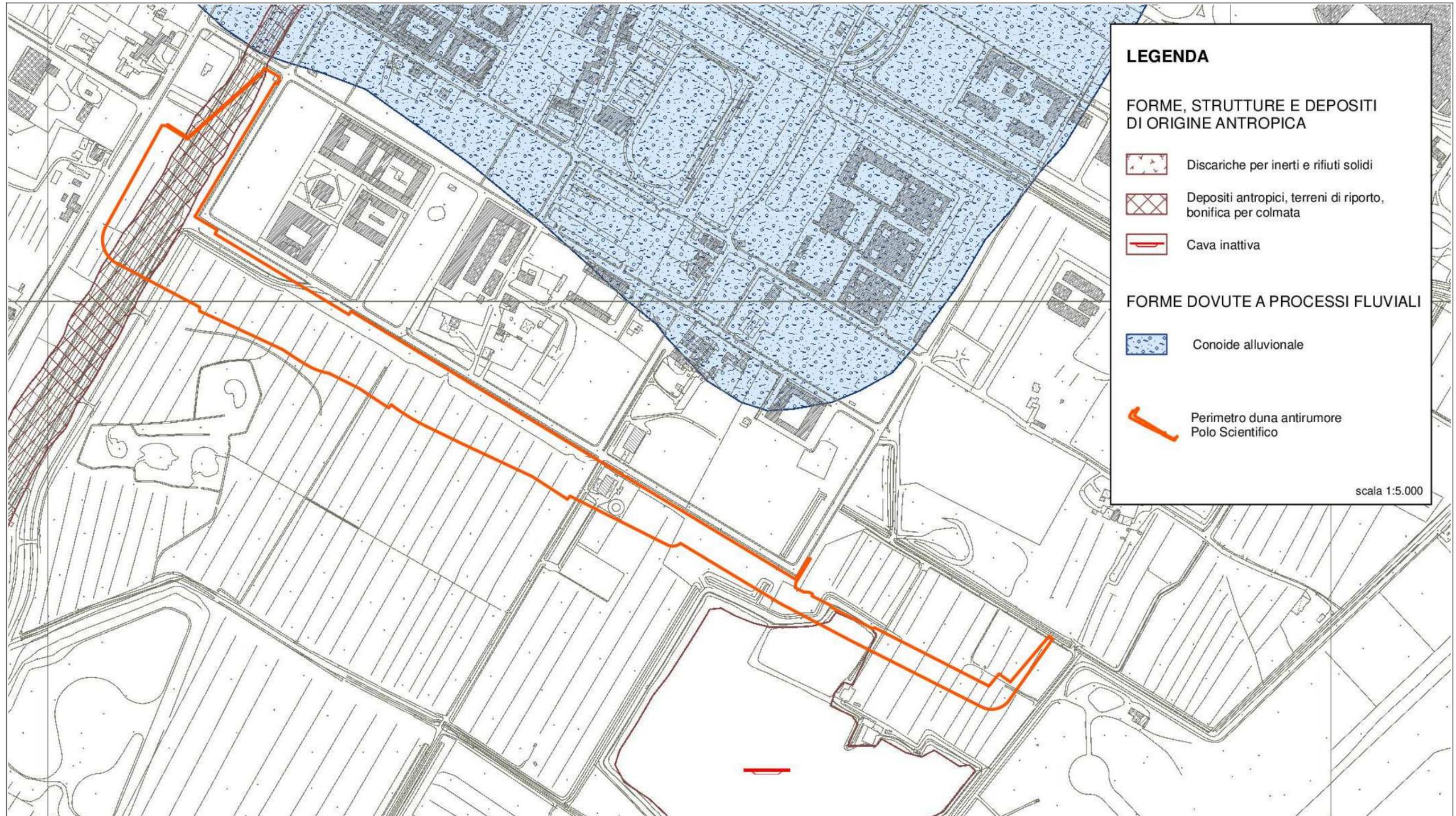


Figura 5 - Carta geomorfologica in scala 1:5.000

5.1.2. *Forme dovute e processi fluviali*

Il contatto tra le due unità geologiche affioranti (bna1 e bna2 – figura 3), coincide con il limite deposizionale della conoide alluvionale che è stata cartografata.

6. Classi di pericolosità

L'opera di cui si tratta ricade interamente nel Comune di Sesto Fiorentino che è dotato del *Piano Strutturale Intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino*, approvato con D.C.C. n. 35 del 11/04/2019, del *Secondo Regolamento Urbanistico*, approvato con D.C.C. n. 6 del 28/01/2014, e dunque delle Carte di pericolosità previste dalla legislazione vigente.

6.1. Pericolosità geologica

La *Carta della pericolosità geologica* (Tavola IGT-PSI-3-Carta della Pericolosità Geologica-Sud - del *Piano Strutturale Intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino*) classifica l'area di progetto in classe di pericolosità geologica media (G2).

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, stralcio n. 39 approvato con Decreto del Segretario Generale n. 51 del 08 agosto 2014, previo parere favorevole del Comitato Tecnico del 18 marzo 2014).

6.2. Pericolosità idraulica

La *Carta della pericolosità idraulica ai sensi del 53/R* (Tavola IGT-PSI-9H-Carta della Pericolosità Idraulica ai sensi del 53R del *Piano Strutturale Intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino*) classifica l'area in cui sorgerà l'opera in progetto in parte in classe di pericolosità idraulica I.3, in parte in classe di pericolosità I.4 ed in parte in classe di pericolosità idraulica I.3* (Aree di potenziale ristagno e/o insufficienza di drenaggio della rete di acque basse).

In riferimento al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), è stato adottato nella seduta dalla Conferenza Istituzionale Permanente con la delibera n. 26 del 20 dicembre 2021 il "primo aggiornamento PGRA (2021-2027)", che rappresenta il riferimento in materia di pericolosità e rischio di alluvioni, l'area risulta caratterizzata, per la maggior parte, dalla classe di pericolosità idraulica P2, mentre per quanto riguarda la zona del Fosso Reale risulta

caratterizzata dalla classe di pericolosità idraulica P3 (stralcio n. 232 del marzo 2016).

Per quanto riguarda il rischio di alluvione (stralcio n. 232 del marzo 2016) la duna in progetto ricadrà in un'area classificata in classe R2 (lato lungo) e parzialmente in classe R3 e R4 (lato corto).

6.3. Pericolosità sismica

La *Carta della pericolosità sismica* (Tavola IGT-PSI-4-Carta della Pericolosità Sismica – Sud del Piano Strutturale Intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino) classifica l'area in studio in classe di pericolosità sismica media (S2).

7. Classi di fattibilità

Nella *Relazione geologica di fattibilità (ai sensi del DPGR 53/R/2011)* a supporto del Secondo Regolamento Urbanistico Indagini Geologico-Tecniche e Idrauliche), sono presenti due tabelle, una per la pericolosità geologica (tabella A) e una per la pericolosità idraulica (tabella B), che permettono di attribuire le classi di fattibilità in funzione della tipologia di intervento.

Per quanto riguarda l'attribuzione della pericolosità sismica non è presente un abaco ma ai sensi del comma 3 dell'art. 48 delle Norme Generali, le condizioni di fattibilità sono disciplinate dall'art. 47.

7.1. Fattibilità geologica

Vista la tipologia di intervento prevista che corrisponde a una duna anti rumore e la classe di pericolosità geologica media (G2) si ritiene di attribuire una classe di fattibilità geologica FG2 con normali vincoli all'opera in progetto.

L'art. 45, comma 2 delle Norme Generali del Secondo Regolamento Urbanistico, per la classe di fattibilità FG2 recita: *eventuali prescrizioni sono specificate alla luce delle risultanze delle indagini geologiche e geotecniche da eseguirsi in sede di progettazione assieme agli aspetti riguardanti scavi delle fondazioni, affrontati nella relazione geologica e geotecnica del progetto*. 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.

7.2. Fattibilità idraulica

Vista la tipologia di intervento prevista e vista la classe di pericolosità idraulica I.3, I.3* (Aree di potenziale ristagno e/o insufficienza di drenaggio della rete di acque basse) e in parte in classe di pericolosità idraulica I.4 si ritiene di attribuire una classe di fattibilità idraulica

condizionata FI3 alla duna antirumore da realizzare (non assimilabile a nessuna delle categorie contemplate nell'abaco B). In merito alle prescrizioni di cui all'art. 46, comma 4 e 5 delle Norme Generali del Secondo Regolamento Urbanistico, si vedano gli altri elaborati progettuali.

7.3. Fattibilità sismica

Vista la tipologia di intervento prevista e vista la classe di pericolosità sismica media (S2) si ritiene di attribuire una classe di fattibilità FS2 con normali vincoli. Il comma 2 dell'articolo 47 delle Norme Generali del Secondo Regolamento Urbanistico, stabilisce che per questa classe di fattibilità *non sussistono condizioni di fattibilità specifiche per la fase di predisposizione dei Piani Attuativi o dei Progetti Unitari, ovvero per la valida formazione dei titoli o atti abilitativi all'attività edilizia.*

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 *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci nel 2015 e nel 2017. In particolare, per lo studio delle caratteristiche litologiche, stratigrafiche e meccaniche dei terreni presenti nell'area interessata dalla duna anti rumore in progetto, sono state realizzate le seguenti indagini geognostiche ubicate come mostrato nella figura 6:

- n. 7 (sette) prove penetrometriche statiche denominate CPT13, CPT14 e CPT58÷62, che hanno raggiunto profondità comprese tra 6,00 e 9,40 m dal p.c., eseguite dalla società Geosol S.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena);
- n. 6 (sei) sondaggi a carotaggio continuo denominati S93÷S96, S121, S122, aventi una profondità di 10,0 m dal p.c.;
- n. 1 (uno) sondaggio a carotaggio continuo denominato S39, della profondità di 10,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro;
- prelievo di campioni indisturbati con fustella di tipo Shelby dai sondaggi realizzati, alle profondità indicate nella tabella 2;

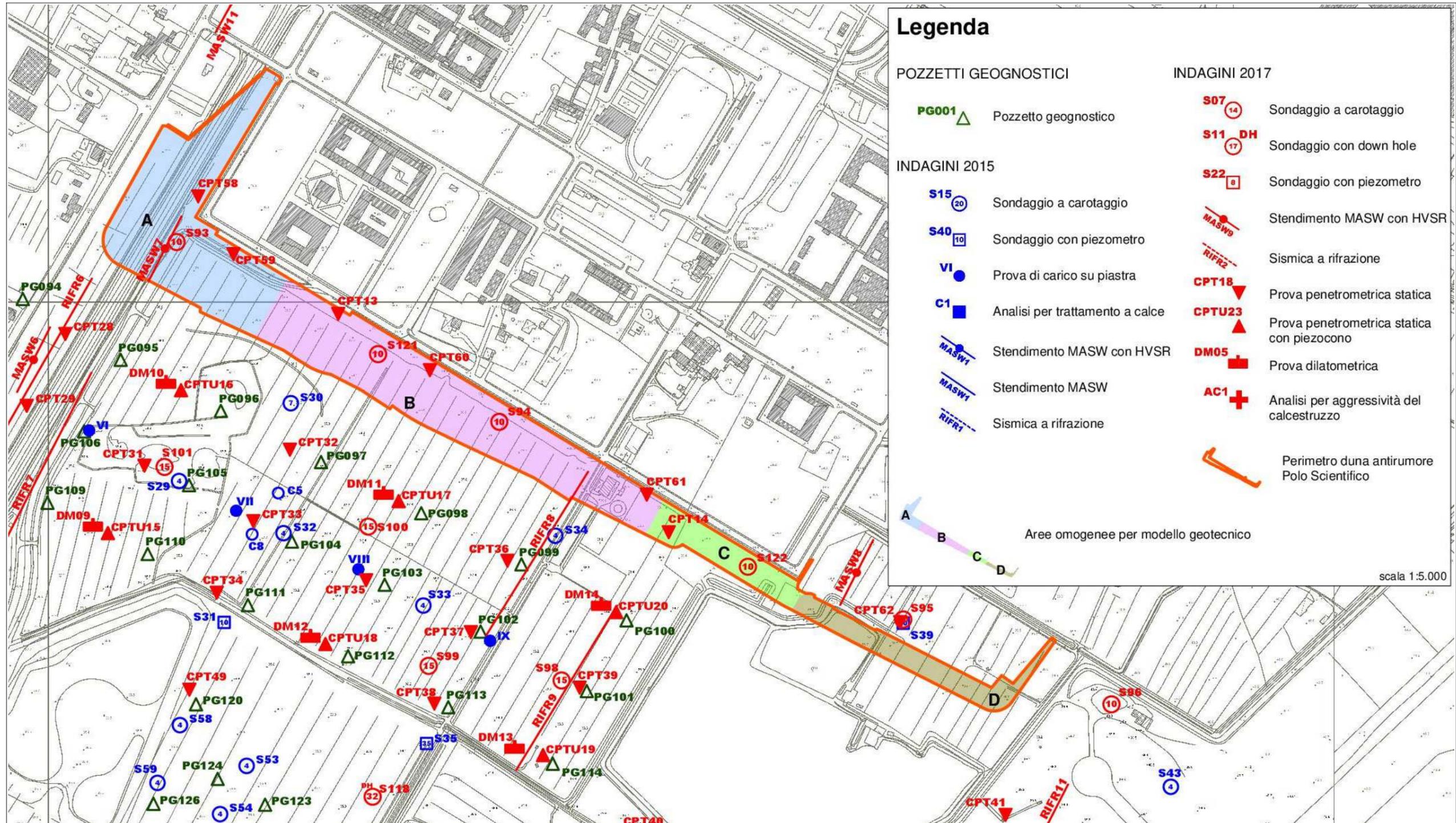


Figura 6 - Ubicazione delle indagini geognostiche realizzate (in scala 1:5.000). La zona di intervento per il modello geotecnico è stata suddivisa in quattro aree omogenee (A, B, C, e D).

8.2. 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 e la sezione litostratigrafica 6):

- Prova penetrometrica statica CPT 13:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie nel primo metro, tra 1,4 e 1,6 m da p.c., tra 3,2 e 3,6 m da p.c. e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.; a partire da 5,2 m da p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 14:
 - profondità indagata: 9,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), sono presenti torbe e/o argille organiche prevalenti fino a 3,2 m da p.c. e al di sotto argille e/o limi prevalenti; all'interno di questi livelli principali si incontrano intervalli di limi e/o sabbie (0,4÷0,8 m, 1,0÷1,4 m, 7,8÷8,4 m, 8,6÷9,0 m dal p.c.) e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,2 e 0,4 m da p.c.;
 - a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e della resistenza laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 58:
 - profondità indagata: 6,0 m da p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c-f_s/q_c), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 1,0÷1,2 m, 2,2÷2,6 m, 3,0÷3,6 m da p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 2,6 e 3,0 m da

p.c.;

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S39	CI1	1,00 ÷ 1,60 ³	37,925 ÷ 37,325
S93	CI1	1,30 ÷ 1,80	37,395 ÷ 36,895
	CI2	4,00 ÷ 4,50	34,695 ÷ 34,195
S94	CI1	2,00 ÷ 2,50	36,972 ÷ 36,472
	CI2	3,50 ÷ 4,00	35,472 ÷ 34,972
	CI3	5,50 ÷ 6,00	33,472 ÷ 32,972
S95	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,556 ÷ 36,056
	CI2	4,50 ÷ 5,00	34,556 ÷ 34,056
	CI3	7,50 ÷ 8,00	31,556 ÷ 31,056
S96	CI1	1,50 ÷ 2,00	38,262 ÷ 37,762
	CI2	5,50 ÷ 6,00	34,262 ÷ 33,762
	CI3	9,00 ÷ 9,50	30,762 ÷ 30,262
S121	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,498 ÷ 35,998
	CI2	5,00 ÷ 5,50	33,998 ÷ 33,498
	CI3	8,00 ÷ 8,50	30,998 ÷ 30,498
S122	CI1	1,50 ÷ 2,00	37,722 ÷ 37,222

Tabella 2 - Campioni indisturbati.

- Prova penetrometrica statica CPT 13:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e

³ Da stratigrafia del sondaggio; il certificato del laboratorio riporta 1,50 ÷ 2,00.

laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie nel primo metro, tra 1,4 e 1,6 m da p.c., tra 3,2 e 3,6 m da p.c. e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.;

- a partire da 5,2 m da p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 14:
 - profondità indagata: 9,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), sono presenti torbe e/o argille organiche prevalenti fino a 3,2 m da p.c. e al di sotto argille e/o limi prevalenti; all'interno di questi livelli principali si incontrano intervalli di limi e/o sabbie (0,4÷0,8 m, 1,0÷1,4 m, 7,8÷8,4 m, 8,6÷9,0 m dal p.c.) e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,2 e 0,4 m da p.c.;
 - a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e della resistenza laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 58:
 - profondità indagata: 6,0 m da p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 1,0÷1,2 m, 2,2÷2,6 m, 3,0÷3,6 m da p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 2,6 e 3,0 m da p.c.;
 - a partire da 3,1 m da p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 59:
 - profondità indagata: 6,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,4 m,

- 0,6÷1,0 m, 2,4÷3,0 m, 3,0÷3,6 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie (0,4÷0,6 m, 1,0÷1,4 m, 4,0÷4,6 m da p.c.);
- a partire da 5,0 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e della resistenza laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
 - Prova penetrometrica statica CPT 60:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,6 m, 3,2÷3,4 m da p.c.) e di limi e/o sabbie (0,6÷1,0 m, 1,4÷1,8 m, 2,2÷2,4 m, 4,8÷5,4 m, 6,8÷7,0 m dal p.c.);
 - a partire da 3,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
 - Prova penetrometrica statica CPT 61:
 - profondità indagata: 6,80 m da p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,6÷0,8 m, 1,0÷1,2 m, 2,0÷2,4 m, 3,4÷4,0 m, 5,0÷5,6 m, 6,6÷6,8 m da p.c.) e di livelli francamente sabbiosi (0,8÷1,0 m, 1,2÷1,4 m, 1,6÷2,0 m, 6,4÷6,6 m dal p.c.);
 - si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
 - Prova penetrometrica statica CPT 62:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 0,8÷1,2 m, 1,4÷1,6 m, 1,8÷2,0 m, 2,4÷3,0 m, 3,6÷3,8 m, 5,0÷5,2 m, 7,0÷7,2 m da p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 1,6 e 1,8 m dal p.c.;
 - a partire da 5,8 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e

della resistenza laterale con la profondità, 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 § 10.3.1) ottenendo i risultati riportati nella tabella 3.

Sigla	Valore caratteristico k	Natura coesiva		Natura granulare	
		c _u [kPa]	Mo [kPa]	f* [°]	Mo [kPa]
CPT13	Da 0,20 a 1,00 m da p.c.	-	-	26,72	7.060,79
	Da 1,20 a 3,00 m da p.c.	81,63	7943,39	27,4	8.090,49
	Da 3,20 a 5,60 m da p.c.	95,22	11.473,78	28,71	11.473,78
	Da 5,80 a 6,60 m da p.c.	173,68	18.240,37	31,14	18.240,37
CPT14	Da 0,20 a 1,40 m da p.c.	183,75	18.240,37	30,43	19.417,17
	Da 1,60 a 3,20 m da p.c.	59,10	6.766,59	26,06	6.766,59
	Da 3,40 a 8,00 m da p.c.	87,74	10.591,18	28,34	10.591,18
	Da 8,20 a 9,40 m da p.c.	127,14	16.180,97	30,49	21.770,76
CPT58	Da 0,20 a 1,00 m da p.c.	118,57	14.121,58	29,08	13.827,38
	Da 1,20 a 2,00 m da p.c.	72,43	6619,49	27,54	7.502,09
	Da 2,20 a 4,80 m da p.c.	121,08	12.944,78	29,76	12.944,78
	Da 5,00 a 6,00 m da p.c.	174,17	17.799,07	30,89	17.799,07
CPT59	Da 0,20 a 1,00 m da p.c.	41,99	4.560,09	27,00	5.001,39
	Da 1,20 a 3,60 m da p.c.	76,60	7.943,39	27,28	7.943,39
	Da 3,80 a 5,80 m da p.c.	109,45	11.767,98	29,24	12.356,38
	Da 6,00 a 6,80 m da p.c.	144,97	14.709,98	30,54	14.709,98
CPT60	Da 0,20 a 1,00 m da p.c.	33,80	4.373,77	28,78	15.298,37
	Da 1,20 a 3,60 m da p.c.	76,68	7.796,29	27,26	7.943,39
	Da 3,80 a 6,20 m da p.c.	107,58	12.356,38	29,36	12.650,58

Sigla	Valore caratteristico k	Natura coesiva		Natura granulare	
		c _u [kPa]	Mo [kPa]	f* [°]	Mo [kPa]
	Da 6,40 a 7,20 m da p.c.	165,95	17.210,67	30,79	17.651,97
CPT61	Da 0,20 a 0,80 m da p.c.	65,45	6.178,19	26,08	6.178,19
	Da 1,00 a 3,40 m da p.c.	88,75	8.678,89	27,70	8.825,99
	Da 3,60 a 5,60 m da p.c.	106,71	11.179,58	29,06	11.179,58
	Da 5,80 a 6,80 m da p.c.	146,96	14.415,78	30,12	15.739,67
CPT62	Da 0,20 a 0,80 m da p.c.	135,16	13.827,38	28,89	12.944,78
	Da 1,00 a 3,40 m da p.c.	53,38	5.697,66	27,02	8.531,79
	Da 3,60 a 5,80 m da p.c.	90,72	10.444,04	28,04	10.738,28
	Da 6,00 a 7,20 m da p.c.	110,22	14.415,78	29,48	14.415,78

Tabella 3 - Elaborazione statistica prove penetrometriche.

* Secondo la correlazione di Meyerhof.

8.3. 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, al di sotto di materiale di riporto (presente nei sondaggi S94, S95, S96 e S121) o terreno vegetale (S39, S93, S122), si incontrano per la maggior parte terreni coesivi quali limo, limo argilloso (prevalente nelle verticali S93, S94 e S122), argilla e limo (predominanti in S39 e S95), argilla (in S96). All'interno di tali materiali possono essere presenti livelli di limo sabbioso (nei primi 2 metri del sondaggio S122) e ghiaia (in S94).

8.4. Prove geotecniche di laboratorio

Come detto al § 8.1 durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati dei campioni indisturbati con fustella tipo Shelby in per essere successivamente inviati al laboratorio Igetecma S.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) per l'esecuzione delle prove geotecniche. Su tutti i campioni prelevati (tabella 2) 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 4 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.;

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CU	Edometrica*	Taglio CD
S39-CI1				X	
S93-CI1		X		X	X
S93-CI2	X			X	
S93-CI3	X			X	X
S94-CI1	X			X	
S94-CI2	X			X	X
S94-CI3				X	X
S95-CI1	X			X	
S95-CI2				X	X
S96-CI1			X		X
S96-CI2	X				X
S96-CI3	X				X
S121-CI1		X		X	X
S121-CI2				X	X
S121-CI3				X	X
S122-CI1		X		X	X
S122-CI2				X	X

Tabella 4 - Prove geotecniche "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati.

* compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

- 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).

I parametri geotecnici ottenuti dalle prove di laboratorio sono riassunti nella tabella riportata nell'allegato A (ultima pagina di ciascun certificato).

8.5. Indagini geofisiche

8.5.1. 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 due indagini sismiche con metodologia MASW, denominate MASW7 e MASW8 (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 $V_{s,eq}$, che applicando la formula seguente:

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

è risultato pari a 341 m/s (MASW7) e 333 m/s (MASW8).

8.5.2. 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.

Nella prova HVSr 7 non è stato rilevato un picco significativo segno evidente che non vi è un contrasto di impedenza rilevabile con questa metodologia. Nella prova HVSr 8 è stato rilevato un picco a 0,41 Hz ma non vi è il rispetto delle condizioni del SESAME ne' per l'affidabilità della curva (solo due su tre) ne' per l'affidabilità del picco (solo quattro su sei).

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 Sesto Fiorentino è inserito nella "zona sismica 3" (in fascia di pericolosità B, contraddistinta da $0,125 < a_g \leq 0,15$ 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

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.*

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.

9.2.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato)

Visto il valore della velocità equivalente delle onde di taglio calcolato dall'indagine sismica (§ 8.5.1) 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 43,81603 e 11,196277 long (relative al centro della duna). 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 (ipotizzati):

- 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 ($V_R=V_N \cdot C_U$) 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. Sezioni litologiche

Nella tavola 10, allegata alla Relazione Generale, è mostrata la sezione 6-6¹⁵ nella quale sono riportate le colonne litologiche delle verticali di indagine di interesse per gli interventi oggetto della presente relazione; la traccia della sezione è indicata nella figura 6. Le colonne litologiche sono state disegnate come di seguito esposto:

- per i sondaggi derivano dalla descrizione di campagna riportata sulle schede della ditta esecutrice;
- per le prove penetrometriche CPT sono state ottenute integrando l'interpretazione litologica di Begemann con quella di Schmertmann;

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.

10.2. Modello geologico del sottosuolo

Seppure nello spessore di terreno limitato ai primi 2÷3 m esistono frequenti eteropie/variazioni litologiche sia verticali che orizzontali, il sottosuolo dell'area in oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in tre 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). Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- da 0,00 a 0,80÷1,40 m dal p.c.: argilla con limo e, subordinatamente limo con argilla, debolmente sabbioso, con grado di consistenza da scarso a medio per la frazione coesiva (con grado di addensamento da medio a alto per la frazione granulare);

⁵ La numerazione delle sezioni deriva dalla relazione geologica generale, redatta dalla società scrivente contestualmente al presente documento, per le opere previste.

- da 0,80÷1,40 m a 2,00÷3,60 dal p.c.: argilla con limo, talvolta debolmente sabbiosa, più raramente debolmente ghiaiosa, con grado di consistenza da basso a medio per la frazione coesiva (con scarso grado di addensamento);
- da 2,00÷3,60 m a 5,00÷8,20 m dal p.c.: argilla con limo, talvolta debolmente sabbiosa, con grado di consistenza per la frazione coesiva da medio a elevato (grado di addensamento medio-basso).
- da 5,00÷8,20 m a (almeno) 20,00 m dal p.c.: argilla con limo, subordinatamente limo con argilla debolmente sabbiosa, con medio-alto grado di consistenza per la frazione coesiva (con medio-basso grado di addensamento).

A maggiori profondità, oltre i 20 m dal p.c., i sondaggi eseguiti per la realizzazione del Polo Scientifico Universitario hanno attraversato intervalli di terreni coesivi con frazioni di sabbia e ghiaia.

10.3. Modello geotecnico

Considerando le diverse caratteristiche progettuali e l'estensione dell'opera e viste le indagini a disposizione, si ritiene opportuno definire un modello geotecnico distinto per singole aree omogenee in funzione delle verticali di indagine a disposizione (figura 6). Nei paragrafi seguenti si riportano i valori caratteristici dei parametri geotecnici per i "settori" individuati.⁶

10.3.1. Valori caratteristici dei parametri geotecnici

10.3.1.1. 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*

⁶ Per quanto riguarda il modulo edometrico il valore caratteristico riportato nelle tabelle del § 10.3.1 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.

gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019). 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).

10.3.1.2. Settore nord-ovest (A)

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 10.2, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella 5 i valori caratteristici dei parametri geotecnici per la porzione in adiacenza all'attuale corso del Fosso Reale (figura 6; indagini di riferimento: CPT58, CPT59, S93):

- angolo di attrito interno f e resistenza non drenata c_u , dello strato 4 dai risultati delle prove di laboratorio sul campione S93-CI3 (oggetto di confronto con quelli ottenuti tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche);
- coesione drenata c' degli strati 1, 2 e 4 dai risultati delle prove di laboratorio sui campioni del sondaggio S93;
- coesione drenata c' dello strato 3 dal valore caratteristico per l'adiacente settore (§ 10.3.1.2);
- modulo edometrico E_d tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche.

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	g [kN/m ³]	Ed [kPa]
0,00	1,00	1	7,40	27,00	118,57	19,20	4.560,09 ⁷
1,00	2,00÷3,60	2	7,40	27,28	72,43	19,20	6.619,90
2,00÷3,60	4,80÷5,80	3	11,60	29,24	109,45	18,70	11767,98
4,80÷5,80	(20,00)	4	20,60	20,80	111,50	19,90	14.709,98 ⁸

Tabella 5 - Valori caratteristici settore A (nord-ovest).

10.3.1.3. Settore centro-occidentale (B)

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 10.2, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella i valori caratteristici dei parametri geotecnici per la porzione tra il prolungamento di Via G. Racah e il prolungamento di Via dei Giunchi (figura 6; indagini di riferimento: CPT13, CPT60, CPT61, S94, S121):

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	g [kN/m ³]	Ed [kPa]
0,00	1,00	1	15,1	26,08	33,80	19,00	4.373,77
1,00	2,00÷3,60	2	11,60	22,60	69,80	19,38	7796,29
2,00÷3,60	4,80÷5,80	3	11,60	19,40	106,71	19,10	11179,58
4,80÷5,80	(20,00)	4	12,50	21,90	146,96	18,9	14.415,78 ⁹

Tabella 6 - Valori caratteristici settore B (centro-occidentale).

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati così ottenuti:

- peso di volume g, dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- angolo di attrito interno f dello strato 1 dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche;
- coesione drenata c' dello strato 1 dalla media dei valori caratteristici dei settori adiacenti;

⁷ Il modulo edometrico Ed dalla prova edometrica eseguita sul campione S93-C1 (per un gradino di pressione pari a 185,7 kPa) è pari a 5.733,94 kPa.

⁸ Il modulo edometrico Ed dalla prova edometrica eseguita sul campione S93-C3 (per un gradino di carico pari a 391,7 kPa) è pari a 12.804,10 kPa.

⁹ Il modulo edometrico Ed dalla prova edometrica eseguita sul campione S121-C3 (per un gradino di carico pari a 196,5 kPa) è pari a 11.481,06 kPa.

- angolo di attrito interno f e coesione drenata c' degli strati 2, 3 e 4 dai risultati delle prove di laboratorio;
- resistenza non drenata c_u , dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche (oggetto di confronto con i risultati delle prove di laboratorio);
- modulo edometrico E_d tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche.

10.3.1.4. *Settore centro-orientale*

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 10.2, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella i valori caratteristici dei parametri geotecnici per la porzione in corrispondenza di Via G. Patrone (figura 6; indagini di riferimento: CPT14, S121):

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c_u [kPa]	g [kN/m ³]	E_d [kPa]
0,00	1,00	1	22,8	17,90	108,60	19,50	4.373,77
1,00	2,00÷3,60	2	22,8	17,80	59,10	19,15	6766,59
2,00÷3,60	4,80÷5,80	3	9,15	28,34	87,74	19,15	10.591,18
4,80÷5,80	(20,00)	4	18,65	30,49	127,14	19,73	16.180,97

Tabella 7 - Valori caratteristici settore C (centro-orientale).

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati così ottenuti:

- peso di volume g , dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- angolo di attrito interno f degli strati 1 e 2 dai risultati delle prove di laboratorio;
- angolo di attrito interno f degli strati 3 e 4 dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche;
- coesione drenata c' degli strati 1 e 2 dai risultati delle prove di laboratorio;
- coesione drenata c' degli strati 3 e 4 dalla media dei valori caratteristici dei settori adiacenti;
- resistenza non drenata c_u , dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche (oggetto di confronto con i risultati delle prove di laboratorio);

- modulo edometrico Ed tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei valori dei settori adiacenti e dei risultati delle prove edometriche.

10.3.1.5. Settore sud-orientale

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 10.2, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella i valori caratteristici dei parametri geotecnici per la porzione in corrispondenza del Lago di Peretola (figura 6; indagini di riferimento: CPT62, S39, S95, S96):

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	g [kN/m ³]	Ed [kPa]
0,00	1,00	1	14,30	20,3	135,16	18,8	4373,77
1,00	2,00÷3,60	2	20,16	27,02	53,38	20,10	5.697,66
2,00÷3,60	4,80÷5,80	3	6,7	17,4	90,72	19,60	10.444,04
4,80÷5,80	(20,00)	4	24,80	26,1	112,30	20,40	14.415,78

Tabella 8 - Valori caratteristici settore D (sud-orientale).

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati ottenuti nel seguente modo:

- peso di volume g, dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- angolo di attrito interno f degli strati 1, 3 e 4 dai risultati delle prove di laboratorio;
- angolo di attrito interno f dello strato 2 dall'elaborazione statistica della prova penetrometrica statica;
- coesione drenata c' degli strati 1, 3 e 4 dai risultati delle prove di laboratorio;
- coesione drenata c' dello strato 2 dal valore caratteristico del settore adiacente (diminuito a fini cautelativi);
- resistenza non drenata c_u, degli strati 1, 2 e 3 dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche (oggetto di confronto con i risultati delle prove di laboratorio);
- resistenza non drenata c_u, dello strato 4 dai risultati delle prove di laboratorio (oggetto di confronto con l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche);

- modulo edometrico Ed tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei valori dei settori adiacenti e dei risultati delle prove edometriche.

10.3.2. *Considerazioni sui terreni coesivi superficiali*

L'analisi delle prove di laboratorio (prove edometriche) e delle prove in sito (prove penetrometriche statiche CPT) ha mostrato la presenza di terreni superficiali con un elevato grado di sovraconsolidazione (OCR), concentrata soprattutto nei primi 1,50-2,00 metri di profondità dal piano campagna e dovuta a processi di essiccamento per temporanea emersione di sedimenti in ambiente di deposizione lacustre-palustre, processi che sono annoverati in letteratura fra le cause di preconsolidazione di terreni, fenomeno diverso da quello meccanico dovuto a precarico (con successiva erosione). Tali evidenze di sovraconsolidazione sono state registrate anche in corrispondenza di aree limitrofe a quella in oggetto in terreni coesivi del tutto analoghi quali argille limose e limi argillosi 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 di progetto, ma ciò è valido anche per le altre aree circostanti oggetto delle opere previste dal project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035, la sovraconsolidazione assume valori molto variabili sia in senso orizzontale che verticale. Le figure 7 e 8 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 realizzati all'interno dell'area interessata dalla realizzazione della duna antirumore, campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).

Nella figura 9, invece, i valori di OCR dei campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno dell'area di progetto vengono posizionati alla profondità di prelievo, evidenziando quanto detto riguardo alla maggiore concentrazione della sovraconsolidazione nei primi 1,50÷2,00 m di spessore.

Nella tabella 9 seguente sono riportati valori statistici di alcuni parametri derivati dalle prove edometriche.

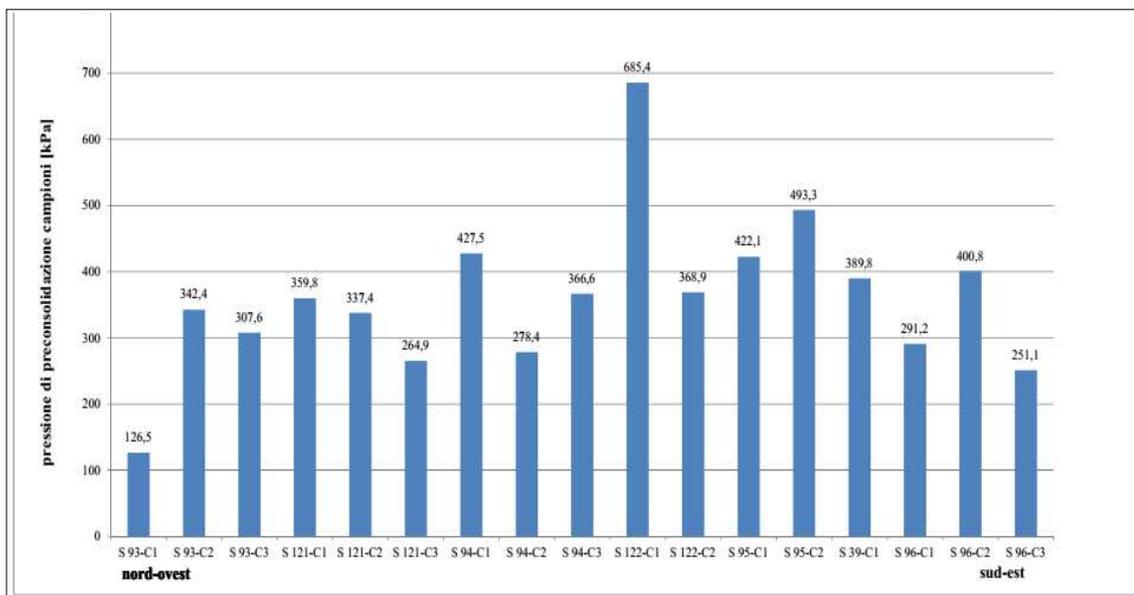


Figura 7 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno dell'area di base della duna, posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).

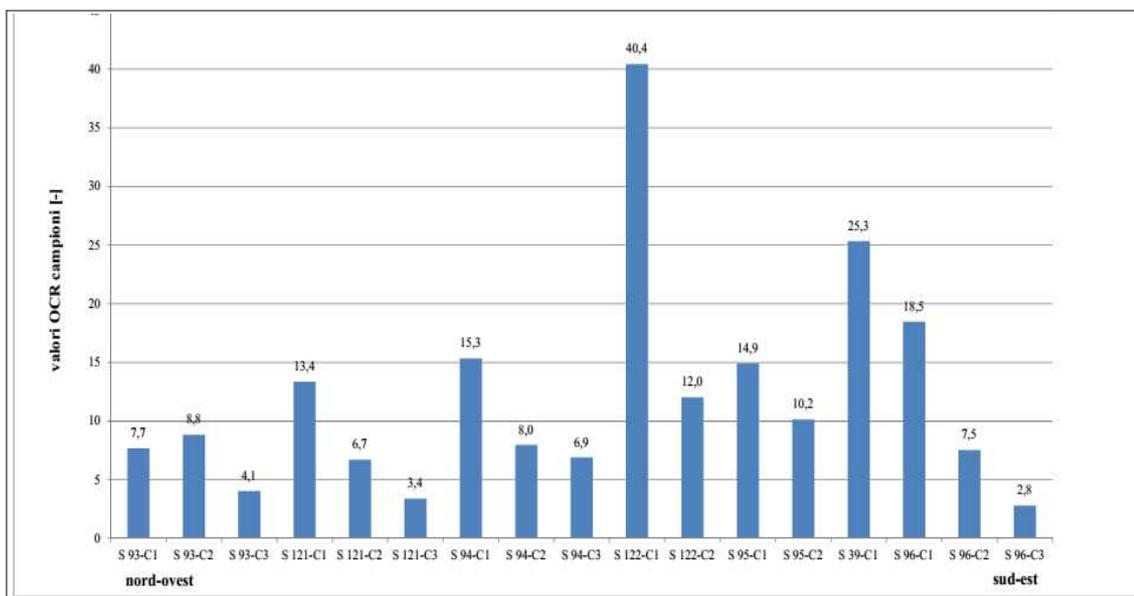


Figura 8 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno dell'area di base della duna, posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).

Tabella relativa ai parametri statistici di dati edometrici e OCR					
	Ind. ricompr. Cr	Ind. compress. Cc	Ind. rigonf. Cs	Press. precons. σ'_{vmax} (kPa)	OCR [-]
media aritm	0,04750	0,18181	0,06791	359,6	12,1
mediana	0,05193	0,17221	0,07193	359,8	8,8
dev. std	0,014	0,027	0,016	118,62	9,33

Tabella 9 - Parametri statistici dei parametri dalle prove edometriche.

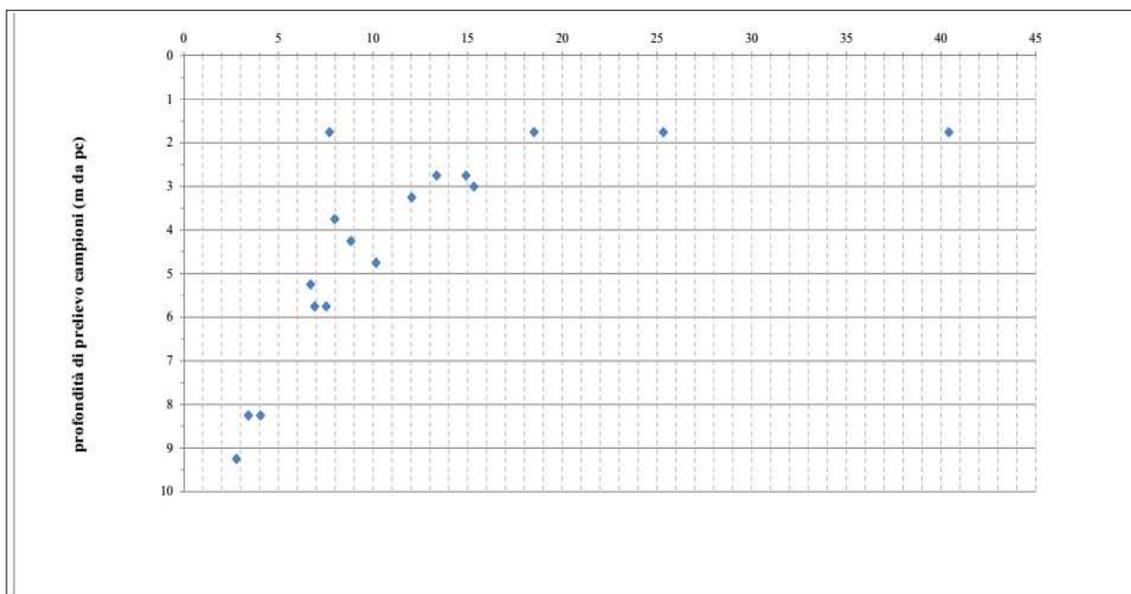


Figura 9 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi ubicati all'interno dell'area di base della duna.

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 campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove

penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;

4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

Nel caso in esame, come riassunto nella tabella 10 seguente, è possibile non effettuare la verifica a liquefazione.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa in superficie	0,133	SI	Vedi allegato C
2	Profondità falda	>10,0 m	SI	Informazioni da sondaggi
3	$(N_1)_{60}$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Le distribuzioni ricadono al di fuori dei limiti

Tabella 10 - Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

In merito al punto 4, si precisa che l'analisi delle curve granulometriche (si vedano i certificati di laboratorio nell'Allegato A) dei campioni dei sondaggi realizzati in corrispondenza dell'impronta della duna anti rumore in progetto, permette di affermare quanto segue:

- il coefficiente di uniformità (rapporto D_{60}/D_{10} , dove D_{60} e D_{10} sono il diametro delle particelle corrispondenti rispettivamente al 60% e al 10% del passante sulla curva granulometrica cumulativa) risulta $U_c > 3,5$;
- le curve cumulative (in viola) presentano un passante sistematicamente superiore a 90%÷95% per la frazione fine (risultando quasi sempre argilla con limo secondo la descrizione A.G.I. 1963), quindi posizionandosi esternamente rispetto alla composizione granulometrica determinante la condizione di possibilità di liquefazione.

12. Terre e rocce da scavo

L'opera in progetto è una duna anti rumore realizzata in terra. 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 relativo solamente allo scotico 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 allo scotico del terreno vegetale 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 bel più profonde dei fondo 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 di una duna anti rumore a protezione del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino (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, 2015, 2017*) è stato elaborato il modello geologico e geotecnico (§ 10) del sottosuolo indicando i valori caratteristici dei parametri geotecnici (§ 10.3.1) 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 ipotizzati, sono stati forniti i parametri dell'azione sismica locale (riportati nell'allegato A, parte C).

Firenze, marzo 2024

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., Suppl. 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.

* * *