



FERROVIE EMILIA ROMAGNA

**Linea SFM2 Bologna-Portomaggiore: adeguamento della progettazione definitiva e coordinamento per sicurezza in fase di progettazione per la realizzazione del completamento dell'interramento della tratta urbana di Bologna della Linea SFM2 Bologna-Portomaggiore e Redazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica relativo al raddoppio del binario tra la fermata di Bologna-Via Larga e la stazione di Budrio (CIG 754332765C).**

## PROGETTO DEFINITIVO



### STUDI E INDAGINI

#### GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA E GEOTECNICA

#### RELAZIONE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

CARTELLA N° 2.1

FER BP D T0 GEO GEN R 002 0



DATA	CODICE RELAZIONE		REV.
31/10/2019	FER BP D T0	GEO GEN R 002	0

AGGIORNAMENTI						
REV	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	Emissione finale	31-10-19	L. Landolfi	A. Eusebio	A. Dematteis	V. Floria

<p><u>Responsabile del progetto e dell'integrazione fra le prestazioni specialistiche:</u></p> <p><b>Ing. Vincenza Floria</b> Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino, n. 8042 (Firmato digitalmente)</p>	<p><u>Il Geologo:</u></p> <p><b>Dr. Antonio Dematteis</b> Ordine dei Geologi del Piemonte, n. 400 (Firmato digitalmente)</p>	<p><u>Il Responsabile Unico del Procedimento:</u></p> <p><b>Ing. Fabrizio Maccari</b> (Firmato digitalmente)</p>
--	--	--

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>Assetto strutturale.....</b>	<b>10</b>
3.1.1	Area pedeappenninica o collinare.....	10
3.1.2	Area di alta pianura .....	11
3.1.3	Area di bassa pianura.....	11
<b>3.2</b>	<b>Geomorfologia .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>Geologia .....</b>	<b>13</b>
3.3.1	Contesto regionale .....	13
3.3.2	Unità continentali .....	14
3.3.3	Unità marine .....	15
3.3.4	Depositi quaternari continentali .....	15
<b>3.4</b>	<b>Idrologia superficiale .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>SISMICITÀ.....</b>	<b>19</b>
4.1	Profilo stratigrafico .....	19
4.2	Parametri di input sismico.....	20
<b>5</b>	<b>IDROGEOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Unità idrogeologiche.....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>Dati esistenti .....</b>	<b>27</b>
5.2.1	Banca dati RER .....	27
5.2.2	Indagini Autostrada A14 .....	28
5.2.3	Indagini idrogeologiche FER .....	28
5.2.4	Aggressività delle acque sul calcestruzzo.....	30
<b>5.3</b>	<b>Caratterizzazione della permeabilità .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4</b>	<b>Risposta alle prescrizioni del Comune di Bologna e dell'A.R.P.A. ....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>INDAGINI GEOGNOSTICHE.....</b>	<b>35</b>
6.1	Indagini della banca dati RER .....	35
6.2	Indagini Autostrada A14 .....	36
6.3	Sondaggi FER.....	37
6.4	Prove di laboratorio FER .....	40

<b>7</b>	<b>RISULTATI DELLE INDAGINI.....</b>	<b>43</b>
7.1	Prove penetrometriche standard SPT .....	43
7.2	Sondaggi MASW e HVSR.....	44
7.3	Analisi granulometriche e caratteristiche di plasticità.....	44
<b>8</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....</b>	<b>45</b>
8.1	Individuazione e descrizione delle unità geotecniche.....	45
8.2	Terreno superficiale di riporto (TR) .....	45
8.3	Unità A - Ghiaia e sabbia .....	46
8.4	Unità B - Limo e argilla.....	50
8.5	Sintesi della caratterizzazione geotecnica.....	55
<b>9</b>	<b>ZONAZIONE GEOTECNICA LUNGO IL TRACCIATO.....</b>	<b>57</b>
9.1	Tratta 1 - Tra la galleria esistente Zanolini (Pk 2+029,65) e la Fermata Rimesse (Pk 3+354,59) .....	57
9.1.1	GN Bentivogli e Fermata Libia.....	59
9.1.2	Fermata Rimesse .....	59
9.2	Tratta 2 - Fermata Via Larga (tra Pk 4+000,00 e Pk 5+100,00).....	60
9.2.1	Fermata via Larga .....	61
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>62</b>

## ALLEGATI

Allegato 1 - Indagini geognostiche realizzate da FER - Indagini eseguite per il Progetto Definitivo 2014 – SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO E POZZETTI ESPLORATIVI (35 pagine).

Allegato 2 - Indagini geognostiche realizzate da FER - Indagini eseguite per il Progetto Definitivo 2014 - REALIZIONE GEOLOGICO-SISMICA approfondimenti di III livello dal RER 112/2007 codice D0L0DPGGE003 (191 pagine).

Allegato 3 - Indagini geognostiche realizzate da FER - Indagini eseguite per il Progetto Definitivo 2014 - PROVE DI LABORATORIO (293 pagine).

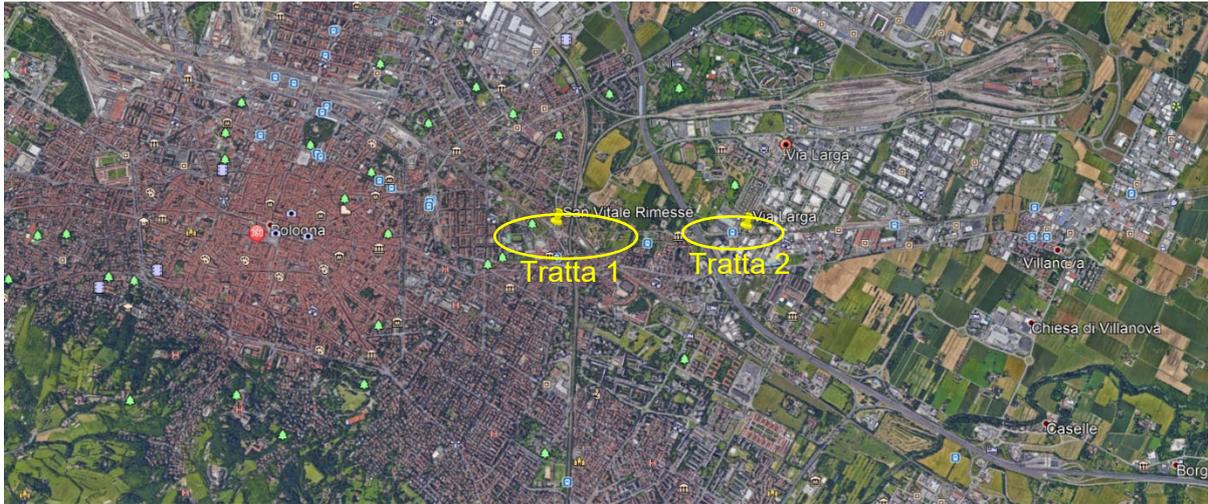
Allegato 4 - Indagini geognostiche realizzate da FER - Indagini eseguite per il Progetto Definitivo 2019 - SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO e prove in foro (71 pagine).

Allegato 5 - Indagini geognostiche realizzate da FER - Indagini eseguite per il Progetto Definitivo 2019 - PROVE DI LABORATORIO (108 pagine).

Allegato 6 - Indagini geognostiche estratte dalla banca dati RER - Sondaggi e pozzi estratti in un buffer di 350 m per lato alla Linea (168 pagine).

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione si inquadra nell'ambito dell'incarico assegnato dalle Ferrovie Emilia-Romagna (FER) all'Associazione temporanea di imprese Geodata Engineering, Net Engineering e Siteco per l'adeguamento della progettazione definitiva del completamento dell'interramento della Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore, nelle tratte urbane di Bologna denominate: Tratta 1 Zanolini-Rimesse e Tratta 2 Via Larga.



**Figura 1: Ubicazione del sito in progetto su immagine satellitare GoogleEarth®.**

La tratta 1 Zanolini-Rimesse è compresa tra le progressive km 2+029,65 e km 3+354,59 della linea, e prevede la realizzazione del completamento della galleria Zanolini, già realizzata, il rifacimento delle fermate Libia e Rimesse e l'intervento di eliminazione del passaggio a livello di via Rimesse mediante l'interramento della linea.

La tratta 2 Via Larga è compresa tra le progressive km 4+000,00 e km 5+100,00 in corrispondenza dei passaggi a livello di via Cellini e via Larga e consiste nell'abbassamento del binario esistente in corrispondenza della nuova fermata di via Larga e nel rimodellamento di via Scandellara, funzionale alla realizzazione di un parcheggio e di una nuova pista ciclo-pedonale.



**Figura 2: Corografia dell'intervento di interrimento.**

Scopo della presente relazione è illustrare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche dei settori di interessati dalle opere in progetto, presentare i risultati delle indagini eseguite in sito ed in laboratorio mediante carotaggi, pozzetti esplorativi, geofisica e prelievo di campioni, al fine di fornire la caratterizzazione geotecnica dei materiali interessati dalle opere necessaria per i calcoli di progettazione.

Facendo riferimento alla conferenza dei servizi del Progetto Definitivo realizzata nel 2014-2015, questa relazione risponde alle prescrizioni del Comune di Bologna e dell'A.R.P.A. Sezione Provinciale di Bologna inerenti alle acque sotterranee.

Unitamente a questa relazione ed ai suoi allegati, la parte geologica del Progetto Definitivo è illustrata anche dai seguenti documenti, ai quali occorre fare riferimento:

FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_001	Corografia dei bacini
FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_002	Carta geologica
FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_003	Carta idrogeologica
FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_004	Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche
FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_005	Profilo geologico tratta T1
FER_BP_D_T0_GEO_GEN_S_006	Profilo geologico tratta T2

## 2 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Gli studi esposti nella presente relazione sono stati effettuati nel rispetto della Normativa in vigore, ed in particolare:

- D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni";
- D.M. 11 marzo 1988 "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" e successive istruzioni (superato dalla normativa DM17/1/2018 e circolare esplicativa);
- Legge Quadro in materia di Lavori Pubblici 11 febbraio 1994 n. 109 e s.m.i.;
- D.P.R. 21 dicembre 1999 n. 554 "Regolamento di Attuazione della legge quadro in materia di Lavori Pubblici 11 febbraio 1994 n. 109 e s.m.i.";
- Legge 21 dicembre 2001, n. 443 "Delega al Governo in materia di infrastrutture ed insediamenti produttivi strategici ed altri interventi per il rilancio delle attività produttive" pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 299 del 27 dicembre 2001, Suppl. Ordinario n.279;
- Dlgs 190/2002 - "Attuazione della legge 21 dicembre 2001, n. 443, per la realizzazione delle infrastrutture e degli insediamenti produttivi strategici e di interesse nazionale" pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 199 del 26 agosto 2002 – Supplemento Ordinario n. 174;
- C.M.L.P. n. 2535 e applicazione delle norme 25/11/1962 n. 1684, legge 2 febbraio 1974 n. 64 "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche";
- O.P.C.M. n. 2788 (12/06/1998) "Individuazione delle zone ad elevato rischio sismico del territorio nazionale";
- O.P.C.M. n. 3274 (20/03/2003) "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica";
- D.L. 5 Febbraio 1997, N.22 – Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio. (G.U. 15-2-1997, n.38-suppl) modificato ed integrato ai sensi del D.L. 8 Novembre 1997, N.389 (G.U. 8-11-1997, n.261);
- D. L. 5 Febbraio 1998 – Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli artt.31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n.22 (G.U. 16-4-1998, n.88 – suppl.).

### 3 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Il contenuto di questo capitolo è tratto in larga parte dalla relazione geologica a corredo del Progetto Definitivo 2009, prodotta dal dott. Cocetti dello Studio Geologico COGEO, aggiornato sulla base della nuova cartografia geologica alla scala 1:50.000 del progetto CARG.

L'inquadramento geologico regionale si avvale della revisione bibliografica della letteratura scientifica e dei dati della banca dati della Regione Emilia-Romagna, consistenti in prove geognostiche e sondaggi svolti nell'area del progetto ed in aree limitrofe. Inoltre, sono state utilizzate prove penetrometriche statiche, sondaggi a carotaggio continuo e dati provenienti da analisi di laboratorio realizzati appositamente per questo progetto. Questi dati hanno permesso di ottenere il quadro geologico regionale e l'analisi geologico tecnica di dettaglio nei primi 30 metri di sottosuolo interessato dalle opere in progetto.

Il contesto regionale è descritto nel seguito in un intorno sufficientemente ampio, che comprende l'alta pianura bolognese.

La città di Bologna sorge sui sedimenti alluvionali di due fiumi principali, Reno (ad Ovest) e Savena (ad Est) e di corsi minori tra essi compresi: Meloncello, Ravone, Valle Scura, Aposa, Fossa Cavallina, Grotte. I fiumi Reno e Savena rappresentano il riferimento geografico principale dell'area di studio.

I depositi alluvionali (conoidi), che raggiungono spessori massimi di 300-400 metri, sono costituiti da alternanze di sedimenti grossolani (ghiaie, sabbie) e fini (limi) per spessori il cui ordine di grandezza varia dalla decina al centinaio di metri.

Nella figura seguente è mostrato un estratto della cartografia geologica di Stato, con la relativa legenda che descrive la stratigrafia locale di riferimento.

**CARTA GEOLOGICA D'ITALIA SCALA 1:50.000 (PORGETTO CARG) - FOGLIO N. 221 BOLOGNA,**



**LEGENDA**

**DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI  
PRIVI DI UNA FORMALE CONNOTAZIONE STRATIGRAFICA**

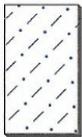
**SISTEMI DEPOSIZIONALI E LITOLOGIE (in AES<sub>8</sub>, AES<sub>8a</sub>, AES<sub>7a</sub>, AES<sub>7b</sub>)**

**DEPOSITI ALLUVIONALI**

**PIANA INTRAVALLIVA, CONOIDE E PIANA ALLUVIONALE**

Sabbie e limi di canale, argine e rotta fluviale

Sabbie da finissime a grossolane, localmente limose, in strati a base erosiva, da sottili a molto spessi, a stratificazione obliqua concava, alternate a limi, limi sabbiosi e subordinatamente limi argillosi, in strati molto sottili e sottili. Alla base di sequenze positive a base erosiva sono presenti sabbie molto grossolane a stratificazione obliqua concava e, localmente, ghiaie. Formano corpi sedimentari a geometria prevalentemente nastriforme e tabulare-allungata in AES<sub>8a</sub> e tabulare (depositi sabbiosi di conoide alluvionale) in AES<sub>8</sub>. Passano lateralmente e verticalmente verso il basso a depositi di piana inondabile, definendo caratteristiche sequenze negative e negativo-positive. Il rapporto sabbia/limo, generalmente superiore a 1, varia sensibilmente (valori inferiori a 1 sono registrati in AES<sub>8</sub> nell'area di Medicina). In depositi di canale, argine e rotta fluviale riferibili al reticolo idrografico secondario, le sabbie sono nettamente subordinate rispetto al limo.



**S U C C E S S I O N E P O S T - E V A P O R I T I C A D E L M A R G I N E  
P A D A N O - A D R I A T I C O**

**S U P E R S I N T E M A E M I L I A N O - R O M A G N O L O**

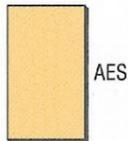
Depositi alluvionali e deltizi organizzati in successioni cicliche di vario ordine gerarchico. Limite inferiore inconforme, non affiorante, sulle Sabbie di Imola (IMO). Limite superiore coincidente col piano topografico. Comprende il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES). Spessore massimo: circa 470 m nel sottosuolo.

**PLEISTOCENE MEDIO-OLOCENE; (~ 700.000 anni BP - Attuale).**

**SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE**

Ghiaie, sabbie, limi ed argille di terrazzo alluvionale, conoide alluvionale e piana alluvionale. L'unità è parzialmente suddivisa in subsistemi (AES<sub>8</sub>, AES<sub>7</sub>, AES<sub>6</sub> ed AES<sub>5</sub>). Ogni subsistema è limitato in affioramento da una scarpata di terrazzo fluviale, lateralmente correlata a paleosuoli sviluppati al tetto di depositi di terrazzo. I depositi prevalentemente fini di piana alluvionale presenti in alcuni settori del margine appenninico non sono differenziati in subsistemi. Limite inferiore inconforme sulle sottostanti unità marine. Limite superiore coincidente col piano topografico. Spessore massimo in affioramento di alcune decine di metri.

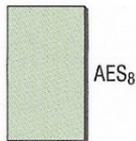
**PLEISTOCENE MEDIO-OLOCENE (~ 400.000 anni BP - Attuale)**



**Subsistema di Ravenna**

Elemento sommitale di AES. Ghiaie, sabbie, limi ed argille di terrazzo alluvionale, conoide alluvionale e piana alluvionale. Limite inferiore inconforme su AES<sub>7</sub> e sulle sottostanti unità marine. Limite superiore coincidente col piano topografico e costituito da un suolo relativamente poco evoluto, non calcareo, con fronte di alterazione compreso tra 0,5 e 1,5 m (Inceptisuolo) e contenente reperti archeologici di età dal Neolitico al Romano, oppure da un suolo poco evoluto, calcareo (Entisuolo). La presenza di quest'ultimo identifica localmente l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). Spessore massimo: 20 m.

**PLEISTOCENE SUP.-OLOCENE (12 ka - Attuale)**, definita su base radiometrica. Dove l'unità di Modena non è presente, il tetto del Subsistema di Ravenna è datato su base archeologica e radiometrica al periodo romano.

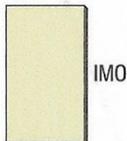


**SABBIE DI IMOLA**

Sabbie giallastre fini e finissime, subordinatamente medie e grossolane, in strati generalmente amalgamati, con rare intercalazioni pelitiche discontinue, di spessore centimetrico e decimetrico, e rari livelli centimetrici di ciottoli. Si interdigitano sabbie fini e medie, intercalate a ghiaie di spessore generalmente decimetrico, che localmente costituiscono corpi lenticolari spessi alcuni metri. Ambiente deposizionale costiero (spiaggia e delta-conoide). Spessore massimo di quasi 50 m. Contatto basale erosivo e discordante, contatto di tetto erosivo e discordante.

**PLEISTOCENE INF. E MEDIO**

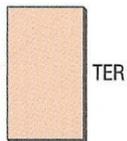
In posizione circa intermedia è presente il membro di Fossoveggia.



**FORMAZIONE DEL TERMINA**

Marne argillose, talora siltose, fossilifere (con Lamellibranchi, Gasteropodi, Echinidi piritizzati), grigio-scure, localmente bituminose; stratificazione sottile e sottilissima, spesso indefinita per scarsa classazione granulometrica e bioturbazione; sporadici strati medi e sottili di arenarie gradate marroni o grigie, con granulometria media e grossolana, ricche in bioclasti e glauconite. Frequenti depositi caotici per risedimentazione in massa. Rari strati medi di arenarie carbonatiche giallastre. Alla base sono presenti, localmente, corpi lenticolari di arenarie glauconitiche. Nella parte alta affiorano, raramente, peliti nerastre con lamine piano-parallele, bituminose, alternate a biosiltiti grigio chiaro o biancastre. Sedimentazione di scarpata e piattaforma esterna, con locali condizioni euxiniche. Lo spessore massimo supera i 500 m. Limite inferiore netto su CIG, tettonico con AVS e PAT.

**TORTONIANO-MESSINIANO INF.**



**Figura 3. Estratto dal Foglio n. 221 Bologna della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG, Fonte: <http://www.isprambiente.gov.it>).**

### 3.1 Assetto strutturale

Il territorio della Provincia di Bologna, oltre che dal citato progetto CARG, è illustrato geologicamente nei Fogli 87 (BOLOGNA), 88 (IMOLA), 75 (MIRANDOLA) e 76 (FERRARA) della Carta Geologica d'Italia e nelle relative note illustrative comprende quattro aree ben distinte:

- 1) appenninica o montana;
- 2) pedeappenninica o collinare;
- 3) alta pianura;
- 4) bassa pianura.

Tralasciamo la descrizione dell'area appenninica o montana che non interessa ai fini di questo studio e analizziamo le altre tre aree.

#### 3.1.1 Area pedeappenninica o collinare.

Le sue parti più marginali sono in stretta relazione con quelle profonde dell'antistante pianura. In essa sono riconoscibili due strutture principali:

- Bacino sinclinalico pliocenico interno;
- Fascia di anticlinali marginali.

Il Bacino sinclinalico pliocenico interno si estende dall'imolese al modenese, tra le valli dell'Idice e del Panaro, ed è composto in prevalenza da limi argillosi con episodi ghiaiosi, di ambiente epinritico e litoraneo (Pliocene medio e superiore), passanti, verso l'alto a termini deltizi e fluvio-palustri.

Il Fascio di pieghe anticlinaliche marginali ha un nucleo miocenico ed è interposto fra la struttura precedente e l'alta pianura. Questo sistema risulta notevolmente disturbato dal punto di vista tettonico e si presenta dislocato orizzontalmente in senso antiappenninico. Gli assi principali passano per M. Capra. S. Luca e M. Calvo. Queste strutture sono state messe in luce dalla regressione dell'apice dei conoidi, dovuta alle alluvioni della pianura antistante, che ha eroso i terreni più teneri, raggiungendo il nucleo costituito da litotipi più compatti.

Si sono venuti così a creare degli sbarramenti idraulici, costituiti da livelli di arenarie o di marne che non permettono una continuità delle alluvioni di fondovalle e isolano le parti apicali dei conoidi dalle loro porzioni mediane o distali. Questa condizione strutturale ha determinato una suddivisione del conoide, in due parti distinte: una a monte generalmente poco sviluppata, l'altra mediana, a valle, di più ampie dimensioni e di rilevante spessore, fatto questo favorito dai fenomeni di subsidenza, verificatisi in passato e tuttora in atto sul margine dell'alta pianura.

Anche il consistente deflusso di subalveo, instauratosi a causa dell'infiltrazione di acqua nella parte apicale del conoide non può proseguire verso le falde più profonde, poste a valle: le acque sono così costrette a riemergere.

Il margine pedemontano del rilievo collinare è inoltre caratterizzato, in Provincia di Bologna, dalla presenza di una grande faglia, tuttora attiva, il cui allineamento è ben visibile anche da satellite. Si tratta di una dislocazione che borda tutto il margine appenninico da Faenza a Bologna e che, come motivo strutturale sepolto, si complica andando verso la pianura modenese. Questa faglia costituisce un elemento di separazione tra l'area appenninica bolognese, in sollevamento, e l'antistante pianura subsidente. Essa forma una importante scarpata morfostrutturale, orientata NO-SE, a cui sono addossati i depositi, prima deltizi, poi

continentali provenienti dalla catena appenninica e che formano i sedimenti più permeabili del locale acquifero.

Le argille e i silt del Pliocene superiore, che orlano il rilievo collinare, sono ricoperti, in trasgressione, da termini limoso-sabbiosi del Pleistocene, la cui immersione verso la pianura è di 15°-18°. Su di essi poggia, ancora trasgressivamente, una successione di depositi sabbiosi e ciottolosi giallo arancio, che immergono con assetto monoclinale verso NE, con inclinazione di 12°-15°. Su questi ultimi insistono localmente, come ad esempio ad ovest del Fiume Reno, a chiusura del ciclo marino, depositi fluviali e deltizi quaternari, ad assetto pressoché orizzontale.

### 3.1.2 Area di alta pianura

Essa è costituita, in superficie, da depositi a matrice ghiaioso- sabbiosa e limoso-siltosa, nelle zone intermedie di minore energia, ricoperti da vari tipi di suoli.

L'ambiente deposizionale, in prossimità della superficie, è fluviale-continentale, con alvei a canali frequenti e con tendenza allo sviluppo di meandri. Ad alcune decine di metri di profondità l'ambiente diventa sempre più di pianura alluvionale e costiera, con frequenti paludi e, localmente, piccoli specchi d'acqua dolce o addirittura salmastra.

Queste osservazioni sono state possibili grazie alla presenza di numerose cave per estrazione di inerti, profonde fino a 30 m o più, come nella zona di Borgo Panigale.

### 3.1.3 Area di bassa pianura.

Essa è caratterizzata da strutture plicative sepolte accompagnate da faglie. Le principali strutture sono le anticlinali di Anzola, di Budrio, di Imola, di Selva e di Lugo e le sinclinali di Bologna e di Conselice.

Nell'area in esame sono presenti fenomeni tettonici recenti o attuali, tra i quali faglie appenniniche, di cui la più importante è la pedecollinare, più sopra ricordata, e una serie di dislocazioni N-S, generalmente corrispondenti agli assi vallivi, che, molto probabilmente proseguono anche al di sotto della copertura alluvionale della pianura, come è stato già evidenziato da recenti studi neotettonici eseguiti nell'area modenese. A seconda della maggiore o minore importanza di tali dislocazioni, tra valli contigue si vengono a formare 'blocchi' a sollevamento differenziato, che influenzano l'idrografia e lo sviluppo dei conoidi.

Più in generale, il sollevamento recente della catena appenninica assume valori rilevanti, in assoluto, proprio in corrispondenza dei suoi margini collinari, per il contemporaneo abbassamento delle contigue zone di pianura. In corrispondenza di Bologna e del suo territorio, infatti, sono stati recentemente evidenziati alcuni tra i massimi valori di subsidenza dell'Emilia-Romagna (dal 1950 al 1970 3,5 cm/anno a Castelmaggiore, ad Argelato e a Cento, 0,5 a S. Agostino, 1,5 a Malalbergo e Molinella e 5-6 nel settore nord di Bologna).

Va però precisato che l'attuale componente prevalente è da mettere in relazione con l'estrazione di fluidi dal sottosuolo. A causa del sollevamento differenziale paleoconoidi dei fiumi più importanti dell' area, quali Reno e Santerno, possiedono forma lineare ed infossata e per questo motivo i depositi più grossolani in loro corrispondenza, sono potenti anche centinaia di metri.

Da un punto di vista regionale, i depositi continentali in questo settore sono maggiori rispetto a quelli esistenti nel contiguo territorio modenese e reggiano, dove probabilmente l'erosione della catena appenninica si è stata meno accentuata, forse per una minore elevazione.

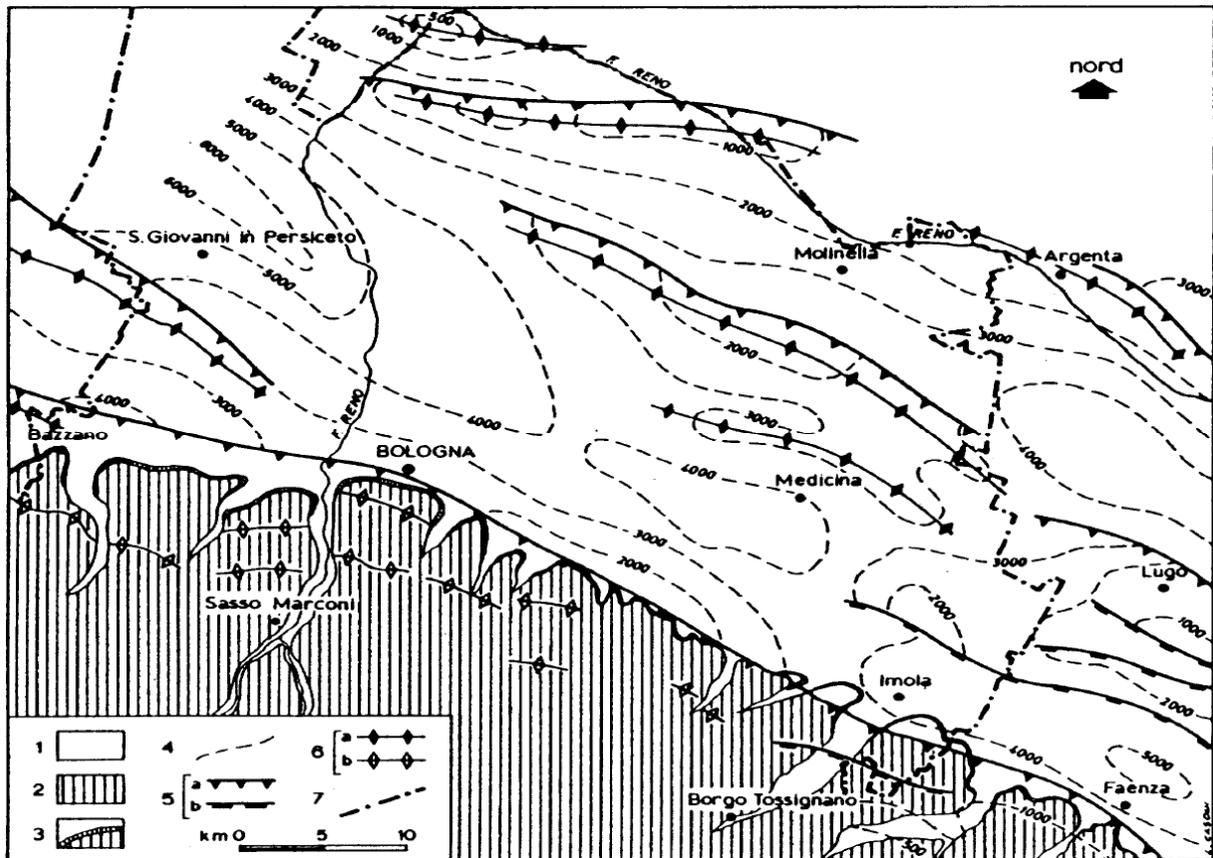


Figura 4. Schema strutturale 1) Pianura: depositi continentali (Olocene Pleistocene); 2) zona collinare: depositi marini costituiti da sabbie, ghiaie, conglomerati, marne e argille grigio azzurre (Miocene, Pliocene, Pleistocene); 3) Margine della zona collinare; 4) isoipse della base del Pliocene; 5) faglie sepolte: a- dirette, b- inverse; 6) assi di anticlinali: a- sepolte; b- affioranti; 7) limite di Provincia.

### 3.2 Geomorfologia

L'analisi morfologica si è basata sull'esame della cartografia esistente e in particolare della C.T.R. a scala 1: 10.000.

Le pendenze passano da valori superiori al 25% nell'alta pianura comprendente i conoidi, a valori di 0,1-0,2% nella porzione più esterna. La variazione risulta in genere graduale, anche se è visibile una marcata rottura di pendenza attorno all'isoipsa 45-50 m s.l.m. L'area pedecollinare bolognese risulta modellata dai due conoidi maggiori: quello del Fiume Reno a ovest e quello del T. Sovena a est; fra questi si interpongono i conoidi minori del T. Ravone, del Rio Meloncello, del T. Aposa e della Fossa Cavallina.

I conoidi minori, derivati da modesti corsi d'acqua, risultano ancora chiaramente riconoscibili seppur meno pronunciati e continuamente rimodellati dall'azione antropica.

Il conoide del F. Reno appare, nella geometria complessiva dei suoi depositi, di forma ristretta e allungata e si estende nella pianura per oltre 10 km: mostra comunque delle lobature marginali, legate a rotte o deviazioni del corso, corrispondenti nel sottosuolo a dossi ghiaioso sabbiosi.

La parte apicale del conoide presenta almeno tre ordini di terrazzi che convergono e si annullano a 4 km dal margine della pianura.

Sempre in questo tratto l'alveo è inciso nel substrato marino mio-pliocenico e presenta, nel suo andamento meandriforme, due brusche deviazioni, una a Casalecchio e l'altra a Casteldebole, che potrebbero derivare da eventi neotettonici (Francavilla-Colombetti, 1980).

Dopo un breve tratto rettilineo, l'alveo prosegue più a nord con caratteristiche sia meandriformi che di canali intrecciati, con barre laterali e di canale (Ori, 1979).

Al margine nord dell'area studiata appare notevole il meandro abbandonato del Trebbo; sono inoltre riconoscibili lungo il percorso mediano, a valle della via Emilia, altre anse ora inattive per gli interventi di bonifica idraulica e per la ripresa dell'attività erosiva di fondo, particolarmente evidente negli anni recenti.

Il conoide del F. Reno, accompagnato in sinistra da quello del T. Lavino (in gran parte esterno all'area considerata) appare solcato da una marcata depressione centrale nelle alluvioni oloceniche, indizio di una ripresa erosiva (Ori, 1979). Nel settore occidentale si sviluppano alcune dorsali, che potrebbero corrispondere a paleo- alvei alimentati dalle acque del T. Lavina.

Ad est del conoide del Fiume Reno sono ricostruibili altri quattro conoidi di corsi d'acqua minori, il Rio Meloncello, il T. Ravone, il T. Aposa e la Fossa Cavallina: i loro limiti risultano comunque molto incerti, sia per la modesta entità dei depositi, sia per l'alto grado di antropizzazione subita in tempi storici.

Il T. Ravone presenta una marcata dorsale che si flette verso ovest, a confluire nel F. Reno.

Il conoide dell'Aposa, che occupa il nucleo antico della città, mostra diverse dorsali divergenti, che segnano gli antichi percorsi del torrente. Nel suo alveo è stato aperto il Canale Navile, che occupa una depressione posta sul lato ovest del conoide.

Il conoide del Savena, più prossimo all'area del progetto, mostra, con la sua forma a ventaglio, le numerose deviazioni che ha subito nel tempo il corso d'acqua: oltre al tracciato storico (seguito sino al 1776 e tuttora attivo nella sua parte più settentrionale), si individuano numerose dorsali coincidenti con assi di deflusso, certamente ancora attivi in periodi recenti, preromani o romani.

Attualmente il Savena segue un tracciato, in parte artificiale, che ricalca l'alveo del Rio Polo, esterno alla parte più rilevata del conoide. I terrazzi scompaiono a 2 km dal margine collinare.

Nel tratto intravallivo è presente una brusca deviazione dell'alveo verso est, con orientamento analogo a quello del F. Reno.

La disposizione generale degli alvei e delle strutture morfologiche di origine deposizionale (dorsali), segue un modello alquanto disperso, che solo in parte, nella sua impostazione generale appare controllato da fattori tettonici, quali le linee antiappenniniche messe in luce da foto da satellite (Francavilla e Colombetti, 1980).

In conclusione, nell'area studiata appare modesta l'influenza neotettonica mentre appare prevalente il fattore deposizionale.

### **3.3 Geologia**

#### **3.3.1 Contesto regionale**

L'area in oggetto è compresa fra il Fiume Reno a ovest e il Torrente Savena ad est e il margine appenninico a sud.

Nella porzione di territorio collinare affiorano, in giacitura tettonicamente complessa, terreni marini di età compresa tra il Miocene medio e il Pleistocene superiore. Le unità della fascia più esterna, in più stretto rapporto con quelle dell'antistante pianura, sono in parte alloctone e in parte autoctone o di alloctonia pliocenica quaternaria.

Le unità alloctone sono costituite da materiali liguridi caotici (Argille Scagliose), su cui poggiano, in assetto per lo più disarticolato, unità della cosiddetta successione emiliana, ossia: Marne di Antognola, Arenarie di Bismantova, qui in facies di "*Schlier*", Marne del Termina. La loro messa in posto sul margine padano avvenne in età compresa tra il Miocene medio ed il Pleistocene e riporta fasi sia gravitative sia compressive (Ricci Lucchi et al, 1982).

Le unità autoctone o semi alloctone compaiono in due aree distinte: la prima interna con giacitura sinclinalica (bacino intrappenninico bolognese); la seconda esterna con giacitura monoclinale. Quest'ultima unità comprende la formazione Gessoso-solfifera, con gessi selenitici e argille, i depositi argillosi dei cicli pliocenico inferiore e pliocenico medio superiore e, in trasgressione su questi, depositi litorali-continentali, sabbioso conglomeratici.

Il bacino intrappenninico è invece formato da sedimenti alluvionali o deltizio-costieri con livelli palustri (Ricci Lucchi et al., 1981), e da depositi litorali e infralitorali sabbioso pelitici. Nell'area di pianura, le unità costituenti il substrato dei depositi alluvionali sono note in parte dagli affioramenti messi in luce dalle incisioni degli alvei e in parte da sondaggi profondi dell' AGIP.

Il Quaternario marino, rappresentato dalle Sabbie di Asti o depositi sabbiosi costieri, ricopre con uno spessore di poco inferiore agli 800 m sedimenti pelitici di scarpata (Argille del Santerno) (Dondi, Mostardini e Rizzini, 1982).

Il Pliocene è formato da torbiditi prevalentemente sabbiose e sciolte, appartenenti alla Formazione di Porto Garibaldi (Pliocene medio-superiore) e da torbiditi con alternanze regolari di sabbie e argille della Formazione di Porto Corsini (Pliocene inferiore).

Le unità liguridi si intercalano a livello del Pleistocene medio-inferiore e giungono ad una distanza di circa 3 km dal bordo appenninico. La fascia di pianura è fortemente subsidente, raggiungendo nell'intervallo Pliocene-attuale, i 6000 m di depositi in corrispondenza della sinclinale bolognese.

Il limite tra l'area collinare e quella di pianura è marcato da una grande faglia inversa attiva (sovrascorrimento pedeappenninico) formante un importante elemento morfostrutturale e separante le due unità, una in sollevamento e l'altra subsidente. La porzione collinare, che appare interessata anche da movimenti di basculamento e blando piegamento, è smembrata da faglie antiappenniniche.

### 3.3.2 Unità continentali

Nel settore occidentale si sviluppa un unico grande lobo ghiaioso allungato, il cui asse è coincidente con l'alveo attuale del Reno. Il corpo mostra un'interruzione ed una marcata strozzatura a N di Casalecchio, dove il fiume si addossa ai rilievi collinari con una brusca deviazione. Lateralmente in sinistra si sviluppa la parte terminale, sabbiosa, del conoide del Lavino; verso nord il corpo ghiaioso è bordato da lobi sabbiosi a direzioni divergenti, coincidenti in profondità con dossi ghiaiosi. Loam e argilla occupano le parti esterne, laterali e distali del conoide, con varie irregolarità connesse all'influenza dei corsi d'acqua minori.

Nel settore orientale, allo sbocco nella valle del Savena, i materiali più grossolani si dispongono secondo due lobi, uno dei quali, diretto verso nord, e in asse con l'antico corso del fiume attivo sino al 18° secolo. L'altro, in direzione ENE (in direzione di Budrio), coincide all'incirca con il corso attuale: questo deriva da una diversione operata tra il 1776 ed il 1777

che ha portato il fiume a confluire nell'Idice, secondo un tracciato corrispondente in parte ad un piccolo corso d'acqua ed in parte ad un più antico alveo dello stesso Savena.

I sedimenti sabbiosi presentano una distribuzione più articolata, che ricalca su una estensione più ampia quella delle ghiaie; oltre a tre lobi o lingue a direzione raggiata, si distingue una lingua ad andamento anomalo, W-E, trasversale rispetto al decorso degli assi fluviali pedeappenninici, che può indicare un antico percorso: tale ipotesi trova conferma dell'esame dei corpi più profondi.

I corsi d'acqua minori non danno, a livello di litologia superficiale, depositi sufficientemente caratterizzati, tali da fornire indicazioni sull'evoluzione degli alvei: si tratta di sedimenti limo-argillosi che solo in profondità in corrispondenza degli apici delle conoidi passano a sedimenti più grossolani, sabbiosi e subordinatamente ghiaiosi. Nell'insieme le aree con terreni superficiali francamente argillosi tendono a formare corpi isolati, in connessione con anti che plaghe palustri.

Dal confronto tra i dati morfologici e la litologia superficiale si rileva che se da un lato esiste una generale coincidenza tra alti morfologici e tipi litologici più grossolani, dall'altro, talvolta, le dorsali non coincidono con gli assi dei lobi ghiaioso-sabbiosi, come nel caso del T. Savena. In tale caso la loro formazione può essere ascritta a processi di compattazione differenziata legati alla presenza nei livelli più profondi di sedimenti a composizione e compressibilità variabili. Pertanto, la morfologia superficiale nel suo insieme può qui derivare congiuntamente sia dai più recenti atti deposizionali (ossia alti che coincidono con gli assi fluviali recenti o attuali), sia dall'assestamento complessivo dell'intero corpo alluvionale.

### 3.3.3 Unità marine

Le unità marine del substrato sono profondamente ribassate da una faglia E-W coincidente con il margine del rilievo collinare.

Nella zona ribassata della pianura non si hanno chiare indicazioni sui rapporti stratigrafici tra unità marine e copertura alluvionale.

Nell'alveo inciso del Fiume Reno, all'apice del conoide, compaiono terreni mio pliocenici argilloso marnosi (Schlier e Argille Azzurre plioceniche), interrotti bruscamente verso la pianura dalla faglia sopra descritta.

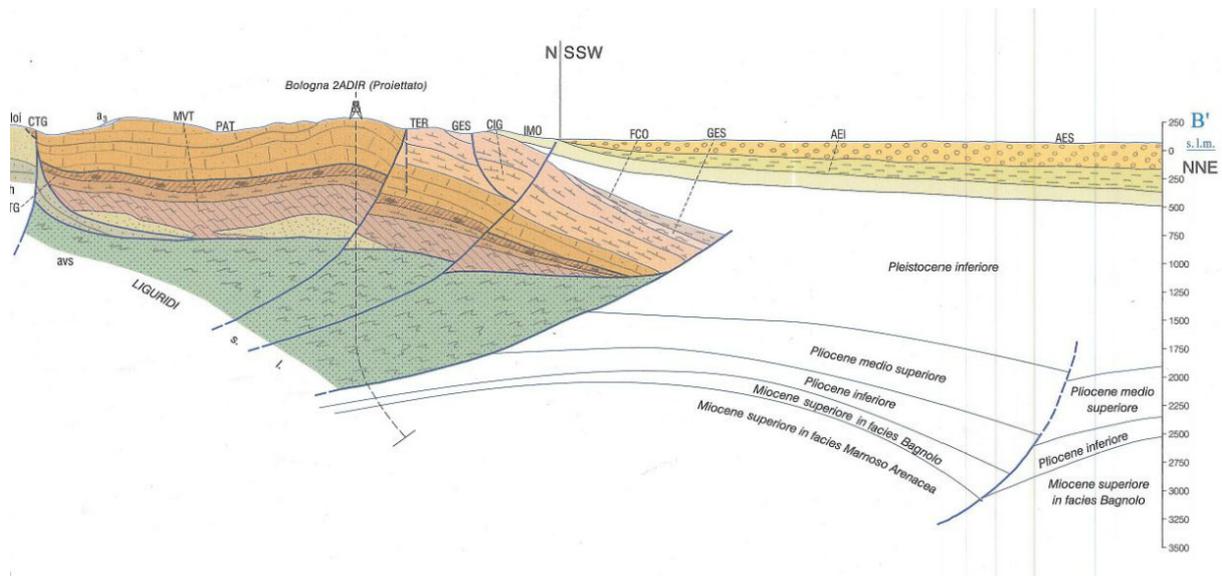
Nell'alveo del Torrente Savena è presente una successione che dal Miocene superiore (Formazione Gessoso Solfifera) giunge fino al Pleistocene, con sabbie gialle litorali.

Anche qui la successione marina è troncata bruscamente da una faglia e affonda rapidamente sotto i depositi alluvionali di pianura.

### 3.3.4 Depositi quaternari continentali

La pianura bolognese fa parte del più ampio bacino sedimentario sintettonico padano. Si può riconoscere, al suo interno, una successione quaternaria continentale (Ricci Lucchi et al., 1982).

Questo ciclo (Qc), che forma la porzione sommitale dei sedimenti del bacino padano, è costituito da depositi alluvionali poggianti in discordanza sul ciclo Pleistocenico inferiore marino (ciclo Qm).



**Figura 5: Quadro stratigrafico del settore dei conoidi pedemontani (sezione geologica B-B' orientata SSW-NNE, da Foglio 221 Bologna, progetto CARG).**

La successione quaternaria continentale è caratterizzata prima dalla progressiva deposizione del conoide del Reno (ultimo milione di anni) e poi da quella del Savena.

Il Quaternario continentale viene suddiviso, secondo la definizione proposta da Regione Emilia-Romagna - Agip, 1998, in due unità a granulometria grossolana, definite ciclo A (Unità Alluvionale superiore di Amorosi e Farina, 1994b) e ciclo B (Unità Alluvionale Inferiore di Amorosi e Farina, 1994b), dello spessore di circa 100-150 m, separate da corpi a deposizione francamente argillosa.

In posizione sottostante è presente un ciclo C, riconosciuto solo recentemente a scala regionale, che può essere assimilato alla parte terminale del Quaternario marino Qm, e ne rappresenta la base.

Lo spessore del ciclo Qc, all'interno del quale si sviluppano gli acquiferi captati, supera, nell'area bolognese, i 300 m (Francavilla et al., 1980; Ori, 1979); tale spessore diminuisce procedendo verso nord, in direzione di Ferrara, dove la base del Quaternario continentale si riscontra a qualche decina di metri di profondità dal piano campagna attuale (Pieri e Groppi, 1981).

Nell'ambito della successione quaternaria continentale, le unità attraversate sono costituite, dal punto di vista litologico, essenzialmente da ghiaie e, subordinatamente, da peliti, più scarse appaiono le sabbie. Le ghiaie risultano dominanti nell'area del F. Reno, mentre il rapporto grossolano/pelite, espresso dal rapporto fra la somma delle frazioni ghiaiosa e sabbiosa e la frazione a granulometria più fine ed indicato come G/P, risulta inferiore nelle sezioni dei torrenti Savena e Idice.

Amorosi e Farina (1994a, 1994b, 1995) riconoscono, nell'ambito della distribuzione verticale delle litologie, una chiara organizzazione delle ghiaie e delle peliti secondo cicli o ritmi di diverso spessore risultanti in alternanze di depositi prevalentemente grossolani e di depositi a dominante fine su spessori variabili da 10 a oltre 100 metri.

L'Unità Alluvionale Superiore definita Unità di Borgo Panigale, o Ciclo A, è caratterizzata da un tenore in ghiaie mediamente più elevato rispetto alla sottostante Unità Alluvionale Inferiore, o Ciclo B, indicativo di una deposizione prevalentemente grossolana sull'intera area in esame. Il rapporto G/P raggiunge 6/1 nel conoide del Reno e 2/1 nei conoidi di Savena ed Idice.

All'interno dell'Unità Alluvionale Superiore si riconoscono quattro cicli a base ghiaiosa dello spessore di circa 30-40 metri, delimitati a tetto da intervalli prevalentemente fini di minore potenza, pari a circa 5-10 metri.

Queste Unità si caratterizzano come corpi acquiferi e sono denominate dall'alto A1, A2, A3, A4 (Regione Emilia-Romagna, AGIP, 1998) o BP4, BP3, BP2, BP1 (Amorosi et al., 1996).

Nelle zone apicali e in presenza di isolati corpi grossolani all'interno degli spessori pelitici, queste unità si presentano parzialmente amalgamate tra loro. Gli orizzonti descritti sono presenti nell'area del Reno e nei settori di Savena ed Idice.

La sezione geologica riportata nella **Figura 5** consente di osservare l'alternanza ghiaia-pelite presente nel sistema di conoide appenninico: si nota la presenza della struttura tettonica posta a sud del sistema di conoide (Sovrascorrimento Frontale Pedeappenninico di Castellarin et al., 1985).

Nelle zone laterali, rispetto alle conoidi, si distinguono settori caratterizzati dalla presenza di litofacies di piana alluvionale, riferibili sia a fenomeni di esondazione di Reno e Savena, sia a deposizione di materiale pelitico proveniente dalla sedimentazione del reticolo minore (Meloncello, Ravone, Aposa). Qui si individua un settore definibile di interconoide, dove i depositi sono costituiti principalmente da materiali limoso-argillosi. Solo raramente si riscontra la presenza di intercalazioni sabbiose, di ridotta continuità laterale. Questa transizione litologica è riscontrabile anche all'interno della documentazione cartografica allegata, relativa alla descrizione della litologia di superficie.

### **3.4 Idrologia superficiale**

L'alta pianura bolognese è caratterizzata da una rete drenante orientata sud ovest-nord est. Il Torrente Lavina scorre lungo il suo margine occidentale a sinistra del proprio conoide, il T. Savena presso il margine orientale a destra del relativo conoide.

Il Fiume Reno, dopo avere nel tempo spostato progressivamente verso est il proprio corso, scorre attualmente all'incirca in posizione mediana al territorio così individuato.

La città di Bologna sorge su conoidi minori di piccoli corsi d'acqua tra Reno e Savena.

Nella media pianura i corsi d'acqua hanno tutti percorsi che sono il risultato di modifiche in buona parte imposte dall'uomo nel corso degli ultimi quattro o cinque secoli. Infatti, alcune centinaia di anni di disordine idraulico avevano creato nella media e bassa pianura bolognese, ove convergevano gli attuali affluenti di destra del fiume Reno, le condizioni per l'estendersi delle paludi sin quasi alle porte di Bologna.

Il Fiume Reno, che sfociava nel Po all'altezza di Bondeno, venne deviato nel 1604 in questo sistema di valli nell'intento di colmarle e successivamente, con una serie di varianti, fu immesso nell'alveo del Po di Primaro, da tempo abbandonato, ricevendo così in destra le acque dei torrenti Savena, Idice e Sillaro.

L'analisi delle isoipse permette di riconoscere chiaramente nell'alta pianura una fascia costituita dai ventagli dei conoidi recenti dei corsi d'acqua minori, che borda il margine collinare.

La ricostruzione morfologica permette di riconoscere l'evoluzione recente di questo insieme di conoidi. Il conoide del Fiume Reno ha infatti forma allungata e lobata verso la pianura al contrario di quello dei torrenti Lavino o Savena, che hanno forma chiaramente a ventaglio, con episodi sempre più recenti da est verso ovest. Il conoide del T. Savena è oggi poco riconoscibile in superficie, anche se tra Corticella e Trebbo è ancora esistente un suo ramo abbandonato.

Il conoide del Savena indica con la sua forma a ventaglio allargato le successive deviazioni che ha subito il corso d'acqua: oltre al tracciato storico, seguito sino al 1776 e tuttora attivo e pensile nella sua parte più settentrionale (Savena abbandonato: Chiesa, 1742; Cremonini S., 1980), si individuano numerose dorsali coincidenti con assi di deflusso certamente attivi in periodi recenti, pre-romani o romani. Attualmente il Savena segue un tracciato in parte artificiale che ricalca l'alveo del Rio Polo, esterno alla parte più rilevata della conoide. I terrazzi scompaiono a 2 km dal margine collinare. Nel tratto intravallivo è presente una brusca deviazione dell'alveo verso Est, con orientamento analogo a quello del Reno.

Il passaggio tra conoidi alluvionali e pianura alluvionale coincide all'incirca in quest'area con la periferia meridionale della città di Budrio. Si tratta di una transizione molto graduale e non ben identificabile, anche per gli ormai secolari interventi antropici, a volte resa più difficile dalla scomparsa delle ghiaie, ma evidenziata dalla diminuzione dell'inclinazione della superficie topografica.

L'unità della piana alluvionale è il frutto della sedimentazione per accrescimento verticale di depositi fini e finissimi dovuta a processi di tracimazione di corsi d'acqua sinuosi, talora resi rettilinei dall'uomo; i naturali processi di deposizione hanno generato argini naturali prevalentemente sabbiosi (dossi), ventagli di rotta (crevasse) e piane inondabili litologicamente identificabili per la presenza di limi e argille; si rinvengono attualmente corpi sabbiosi nastriformi allungati nel senso dello scorrimento delle acque, per la migrazione dei meandri.

La distribuzione delle classi granulometriche in superficie riflette l'ambiente deposizionale soprattutto per quelle più grossolane come le sabbie: queste affiorano secondo fasce allungate da sud a nord, originatesi dal piede delle conoidi e corrispondenti ad antichi argini fluviali o fasce di migrazione dei meandri, spesso in parte sepolti da sedimenti di piena. Le argille e i limi, la cui distribuzione è molto irregolare, sono caratterizzati da una stratificazione lenticolare, derivante da singoli episodi di tracimazione.

## 4 SISMICITÀ

Questo capitolo della relazione geologica ha lo scopo di illustrare il profilo sismo-stratigrafico del terreno in corrispondenza delle opere in progetto, oggetto della probabile amplificazione sismica. L'azione sismica nel sito del progetto, necessaria per la progettazione degli interventi di prevenzione del rischio sismico, è trattata secondo quanto previsto dalle norme tecniche per le costruzioni NTC 2018.

### 4.1 Profilo stratigrafico

Da un punto di vista generale, il rischio sismico nel Comune di Bologna ricade nella categoria sismica 3 (Sito ufficiale della Regione Emilia-Romagna, aggiornamento luglio 2018).

Per quanto riguarda la sequenza stratigrafica di riferimento, come illustrato nei paragrafi precedenti il substrato è caratterizzato da una sequenza di depositi quaternari continentali con spessore maggiore di 300 m, costituita da 2 cicli sedimentari (A e B) che poggiano su depositi quaternari marini del ciclo sedimentario C. All'interno del ciclo A, quello più superficiale, interessato dalle opere in progetto, si rileva la presenza di corpi sedimentari grossolani prevalentemente rappresentati da ghiaie con sabbie e limi e subordinate argille nella Tratta 1 (Zanolini-Rimesse) e da sabbie e limi con subordinate argille e ghiaie nella Tratta 2 (via Larga).

Per quel che concerne la stratigrafia dell'area fino alla profondità di 30 m dal p.c. si sono utilizzati i sondaggi a carotaggio continuo realizzati nell'ambito del Progetto Definitivo, oltre tale profondità si sono utilizzati i numerosi sondaggi e pozzi presenti nella banca dati della Regione Emilia-Romagna della RER, che non vengono riportate negli allegati ma che sono consultabili al seguente indirizzo:

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/webgis>.

Sulla base delle indagini sismiche HVSR svolte per il Progetto Definitivo e presentate nella relazione geologico-sismica (cod. D0L0DPGGE003 del 20/07/2014, riprodotta nell'Allegato 4), si ritiene che il picco di 0.8/0.9 Hz che compare su ogni misura HVSR, individui un passaggio stratigrafico a circa 100m di profondità che viene considerato come "pseudo *bedrock*". Questo è valido per entrambe le tratte.

Per quanto riguarda lo strato più superficiale, da 0 a 30 m dal piano campagna, nella Tratta 1 prevalgono le ghiaie e le amplificazioni sono minori, mentre nella Tratta 2, dove sono presenti 6-8 m di limi e argille prima di incontrare le sabbie con ghiaie, le amplificazioni sono maggiori.

Per quanto attiene i possibili fenomeni di liquefazione, nella relazione sismica del PD sono state verificate condizioni di potenziale medio. Inoltre, valutando condizioni più di dettaglio ai sensi della delibera della RER del 112 del 2007, sono state considerate condizioni più critiche utilizzando le prove SPT e le stratigrafie dei sondaggi disponibili. Sulla base di questa analisi, l'indice del potenziale di liquefazione risulta nullo. Per la verifica realizzata nell'ambito dell'adeguamento del PD si rimanda alla relazione citata sopra, facente parte di questa fase progettuale.

La sismo-stratigrafia di riferimento, con lo spessore medio degli strati in metri, è indicata nelle tabelle seguenti. Sulla base delle variazioni laterali della stratigrafia sono distinti tre settori: due nella Tratta 1, Zanolini e Rimesse e la Tratta 2.

### Tratta 1 - Zanolini (Sondaggi di riferimento S1, S2, S3)

Tipo materiale	Spessore (m)			
	S1	S2	S3	Media
1. Terreno di riporto, ghiaioso e/o limoso	2,9	2,0	2,0	2,3
2. Ghiaie con sabbie e sabbie con ghiaie	12,6	13,3	9,3	11,7
3. Argille limose, a tratti sabbiose, limi argillosi	4,7	4,7	4,6	4,7
4. Sabbie con ghiaie e ghiaie con sabbie	8,4	10,0	11,7	10,0

### Tratta 1 – Rimesse (Sondaggio di riferimento S4)

Tipo materiale	Spessore (m)
1. Terreno di riporto, ghiaioso e/o limoso	2
2. Ghiaie con sabbie e sabbie con ghiaie	3
3. Argille limose, a tratti sabbiose, limi argillosi	2,3
4. Sabbie con ghiaie e ghiaie con sabbie	2,5
5. Argilla, argilla sabbiosa	5,2

### Tratta 2 – via Larga (Sondaggi di riferimento S1, S2)

Tipo materiale	Spessore (m)		
	S1	S2	Media
1. Terreno di riporto o suolo limoso	2,9	0,4	1,7
2. Limi e argille e limi sabbiosi, con lenti di sabbie	5,8	6,9	6,4
3. Sabbie con ghiaie, con lenti di argilla	7,2	7,7	7,5
4. Argille e limi sabbiosi	5,3		5,3

## 4.2 Parametri di input sismico

Per quanto riguarda le verifiche sismiche, i parametri di riferimento definiti per ciascun manufatto sono riassunti nella tabella sottostante.

In particolare, vengono riportati:

- Manufatto;
- Vita nominale dell'opera ( $V_N$ ): intesa come il numero di anni nei quali la struttura deve poter essere utilizzata per lo scopo al quale è stata destinata senza necessità di manutenzioni;
- Classe d'uso: in presenza di azioni sismiche, in relazione alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso;
- Periodo di riferimento ( $V_R$ ) per l'azione sismica: viene definito come il prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso;

- Categoria di sottosuolo: utile per definire la risposta sismica locale e quindi l'azione sismica di progetto in base alle caratteristiche del deposito di terreno sul quale insiste l'opera;
- Coefficiente di amplificazione stratigrafica ( $S_S$ ): utilizzato per tenere conto delle condizioni stratigrafiche nella definizione dell'azione sismica di progetto;
- Coefficiente di amplificazione topografica ( $S_T$ ): utilizzato per tenere conto delle condizioni topografiche nella definizione dell'azione sismica di progetto;
- Accelerazione sismica di progetto ( $a_{max}$ );
- Elaborato di riferimento: codice elaborato nel presente Progetto Definitivo.

Manufatto	$V_N$ (anni)	$V_R$ (anni)	Classe d'uso	Categoria Sottosuolo	$S_S$	$S_T$	$a_{max}$	Elaborato di riferimento
Galleria a foro cieco	$\geq 100$	100	II	C	1,39	1	0,210 g	FER_BP_D_T1_STR_GN1_R_001_A
Galleria artificiale e altre opere	$\geq 100$	200	IV	C	1,32	1	0,343 g	FER_BP_D_T0_STR_GEN_R_001_C
Fermata Via Libia	$\geq 100$	200	IV	C	1,32	1	0,343 g	FER_BP_D_T1_STR_FLI_R_001_B
Fermata Via Rimesse	$\geq 100$	200	IV	C	1,32	1	0,343 g	FER_BP_D_T1_STR_FRI_R_001_A
Muri di sostegno e rampe fermata Via Rimesse	$\geq 100$	200	IV	C	1,32	1	0,343 g	FER_BP_D_T1_STR_FRI_R_002_A

Per la definizione dei parametri sismici da utilizzare nella progettazione, è stato fatto riferimento alla Relazione Geologico-Sismica *Approfondimenti di III livello* (codice D0-L0-D-PG-GE-003 - in allegato).

La seguente tabella riporta l'accelerazione di pico del terreno per diversi periodi di ritorno per la progettazione delle opere in sotterraneo.

Periodo di ritorno [anni]	PGA [g]
475	0.166
1898	0.260

Facendo sempre riferimento al documento sopra citato Inoltre, è stato fatto uno studio di III livello per approfondire gli aspetti di amplificazione locale. Di seguito si riportano i fattori amplificativi e lo spettro di accelerazione da utilizzare per la progettazione delle opere in superficie

### **Tr=475 anni**

Fattori di amplificazione elaborate dalle forme spettrali (Riferimento D0-L0-D-PG-GE-003)

### Zanolini

$$\text{F.A. PGA/PGAo} = 1.45$$

$$\text{FA}_{\text{IS}}(0.1\_0.5) = 1.53$$

$$\text{FA}_{\text{IS}}(0.5\_1.0) = 2.16$$

### Via Larga

$$\text{F.A. PGA/PGAo} = 1.77$$

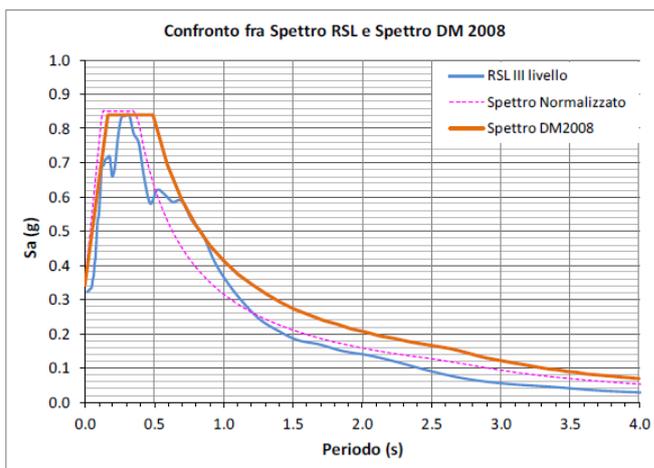
$$\text{FA}_{\text{IS}}(0.1\_0.5) = 1.65$$

$$\text{FA}_{\text{IS}}(0.5\_1.0) = 2.21$$

### Tr=1898 anni

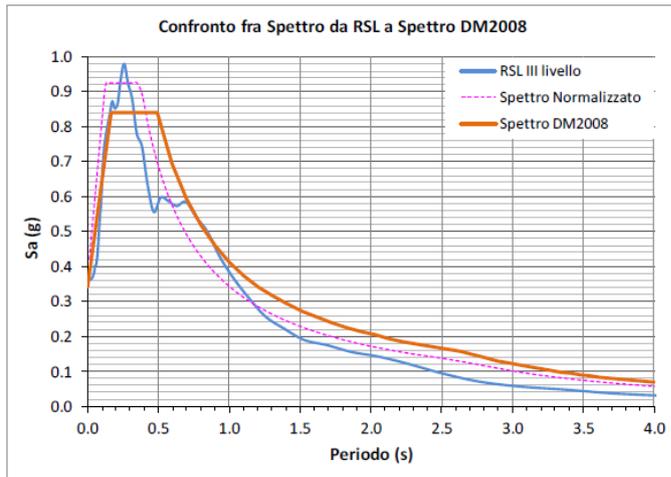
Spettri in accelerazione per 1898 anni e 5% di smorzamento (Riferimento Allegato 2).

### Zanolini



Param	Valori	
<u>Ag (g)</u>	0.260	Fissato
<u>F0</u>	2.451	Fissato
<u>Tb</u>	0.123	Calcolato
<u>Tc</u>	0.370	Calcolato
<u>Td</u>	2.640	Calcolato
<u>T*c</u>	0.322	Fissato
<u>S</u>	1.336	Da variare
<u>Eta</u>	1.000	Fissato
<u>Cc</u>	1.150	Da Variare
<u>Coeff</u>	0.851	Calcolato
<u>Scarto</u>	0.849	(da 0 a 1.0 s)

### Via Larga



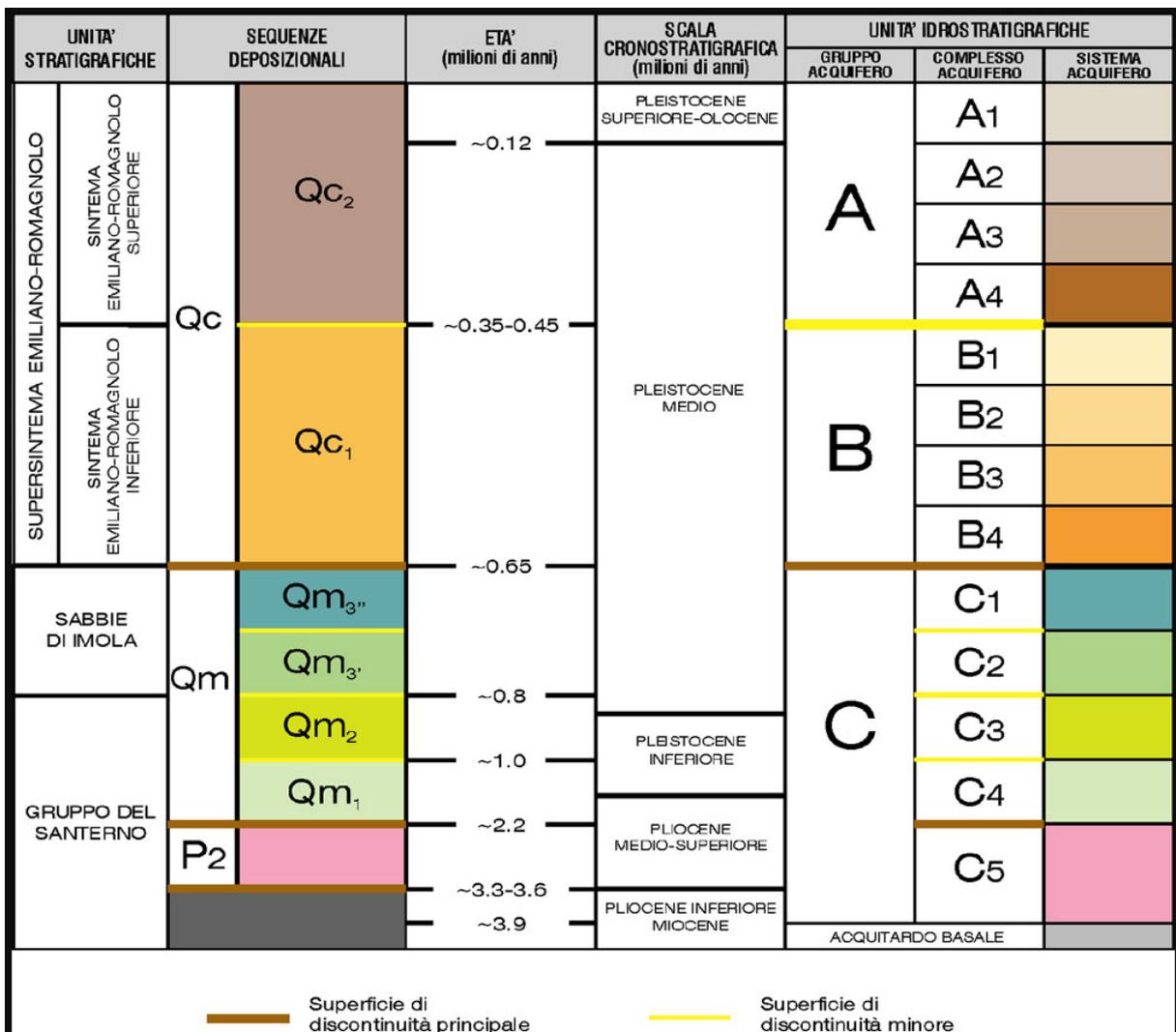
Param	Valori	
<b>Ag (g)</b>	0.260	Fissato
<b>F0</b>	2.451	Fissato
<b>Tb</b>	0.123	Calcolato
<b>Tc</b>	0.370	Calcolato
<b>Td</b>	2.640	Calcolato
<b>T*c</b>	0.322	Fissato
<b>S</b>	1.452	Da variare
<b>Eta</b>	1.000	Fissato
<b>Cc</b>	1.150	Da Variare
<b>Coeff</b>	0.925	Calcolato
<b>Scarto</b>	0.927	(da 0 a 1.0 s)

## 5 IDROGEOLOGIA

### 5.1 Unità idrogeologiche

Lo schema stratigrafico dei depositi quaternari del margine appenninico e della pianura emiliano-romagnola porta alla definizione di tre unità stratigrafiche, riconoscibili sia in superficie che nel sottosuolo, suddivisibili a loro volta in unità di rango minore. La principale suddivisione in verticale delle unità sepolte ha portato alla suddivisione dei terreni in tre unità principali, definite (si veda anche la **Figura 6**):

- gruppo acquifero A
- gruppo acquifero B
- gruppo acquifero C



**Figura 6:** Schema stratigrafico del bacino per i depositi alluvionali e marino marginali presenti nelle prime centinaia di metri del sottosuolo (Fonte: RER, <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/temi/acque/idrogeologia-della-pianura-emiliano-romagnola>)

I complessi idrogeologici sono definiti come corpi aventi litologie simili, una comprovata unità spaziale ed un grado di permeabilità che si mantiene in un campo di variazione piuttosto ristretto. Quelli compresi nel gruppo acquifero A costituiscono il luogo dove si concentrano i prelievi idrici nella pianura emiliano-romagnola e sono riconducibili a:

- conoidi alluvionali appenniniche
- pianura alluvionale appenninica
- pianura alluvionale padana

Il substrato bolognese è costituito da depositi di granulometria variabile, di origine continentale, che costituiscono corpi acquiferi isolati e separati lateralmente da grandi estensioni di depositi argilloso-limosi a bassa permeabilità e verticalmente da setti di più ridotta potenza. Solo nella parte apicale dei conoidi, verso la catena appenninica, la struttura idrogeologica può essere schematizzata come un unico acquifero, in cui i conoidi sono collegati da interdigitazioni di materiali più grossolani.

Da tale geometria ne deriva che le acque sotterranee sono distribuite in falde sovrapposte, di cui la più alta è alimentata dalle acque di subalveo dei corsi d'acqua e dall'infiltrazione delle acque meteoriche, la seconda da infiltrazioni provenienti dall'apice dei conoidi.

L'intervento in progetto si situa nell'ambito di conoide alluvionale del torrente Sàvena, nel più superficiale complesso acquifero denominato A1 (**Figura 6**). Il complesso A1 è stato descritto dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia – Romagna tramite l'analisi di 53 log di sondaggi geognostici e 232 log di pozzi. Di geometria cuneiforme, presenta spessori variabili da 24-28 m in prossimità del margine collinare a 65-70 m nelle zone più distali. Il rapporto fra spessore cumulato delle ghiaie (gh) e lo spessore totale  $[(gh+sb)/tot]$  varia da 0,6 a 0,8 in corrispondenza del conoide del Fiume Reno. Lateralmente ad esso raggiunge rapidamente valori inferiori a 0.2. L'Acquifero A1 ospita un articolato complesso di falde superficiali.

La carta della piezometria mostrata in **Figura 7** (tratta da: *“Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia-Romagna”*, ARPAE, 2003) mostra una consistente depressione in corrispondenza delle stazioni BO27-00 (San Vitale di Reno), BO30-00 (Tiro a Segno) e BO20-01 (Borgo Panigale) nella conoide del Reno e il BO50-00 (Fossolo) nella conoide del Savena.

La falda superficiale in genere mostra un livello piezometrico relativamente stabile nel tempo, salvo le oscillazioni stagionali, poiché non è interessata da prelievi massicci; le misure effettuate nei pozzi e nei piezometri, risalenti ad anni diversi, confermano questa tendenza.

La falda superficiale è rinvenibile con più continuità nel settore est del territorio di Bologna, nei pressi del conoide dell'Aposa e del Sàvena, sino all'alveo del Canale Navile; verso ovest tale falda si perde, drenata dal grande lobo ghiaioso del Reno. Essa presenta le minori profondità in corrispondenza dell'apice del conoide del Sàvena e nell'area del centro storico, si approfondisce verso NO e tende a approssimarsi alla superficie topografica verso NE (zona delle risorgive).

Le acque della falda superficiale sono di tipo bicarbonato-solfato-alcalino-terrose, con variazioni di chimismo relative soprattutto al contenuto di Ca e Mg. Elevato è pure il contenuto in nitrati. La distribuzione areale dei nitrati mostra alte concentrazioni nelle zone di apice di conoide soprattutto del Sàvena (40-50 mg/l), mentre nelle zone mediane e distali è evidente una sua attenuazione anche per le condizioni ambientali riducenti (ARPAE, 2003).



La falda profonda è soggetta a forti abbassamenti, dell'ordine di 2 m annui. Questa si approfondisce gradualmente dal settore nord-orientale (15m) a quello occidentale (>55m), a ovest del Reno; le depressioni sono concentrate in prossimità delle aree di emungimento dei pozzi, mentre i massimi di subsidenza rimangono esterni a queste aree e sembrano localizzati nelle zone interconoidali a sedimentazione più fine.

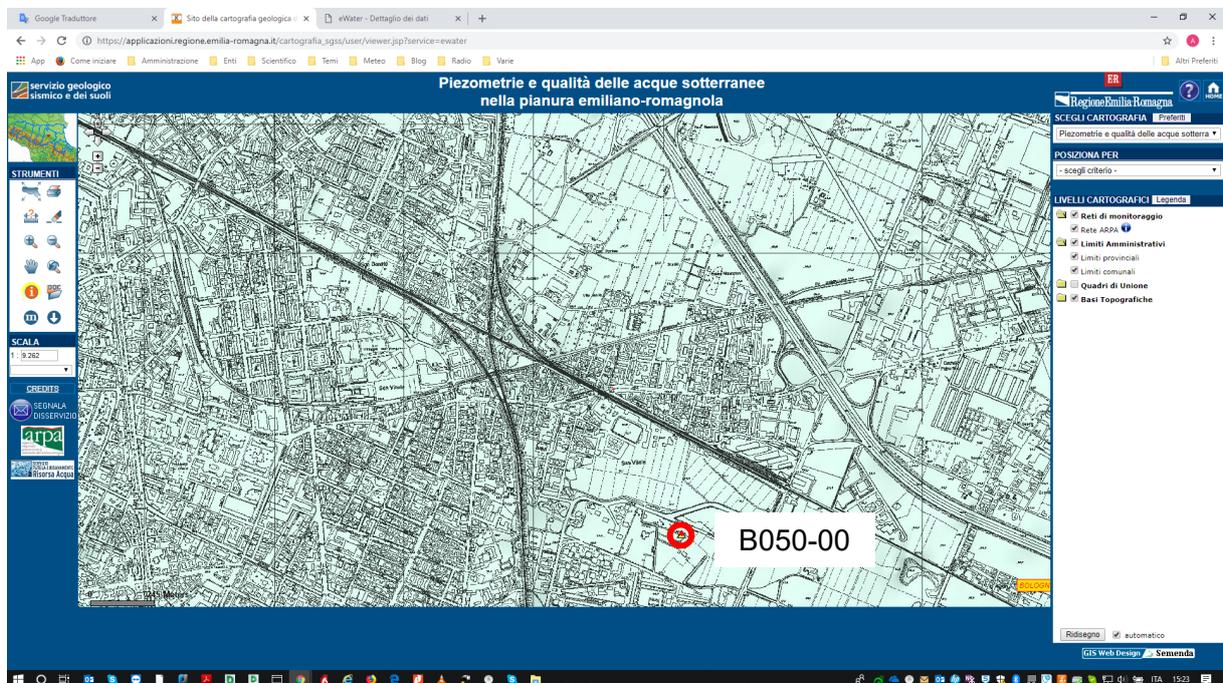
## 5.2 Dati esistenti

### 5.2.1 Banca dati RER

La regione Emilia-Romagna gestisce una rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee sulla quale vengono condotti rilievi della piezometria degli acquiferi profondi, che consta di circa 470 pozzi di controllo, misurati almeno 2 volte all'anno, e una quarantina di piezometri automatici con letture a cadenza oraria (Rif.: <https://www.arpae.it/>).

In prossimità della zona di interesse del progetto, ad una distanza di circa 1600 m verso S-E dalla stazione di via Larga, si situa il pozzo acuedottistico con codice B050-00, dove dal 1976 al 2009 fu misurato il livello della falda profonda degli acquiferi B e C, descritti nel Paragrafo 5.1.

Nella figura seguente è mostrata l'ubicazione del pozzo ed il grafico dell'andamento della superficie piezometrica nel tempo. A parte l'anomalo andamento che questo pozzo mostra, dovuto alle forti interazioni antropiche già descritte precedentemente, purtroppo questo dato non informa circa i livelli della falda superficiale del gruppo acquifero A interessato dalle opere in progetto. L'informazione dei livelli piezometrici di progetto è fornita dai dati misurati nei piezometri FER presentati nel paragrafo successivo.





**Figura 8: Ubicazione del pozzo B050-00 della rete regionale di monitoraggio degli acquiferi profondi (Rif.: [https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss)).**

### 5.2.2 Indagini Autostrada A14

Di seguito vengono illustrati i risultati ottenuti con le indagini svolte da Autostrade per l'Italia nell'ambito della progettazione esecutiva del tratto di A14 che interseca la Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore, in corrispondenza della Tratta 2 via Scandellara. La tabella seguente riassume i dati di permeabilità stimata mediante prove tipo Lefranc in fori di sondaggio.

Sondaggio	Prof. (m da p.c.)	Tipo di materiale	Permeabilità (m/s)	Unità geotecnica
PB25	25	A(L)	2,2E-07	A
PB25	30	GS	3,6E-05	B
PB24	16,5	A	2,4E-07	A
PB24	32	A/A(S) S(A)	1,8E-04	A
PB22	14	A/A(S) S(A)	4,5E-07	A
PB22	35	S(G)/G(S)	3,7E-05	B

### 5.2.3 Indagini idrogeologiche FER

Nel mese di settembre 2003 (9/9/03-12/9/03) sono stati realizzati quattro sondaggi geognostici nella Tratta 1, uno dei quali, l'S1, è stato attrezzato con piezometro alla profondità di 9,4 m dal piano di campagna, in corrispondenza di un livello maggiormente permeabile costituito da ghiaie in matrice sabbiosa media fine.

Nella Tratta 2 di via Larga, sono stati eseguiti ulteriori due sondaggi, uno dei quali, l'S1, è stato attrezzato con piezometro a tubo aperto, filtrante da 3 m a 20 m dal piano di campagna.

Nella tabella seguente sono riassunte le misure di profondità della falda effettuate durante la perforazione dei sondaggi e successivamente, nei fori attrezzati con piezometro, tra il 2003 ed il 2005.

**Tabella 1. Misure piezometriche effettuate lungo la linea, fino al 2005 (profondità m da p.c.)**

Sondaggio/ Piezometro	Durante la perforazione	31/10/ 2003	16/12/ 2003	19/12/ 2004	15/03/ 2004	15/06/ 2004	12/10/ 2004	10/01 2005
S1 (T1 - v. Bentivogli)	12,2	28,8	29,03	28,95	29,90	>30	>30	>30
S2 (T1 - v. dal Ferro)	15,1	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
S3 (T1 - Zanolini)	28,1	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
S4 (T1 - Rimesse)	>15	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
S1 (T2 - v. Larga)	>20	>20	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	>20	>20
S2 (T2 - v. Larga est)	>15	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.

Nella nuova campagna di indagini geotecniche del 2019 sono stati installati ulteriori piezometri e realizzate nuove prove in foro in entrambe le tratte, come indicato nelle tavole grafiche allegate e riassunto nelle due tabelle seguenti.

**Tabella 2. Lista dei piezometri installati nel 2019 e delle prove in foro realizzate**

Tratta	COD.	PROF.	TRATTO FINESTRATO			PROVE IN FORO	
			da (m)	a (m)	Lungh. (m)	LEFRANC	PRESSIOM.
1	T1-1	10	4,00	10,00	6,00	2	-
	T1-2	40	16,00	37,00	21,00	3	-
	T1-A2	10	4,00	10,00	6,00	1	-
2	T2-1	30	15,00	30,00	15,00	3	1
	T2-2	30	15,00	30,00	15,00	3	-
	T2-A1	10	4,00	10,00	6,00	1	-

**Tabella 3. Misure piezometriche lungo la linea, anno 2019 (profondità della falda in m da p.c.)**

Sondaggio/ Piezometro	Misure realizzate in fase di perforazione		Misure realizzate in data 17/05/2019
T1-1	09/04/19	>10	>10
T1-2	19/04/19	18,5	16,90
T1-A2	01/04/19	n.r.	>10
T2-1	08/04/19	n.r.	17,60
T2-2	04/04/19	n.r.	15,87
T2-A1	09/04/19	>10	>10

Le misure piezometriche realizzate da FER ed indicate nelle Tabelle 1 e 3 hanno permesso di definire le soggiacenze di riferimento per ogni tratta, che sono indicate ai paragrafi 9.1, 9.2.

Nei sondaggi sono state effettuate misure della permeabilità durante la perforazione, relative ai livelli più permeabili del substrato in esame, ascrivibili per la maggior parte all'unità geotecnica A (sabbie con ghiaie).

**Tabella 4. Prove di permeabilità tipo Lefranc eseguite nei sondaggi della campagna 2019**

Sond	Data	Prova	Prof. (m)		Lungh. (m)	Unità Geot.	Coeff. Permeabilità K (m/s)
			da	a			

**TRATTA 1**

T1-1	09/04/2019	1	2,50	3,00	0,50	A	2,96E-05
T1-1	09/04/2019	2	6,00	6,50	0,50	A	5,66E-04
T1-2	18/04/2019	1	10,00	10,75	0,75	A	1,80E-07
T1-2	18/04/2019	2	24,50	25,00	0,50	A	7,25E-07
T1-2	18/04/2019	3	32,00	32,50	0,50	A	5,99E-06
T1-A2	01/04/2019	1	3,50	4,00	0,50	A	6,02E-06

**TRATTA 2**

T2-1	04/04/2019	1	14,00	14,50	0,50	A	7,92E-07
T2-1	04/04/2019	2	17,00	17,50	0,50	A	5,66E-07
T2-1	05/04/2019	3	20,00	20,50	0,50	A	9,30E-06
T2-2	02/04/2019	1	7,50	8,00	0,50	A	3,91E-05
T2-2	03/04/2019	2	12,50	13,00	0,50	A	7,05E-06
T2-2	03/04/2019	3	17,00	17,50	0,50	A	5,33E-05
T2-A1	08/04/2019	1	5,00	5,50	0,50	B	1,10E-06

Le misure di permeabilità di cui si dispone per i terreni più fini, ascrivibili all'unità geotecnica B argillosa e limosa, sono quelle effettuate in laboratorio, in accompagnamento alle prove di consolidazione edometrica (Tabella 5).

**Tabella 5. Misure di permeabilità in laboratorio, sui terreni fini limoso argillosi lungo la linea**

Tratta	Opera di riferimento	Sond.	Camp.	Profondità		Granulometria				Coeff. Permeabilità k
				da	a	Ghiaie	Sabbie	Limo	Argille	
				Codice	Codice	m da p.c.		%	%	%
1	GN Bentivoglio	S1	C1	18,70	19,20	0,5	13,5	58	28	3,6E-10
	Fermata via Libia Rampa Est GN Bentivoglio	S2	C1	6,00	6,35	0,5	22,5	52	25	1,0E-09
	Fermata via Libia Rampa Est GN Bentivoglio	S2	C2	18,20	18,80	0,5	1,5	38	60	1,3E-09
	Rampa Ovest Fermata Rimesse	S3	C1	4,80	5,20	0	2	53	45	5,6E-09
	Rampa Ovest Fermata Rimesse	S3	C2	13,00	13,50	4	20	44	32	2,9E-09
	Fermata Rimesse	S4	C2	6,80	7,30	0,2	35,8	52	12	1,2E-08
2	Fermata via Larga	S1	C1	6,30	6,90	0	5	51	44	2,8E-09
	Rampa Est via Larga	S2	C1	4,50	5,00	0	32	54	14	6,8E-09

### 5.2.4 Aggressività delle acque sul calcestruzzo

Per quanto riguarda i parametri indicatori utili a determinare il grado di aggressività del terreno naturale e nell'acqua presente nel terreno sul calcestruzzo, è stata condotta una verifica

secondo i criteri indicati dalla Norma UNI-EN 206-1. Le classi di esposizione all'attacco chimico del calcestruzzo sono le seguenti:

- XA1 Ambiente chimico debolmente aggressivo
- XA2 Ambiente chimico moderatamente aggressivo
- XA3 Ambiente chimico fortemente aggressivo

Il pozzo BO75-00 della rete della RER (si veda **Figura 9** per la sua ubicazione in pianta) ha fornito i dati utili alla caratterizzazione della qualità delle acque della falda superficiale che potenzialmente potrebbe interagire con le opere in progetto, riscontrata in quel punto a -22,2 m dal piano di campagna.

Nella tabella seguente sono indicati i valori limite per le classi di esposizione e, nell'ultima riga, i valori rilevati nel piezometro BO75-00 ritenuti indicativi delle caratteristiche di potenziale aggressività della falda superficiale del sito in esame.

**Tabella 6. Classi di esposizione all'attacco chimico del calcestruzzo e valori indicativi del sito in esame**

Caratteristiche chimiche	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	pH	CO <sub>2</sub> aggressiva (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)
Metodo di prova di riferimento	EN 196-2	DIN 4030-2	prEN 13577:1999	ISO 7150-1/2	ISO 7980
Valori soglia XA1	≥ 200 e ≤ 600	≤ 6,5 e ≥ 5,5	≥ 15 e ≤ 40	≥ 15 e ≤ 30	≥ 300 e ≤ 1000
Valori soglia XA2	> 600 e ≤ 3000	< 5,5 e ≥ 4,5	> 40 e ≤ 100	> 30 e ≤ 60	> 1000 e ≤ 3000
Valori soglia XA3	> 3000 e ≤ 6000	< 4,5 e ≥ 4,0	> 100 fino a saturazione	> 60 e ≤ 100	> 3000
Intervallo di valori rilevati nel piezometro BO75-00	30	7,58	n.d.	0,46	31,3

Dai risultati esposti in tabella sopra, risulta evidente che la qualità chimica delle acque di falda è ben lungi dall'essere anche debolmente aggressiva. Non si evidenzia pertanto un rischio di aggressività delle acque di falda nei confronti dei calcestruzzi.

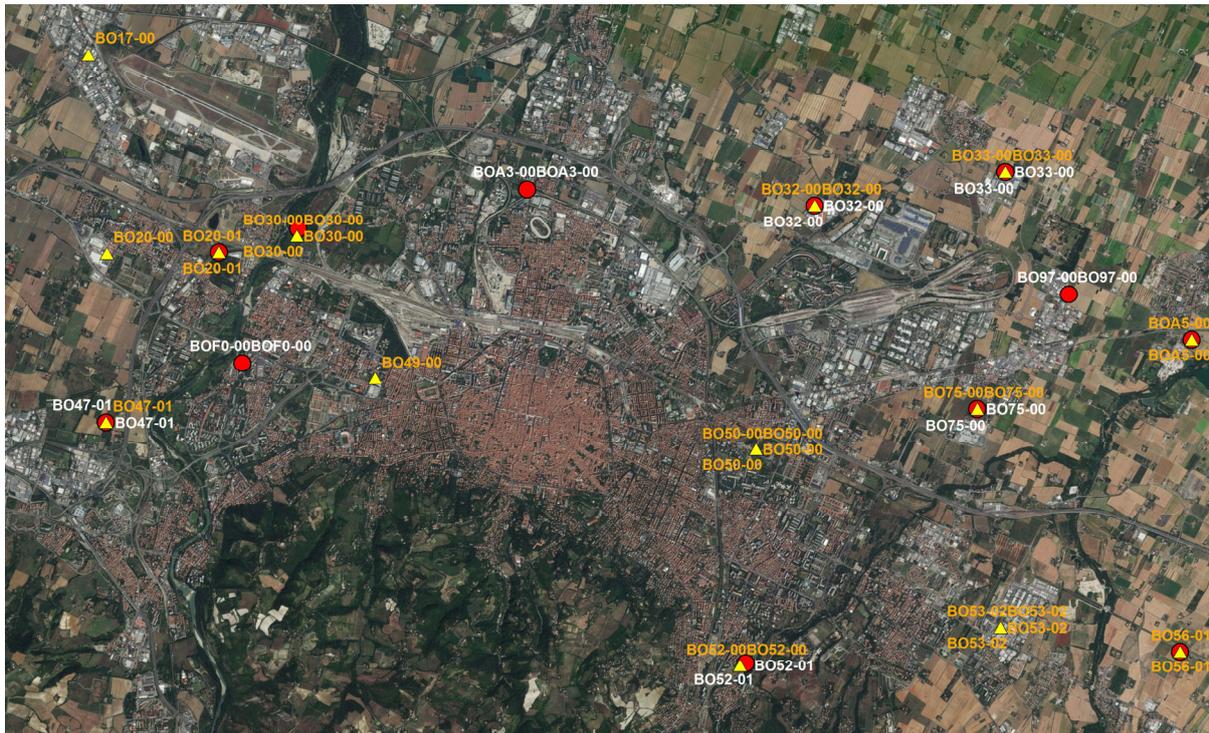


Figura 9. Ubicazione dei punti di monitoraggio RER della qualità delle acque sotterranee (Rif.: <https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/>)

### 5.3 Caratterizzazione della permeabilità

La permeabilità attribuita ai terreni interessati dalle opere in progetto è stata stimata in base a dati di letteratura, in assenza di misure dirette in campo. Solo le prove in laboratorio sui campioni limoso-argillosi hanno permesso di ottenere dati specifici del sito in esame.

Il grado di permeabilità dei complessi idrogeologici è stato espresso secondo la classificazione AFTES 1992, che distingue 4 diverse classi di permeabilità. Le classi sono così suddivise:

K1	< 10 <sup>-8</sup> m/s	permeabilità molto bassa
K2	da 10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-6</sup> m/s	permeabilità medio-bassa
K3	da 10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-4</sup> m/s	permeabilità media
K4	>10 <sup>-4</sup> m/s	permeabilità da media ad alta

Al fine della progettazione, si distinguono due unità idrogeologiche, alle quali si attribuiscono permeabilità medie riferibili alle classi K1 per i limi e argille più o meno sabbiosi e K3 per le ghiaie e sabbie in matrice sabbiosa e limosa. La tabella seguente indica i parametri idrodinamici di riferimento.

**Tabella 7. Permeabilità dei terreni interessati dalle opere in progetto**

Unità	Classe	Cond. Idraulica orizzontale ( $K_h$ ) (m/s)	Porosità efficace %	Rapporto tra permeabilità verticale e orizzontale ( $K_v/K_h$ ) (-)
A - Limi e argille	K1 - permeabilità molto bassa	1E-07 ÷ 1E-09*	5 ÷ 8***	1***
B - Ghiaie e sabbie	K3 - permeabilità media	1E-05 ÷ 1E-06**	23 ÷ 25***	0.1 ÷ 0.01***

Note: \*: misurato in laboratorio e mediante prove Lefranc PE autostrada A14; \*\*: misurato mediante prove Lefranc PE autostrada A14; \*\*\*: stimato da letteratura.

#### 5.4 Risposta alle prescrizioni del Comune di Bologna e dell'A.R.P.A.

Come si evince dai dati del monitoraggio lungo la linea esposti nel paragrafo 5.2.3, la falda a superficie libera SUP4 si trova ad una profondità di circa 17 m dal p.c. nella Tratta 1 e a circa 16 m da p.c. nella Tratta 2.

La direzione del flusso è desunta dai rilievi a grande scala condotti da ARPAE (cfr Figura 7), e risulta orientata verso NE nella Tratta 1 e verso NNE nella Tratta 2 (cfr. Figura 10).

I nuovi piezometri installati a monte ed a valle delle opere più profonde (si veda tabella 1) permetteranno di monitorare il livello e la qualità della falda ante-operam, durante la costruzione e post-operam. In particolare, coppie di piezometri nella Tratta 1 sono state realizzate a monte ed a valle delle paratie di sostegno della fermata Libia e nella Tratta 2 a monte ed a valle delle paratie della fermata via Larga.

Nella relazione che illustra il piano di monitoraggio della falda, facente parte del presente adeguamento della progettazione definitiva e citata in introduzione, si prevede inoltre l'installazione di due nuovi piezometri, uno per tratta, a valle dell'opera ferroviaria, per monitorare i possibili impatti durante la costruzione, a maggiori distanze a valle idrogeologico dell'opera.

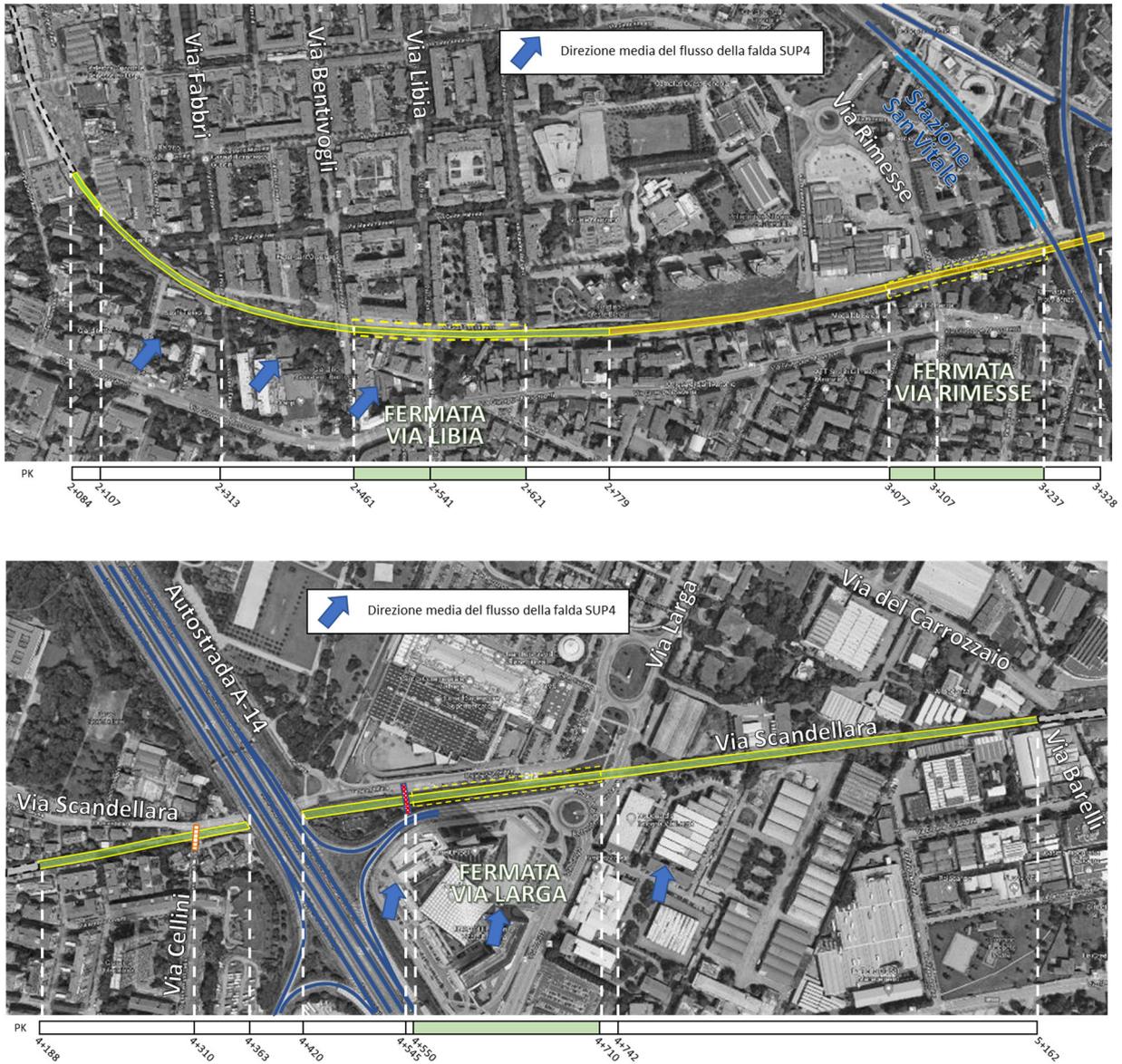


Figura 10. Direzione media del flusso idrico sotterraneo della falda SUP4 in corrispondenza del tracciato (sopra Tratta 1, sotto Tratta 2)

## 6 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Al fine di pervenire al riconoscimento dell'andamento, lungo il tracciato, di unità geotecniche intese come un continuo omogeneo rappresentativo delle condizioni dei terreni incontrati, si è proceduto operando in fasi di lavoro successive, secondo la metodologia illustrata nel seguito:

- Ricerca e raccolta dati pregressi presso archivi di RER (banca dati virtuale) della documentazione relativa ad indagini in sito (essenzialmente stratigrafie di sondaggi e pozzi) e nel Progetto Definitivo dell'allargamento del Viadotto Scandellara lungo l'autostrada A14;
- Analisi dettagliata delle indagini geognostiche FER, realizzate in sito ed in laboratorio nell'ambito del Progetto Definitivo della linea (campagne indagini 2003-2004 e 2019);
- Valutazione del grado di affidabilità delle indagini pregresse in termini di qualità e quantità dei dati;
- Individuazione delle principali problematiche ipotizzabili in relazione alle caratteristiche del sottosuolo;
- Definizione delle unità geotecniche e del loro andamento spaziale in profondità;
- Attribuzione dei parametri geotecnici caratteristici per le unità riconosciute;
- Discretizzazione del tracciato in relazione alle unità geotecniche.
- Progettazione del piano di indagini integrative.
- Esecuzione indagini previste;
- Analisi ed interpretazione dei risultati delle indagini integrative;
- Integrazione e aggiornamento del modello geotecnico sulla base delle nuove risultanze.

### 6.1 Indagini della banca dati RER

Il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (RER) ha fornito i dati immagazzinati nella sua Banca Dati delle Prove Geognostiche.

In particolare, sono stati estratti dalla banca dati tutti i dati geologici, geotecnici ed idrogeologici disponibili in un buffer di 350 m per lato alla Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore, in corrispondenza delle due tratte in progetto.

**Tabella 8. Tipologia di indagini disponibili nella banca dati regionale, per l'area del progetto**

Quantità	Tipologia
28	carotaggio continuo
5	sondaggio a distruzione
4	prova CPT con punta meccanica
8	pozzo per acqua
<b>45</b>	<b>Totale</b>

Nella tabella sopra sono riassunti i dati disponibili e nell'Allegato 1 sono riportati l'elenco dei punti disponibili.

La PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE cod. FER-BP-D-T0-GEO-GEN-S-004 riporta l'ubicazione in pianta dei punti di indagine. I risultati delle prove geognostiche sono raccolti nella relazione PROVE GEOTECNICHE IN SITO ED IN LABORATORIO cod. FER-BP-D-T0-GEO-GEN-R-003.

La banca dati riporta le stratigrafie registrate nei sondaggi; non sono presenti risultati di prove geotecniche in sito o su campioni in laboratorio, utili per la parametrizzazione dei terreni. Al fine della caratterizzazione geotecnica del sito si è fatto riferimento alle prove specificatamente realizzate da FER per questo progetto e a dati allegati al progetto del Viadotto Scandellara (A14), descritte ai paragrafi successivi.

## 6.2 Indagini Autostrada A14

Sono state considerate le informazioni provenienti da campagne di indagini geognostiche realizzate per il Progetto Definitivo dell'allargamento del Viadotto Scandellara lungo l'autostrada A14, che interseca la Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore nella Tratta 2 tra via Cellini e via Larga (Rif.: Planimetria e Profilo Geotecnico dal km 17+600 al km 19+000 Tav 8/10; Relazione di calcolo 111442-0002-PD-STR-0856, 2016-2017).

Nell'ambito di questa progettazione, sono state raccolte cinque campagne di indagini successive:

- Campagna 1984 Tecnosol: sondaggi geognostici a carotaggio continuo e prove penetrometriche statiche
- Campagna 1986 RCT: sondaggi geognostici a carotaggio continuo
- Campagna 1999 Servizi Geotecnici: sondaggi geognostici a carotaggio continuo, prove penetrometriche statiche e pozzetti superficiali
- Campagna 2000 Servizi Geotecnici: sondaggi geognostici a carotaggio continuo, prove penetrometriche statiche e pozzetti superficiali
- Campagna 2016 progetto Definitivo passante di Bologna). sondaggi geognostici a carotaggio continuo e pozzetti superficiali

La stratigrafia del sondaggio PB24(DH) ha fornito indicazioni utili per la stratigrafia profonda in corrispondenza dell'intersezione della linea ferroviaria con il viadotto autostradale, confermando la presenza di un livello sabbioso-ghiaioso dell'unità geotecnica A, alla profondità di 11 m da p.c. e fino a 15,60 m da p.c.

La caratterizzazione geotecnica che proposta da Autostrade per le fondazioni del viadotto ha indicato due unità geotecniche, parametrizzate come indicato nella tabella seguente.

**Tabella 9. Caratterizzazione geotecnica Autostrada A14 viadotto Scandellara  
Unità A – Limo argilloso**

$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (KPa)	$\phi$ (°)	$E'$ (MPa)	$\sigma'_{pre}$ (MPa)	CR (-)	RR (-)	$C_v$ m/sec <sup>2</sup>	$C_u$ (KPa)	$E_u$ (MPa)
19	0	26	5	0.4	0.18 ÷ 0.16	0.03÷0.04	3E-07	60+(z- 3)	20

**Unità B – Ghiaia e Sabbia**

$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (KPa)	$\phi$ (°)	$E'$ (MPa)
20	0	38	50

### 6.3 Sondaggi FER

Nell'ambito del Progetto Definitivo delle due tratte in esame della Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore sono stati realizzati sei sondaggi geognostici con carotaggio continuo con prove penetrometriche standard in foro (prove SPT) e due pozzetti esplorativi superficiali in corrispondenza della galleria naturale che sottopassa il ponte di via Bentivogli (cfr. Tabella seguente).

**Tabella 10. Tipologia e quantità di indagini geognostiche realizzate da FER**

Tipo indagine	Tratta/ Codice	Campagna (anno)	Profondità (m)	Numero prove SPT	Opera di riferimento
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-S1	2003	30	9	Galleria Naturale Bentivoglio
Pozzetto esplorativo superficiale	T1-PZ1	2003	3	0	Galleria Naturale Bentivoglio
Pozzetto esplorativo superficiale	T1-PZ2	2003	3	0	Galleria Naturale Bentivoglio
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-S2	2003	30	7	Rampa Est GN Bentivoglio
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-S3	2003	30	6	Rampa Ovest Ferm. Rimesse
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-S4	2003	15	3	Fermata Rimesse
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-1	2009	10	3	Galleria Naturale Bentivoglio
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-2	2009	40	13	Fermata via Libia
Sondaggio a carotaggio continuo	T1-A2	2009	10	1	Via Bonaventura, fine tratta

Tipo indagine	Tratta/ Codice	Campagna (anno)	Profondità (m)	Numero prove SPT	Opera di riferimento
Sondaggio a carotaggio continuo	T2-S1	2004	20	4	Fermata via Larga
Sondaggio a carotaggio continuo	T2-S2	2004	15	2	Rampa Est via Larga
Sondaggio a carotaggio continuo	T2-1	2009	30	6	Fermata via Larga
Sondaggio a carotaggio continuo	T2-2	2009	30	9	Fermata via Larga
Sondaggio a carotaggio continuo	T2-A1	2009	10	2	Via Cellini

La PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE riporta l'ubicazione in pianta dei punti di indagine; le stratigrafie e le foto dei sondaggi e dei pozzetti sono raccolte negli Allegati 1 e 4, le prove di laboratorio negli Allegati 3 e 5.

Il riassunto dei sondaggi realizzati da FER nelle campagne 2003-2004 e 2019 sono mostrati nella tabella della pagina seguente.

**Tabella 11. Lisata dei sondaggi realizzati da FER nella Tratta 1**

Tratta	Codice Sondaggio	Opera di riferimento	Stratigrafia			Unità geotecniche	
			da m	a m	Descrizione	Unità	Spessore m
Tratta 1 - San Vitale Rimesse	S1	Fermata Libia lato Ovest GN Bentivoglio	0,00	2,90	Terreno riporto	1	2,90
			2,90	4,30	Sabbia fine limosa e limo sabbioso	A	14,00
			4,30	13,20	Ghiaia eterogenea		
			13,20	16,90	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana		
			16,90	21,60	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa	B	4,70
			21,60	27,70	Sabbia fine limosa e limo sabbioso	A	8,40
			27,70	30,00	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana		
	S2	Fermata via Libia lato Est	0,00	2,00	Terreno riporto	1	2,00
			2,00	5,30	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana	A	13,30
			5,30	6,80	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa		
			6,80	15,30	Ghiaia eterogenea		
			15,30	17,30	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa	B	4,70
			17,30	20,00	Argilla grigia	A	10,00
			20,00	23,30	Sabbia fine limosa e limo sabbioso		
	23,30	30,00	Sabbia medio fine con ghiaia				
	S3	Fermata via Libia Rampa Est verso Fermata Rimesse	0,00	2,00	Terreno riporto	1	2,00
			2,00	4,80	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana	A	9,30
			4,80	5,50	Argilla grigia		
			5,50	7,40	Sabbia medio fine con ghiaia		
			7,40	11,30	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana	B	4,60
			11,30	14,50	Argilla grigia		
			14,50	15,00	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa		
			15,00	15,90	Argilla grigia	A	14,10
			15,90	18,30	Sabbia medio fine con ghiaia		
			18,30	21,70	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa		
			21,70	22,80	Sabbia fine limosa e limo sabbioso		
			22,80	25,00	Argille grigia		
	25,00	30,00	Sabbia fine limosa e limo sabbioso				
	T1-1	Fermata via Libia	0,00	2,20	Terreno di riporto	1	2,20
			2,20	5,00	ghiaia grossa con sabbia fine e sabbia limosa	A	2,80
			5,00	6,90	sabbia media		1,90
			6,90	7,50	limo argilloso con frammenti lignei		0,60
			7,50	10,00	ghiaia grossa con sabbia fine		2,50
	T1-2	Fermata via Libia	0,00	1,00	terreno di riporto	1	1,00
			1,00	4,00	limo argilloso e limo sabbioso	A	3,00
			4,00	6,60	Sabbia fine limosa e limo sabbioso		2,60
			6,60	13,00	ghiaia con sabbia limosa		6,40
			13,00	15,00	sabbia limosa e limo sabbioso	2,00	
			15,00	16,00	ghiaia con limo	1,00	
			16,00	18,20	limo argilloso	B	2,20
			18,20	21,20	argilla limosa	3,00	
			21,20	23,50	limo sabbioso	A	2,30
			23,50	29,50	sabbia con limo		6,00
			29,50	30,60	argilla limosa		1,10
			30,60	32,60	sabbia con limo e ghiaia		2,00
			32,60	34,20	argilla limosa		1,60
			34,20	38,00	ghiaia con sabbia limosa	3,80	
38,00	39,00	sabbia con ghiaia	1,00				
39,00	40,70	argilla limosa con sostanza organica	1,70				
T1-A2	F. Rimesse	0,00	0,70	terreno di riporto	1	0,70	
		0,70	2,60	limo sabbioso	A	1,90	
		2,60	3,60	sabbia limosa e limo sabbioso		1,00	
		3,60	5,70	ghiaia con sabbia	2,10		
		5,70	7,40	limo sabbioso	B	1,70	
7,40	10,00	ghiaia con sabbia	A	2,60			
S4	Fermata Rimesse	0,00	2,00	Terreno riporto	1	2,00	
		2,00	4,00	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana	A	2,00	
		4,00	5,00	Sabbia medio fine con ghiaia		1,00	
		5,00	7,30	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa	B	2,30	
		7,30	9,80	Ghiaia eterogenea	A	2,50	
		9,80	14,50	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa	B	4,70	
		14,50	15,00	Argilla grigia		0,50	

**Tabella 12. Lisata dei sondaggi realizzati da FER nella Tratta 2**

Tratta	Codice Sondaggio	Opera di riferimento	Stratigrafia			Unità geotecniche	
			da m	a m	Descrizione	Unità	Spessore m
Tratta 2 - via Larga	S1	Fermata via Larga	0,00	1,70	Terreno di riporto	1	1,70
			1,70	7,50	Limo marrone	B	5,80
			7,50	8,80	Sabbia medio fine con ghiaia	A	7,20
			8,80	10,70	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa		
			10,70	13,50	Sabbia medio fine con ghiaia		
			13,50	14,70	Sabbia fine limosa	B	5,30
			14,70	20,00	Argilla grigia		
	S2	Rampa Est fermata via Larga	0,00	2,50	Terreno di riporto	1	2,50
			2,50	3,00	Limo marrone	B	4,80
			3,00	7,30	Limo argilloso, limo sabbioso		
			7,30	8,00	Sabbia fine limosa	A	4,30
			8,00	11,60	Sabbia medio fine con ghiaia		
			11,60	13,10	Limo argilloso, limo sabbioso		
			13,10	15,00	Ghiaia eterogenea	A	1,90
	T2-1	fermata via Larga	0,00	2,50	Terreno riporto		2,50
			2,50	8,50	Limo argilloso, limo sabbioso	B	6,00
			8,50	10,00	Sabbia fine limosa	A	1,50
			10,00	13,00	Limo argilloso, limo sabbioso	B	3,00
			13,00	18,30	Sabbia medio fine con ghiaia	A	5,30
			18,30	19,20	Limo argilloso, limo sabbioso	B	0,90
			19,20	20,50	Sabbia medio fine con ghiaia	A	1,30
			20,50	23,40	Limo argilloso, limo sabbioso	B	2,9
			23,40	25,00	Sabbia fine limosa	A	1,60
			25,00	26,70	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa	B	5,00
			26,70	30,00	Limo argilloso, limo sabbioso		
	T2-2	Fermata via Larga	0,00	1,30	Terreno riporto		1,30
			1,30	6,60	Sabbia fine limosa e limo sabbioso	B	5,30
			6,60	7,60	Limo argilloso, limo sabbioso		
			7,60	11,00	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana	A	3,40
			11,00	12,30	Limo argilloso, limo sabbioso		
			12,30	17,60	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana		
			17,60	18,00	Limo argilloso, limo sabbioso		
			18,00	19,80	Ghiaia sabbiosa e sabbia grossolana		
			19,80	26,50	Limo argilloso, limo sabbioso	B	6,70
			26,50	27,50	Sabbia fine limosa e limo sabbioso		
	27,50	30,00	Limo argilloso, limo sabbioso				
	T2-A1	Fermata via Cellini	0,00	1,60	Terreno riporto	1	1,60
			1,60	7,00	Limo argilloso, limo sabbioso	B	8,40
			7,00	8,00	Argilla, argilla limosa, argilla sabbiosa		
			8,00	10,00	Limo argilloso, limo sabbioso		

#### 6.4 Prove di laboratorio FER

I risultati delle prove geotecniche di laboratorio sono riassunti nella tabella della pagina seguente. Le schede dei risultati di laboratorio sono raccolte nell'Allegato 3 alla presente relazione.



Per memoria, nella tabella seguente tratta dalla relazione di calcolo del lotto 1 San Vitale - Rimesse (cod. D0L1DSTOC001) è riportata la caratterizzazione geotecnica adottata nel PD del 2009 sulla base delle risultanze delle indagini in quel momento disponibili.

**Tabella 13. Parametri di resistenza e deformabilità assunti nel PD 2009**

Opere di riferimento	Stratigrafia di riferimento	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [gradi]	$E'$ [MPa]	Falda
Diaframmi e palancolati provvisori	da -1 a -4,3 m da p.c. (ghiaia in matrice sabbiosa)	20	0	35	-	assente
	da -4,3 a -5,8 m da p.c. (argilla marrone)	20	6	26	-	assente
	da -5,80 a -14,30 m da p.c. (ghiaia eterogenea sabbiosa)	20	0	35	-	assente
	da -5,80 a -14,30 m da p.c. (argilla sabbiosa)	20	6	26	-	assente
Galleria Naturale Bentivogli	ghiaie con sabbie	19	0	32	75	assente

$\gamma$ : peso di volume del terreno;  $c'$ : coesione di picco;  $\phi'$ : angolo di resistenza al taglio;  $E'$ : modulo di elasticità.

## 7 RISULTATI DELLE INDAGINI

Di seguito vengono illustrati i risultati ottenuti con le indagini prima richiamate e descritte le metodologie che hanno condotto al riconoscimento delle unità geotecniche lungo il tracciato delle opere, secondo il modello geologico-geotecnico appositamente sviluppato.

### 7.1 Prove penetrometriche standard SPT

Utilizzando i risultati delle prove SPT sono state ricavate indicazioni, attraverso correlazioni del valore di  $N_{spt}$  desunte dalla letteratura, riguardo ad alcuni parametri dei terreni incoerenti, quali la resistenza al taglio e la deformabilità. I valori di  $N_{spt}$  rilevati nel corso dei sondaggi e le correlazioni desunte dalla letteratura sono riportati nell'Allegato 4.

Nel grafico seguente si mostra la variazione del valore di  $N_{spt}$  con la profondità dal piano di campagna delle prove disponibili. Il grafico mostra una prevalenza di valori di  $N_{spt}$  superiori a 40 e una modesta correlazione diretta con la profondità. Una minore quantità di prove mostra valori compresi tra 15 e 35, soprattutto nella Tratta 2, che corrispondono a livelli più argillosi.

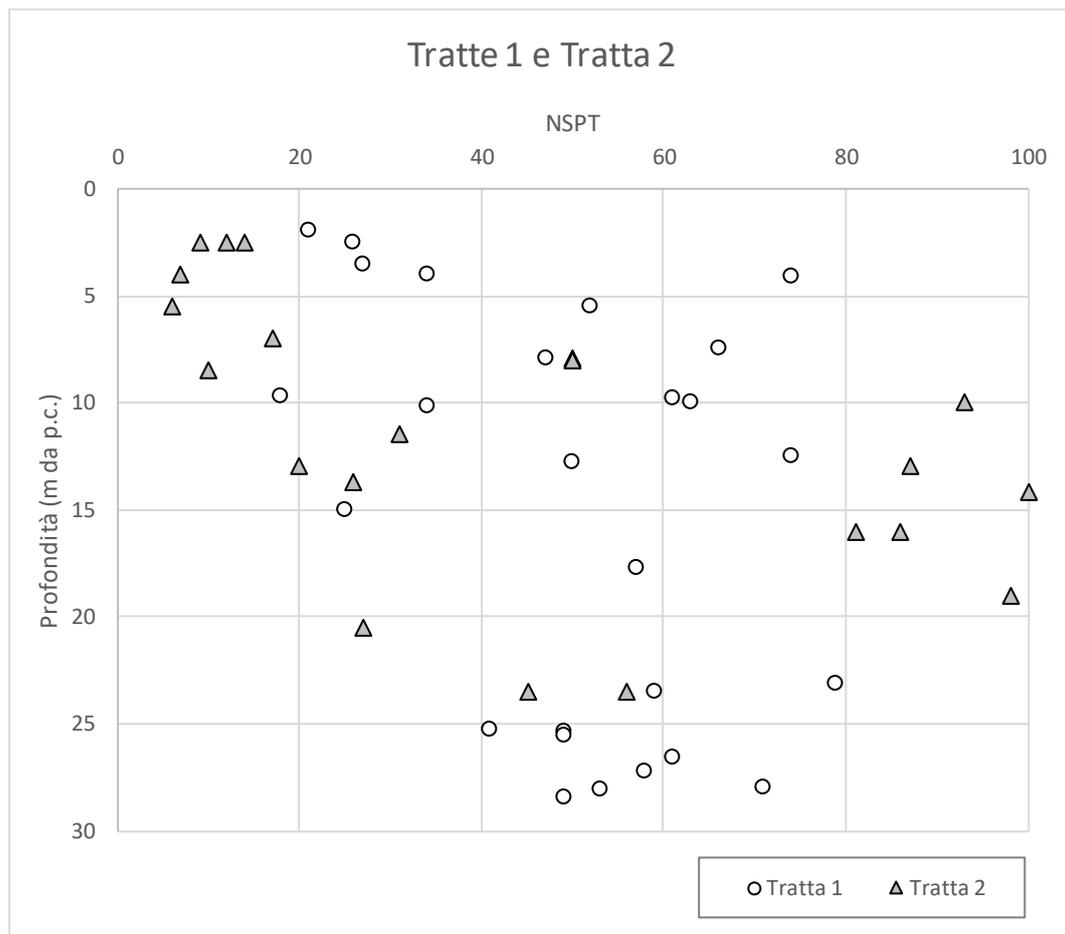


Figura 11.  $N_{spt}$  con la profondità dal piano di campagna

## 7.2 Sondaggi MASW e HVSR

Lungo il tracciato in esame sono state eseguite misure con stazione singola HVSR e *in array* MASW – ReMi – ESAC. I metodi adottati ed i risultati ottenuti sono raccolti nell'Allegato 2. La loro ubicazione è visibile sulla Planimetria con ubicazione delle Indagini Geognostiche.

Dall'analisi dei grafici si osserva che le prove *in array* hanno permesso di caratterizzare circa 40,00 – 50,00 m di sottosuolo, mentre la restante porzione è stata caratterizzata dalla correlazione con la prova a stazione singola HVSR. I risultati ottenuti in termini di Vs 30 sono:

$$Vs\ 30 \approx 290\ m/s \pm 10\%$$

Nella tabella seguente sono riassunte le singole registrazioni.

**Tabella 14. Registrazioni del microtremore sismico (HVSR 128hz) e interpretazione della Vs30 con MASW**

Tratta	Codice Registrazione HVSR	Ubicazione	Vs 30 (m/s)	
1	BOPO TR-1	Rimesse	318	
	BOPO TR-2	Rimesse	300	
	BOPO TR-3	Rimesse	293	
	BOPO TR-6	San Vitale - Sond 425-426	265	
	BOPO TR-7	San Vitale - Sond 425-426	283	
	BOPO TR-8	San Vitale - Sond 427	269	
	BOPO TR-9	San Vitale - Sond 429	283	
	BOPO TR-10	San Vitale - Sond 423	298	
	2	BOPO TR-4	Via Larga - Sond 433	283
		BOPO TR-5	Via Larga - Sond 433	258
BOPO TR-11		Via Larga - Sond 433	276	
BOPO TR-12		Via Larga - Sond 514	287	

## 7.3 Analisi granulometriche e caratteristiche di plasticità

I risultati delle analisi granulometriche eseguite sui campioni provenienti dai sondaggi a carotaggio realizzati in occasione della campagna di indagini geognostiche sono riportati nell'Allegato 5 e rappresentati nelle figure nei paragrafi 8.3 e 8.4.

L'indice di plasticità relativo ai campioni di terreno con frazione fine compresa tra il 20% e il 50% è compreso tra 0.5 e 10.4 (materiale da non plastico a poco plastico).

L'indice di plasticità, relativo ai campioni di terreno coesivo, è compreso tra 1.1 e 7.1 (materiale da non plastico a poco plastico).

## 8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

### 8.1 Individuazione e descrizione delle unità geotecniche

Sulla base delle indagini in sito e prove di laboratorio citate precedentemente, sono state riconosciute due differenti unità geotecniche lungo il tracciato. La suddivisione è stata attuata differenziando i terreni non coesivi a granulometria prevalente grossolana dai terreni coesivi, o debolmente coesivi, a granulometria prevalente fine.

- **Unità A: ghiaie in matrice sabbiosa e limosa**
- **Unità B: limi più o meno argillosi, localmente sabbiosi**

Esula da questi criteri la caratterizzazione dell'orizzonte più superficiale, costituito da terreni di riporto, i quali, a causa del loro modesto spessore (0,4-2,9 m) e della loro grande eterogeneità geotecnica, sono caratterizzati caso per caso.

Al fine di assegnare una forchetta di valori caratteristici delle unità geotecniche riconosciute, e ove possibile indicare un valore consigliato per i calcoli geotecnici, si è adottato un metodo statistico, coadiuvato da giudizi esperti che in questo caso si giustificano data la notevole variabilità verticale ed orizzontale delle caratteristiche meccaniche dei materiali in esame.

La stima dei parametri geotecnici, realizzata sulla base dei risultati del gruppo di prove disponibili, si è basata sul calcolo dei valori minimo, massimo, medio, la deviazione standard ed il valore caratteristico, secondo i principi base dell'Eurocodice e delle Nuove Norme Tecniche delle Costruzioni. Il valore caratteristico è stato ottenuto attraverso la seguente relazione:

$$X_k = \mu_\varphi + k_n \cdot \sigma_\varphi$$

dove, per una distribuzione normale:

$$k_n = \frac{-1.645}{\sqrt{n}}$$

Nel seguito viene fornita la descrizione e parametrizzazione delle unità geotecniche lungo il tracciato.

### 8.2 Terreno superficiale di riporto (TR)

Si tratta di un orizzonte continuo al tetto del profilo stratigrafico, rilevato in tutte le verticali di indagine, di spessore variabile tra 0,4 e 2,9 m.

Dal punto di vista granulometrico tale unità presenta una notevole eterogeneità, essendo composta, a seconda delle verticali considerate, da limi sabbioso-argillosi, sabbie con ghiaie e/o materiali di origine antropica quali frammenti di laterizi e calcestruzzo.

Dati la limitata rilevanza di questo strato ai fini della realizzazione dell'opera, la sua notevole eterogeneità laterale e la mancanza di prove specifiche su questi materiali, la sua parametrizzazione non ha potuto essere univoca ed è stata valutata opera per opera.

### 8.3 Unità A - Ghiaia e sabbia

Questa unità è caratterizzata da una distribuzione spaziale variabile sia in senso orizzontale che verticale. Granulometricamente è rappresentata prevalentemente da sabbie e ghiaie, con frazione limosa variabile, con locale presenza di ciottoli di dimensione 2-4 cm, raramente superiori a 10 cm. Non si riscontra cementazione, né livelli localizzati di cementazione. I materiali sono normal-consolidati.

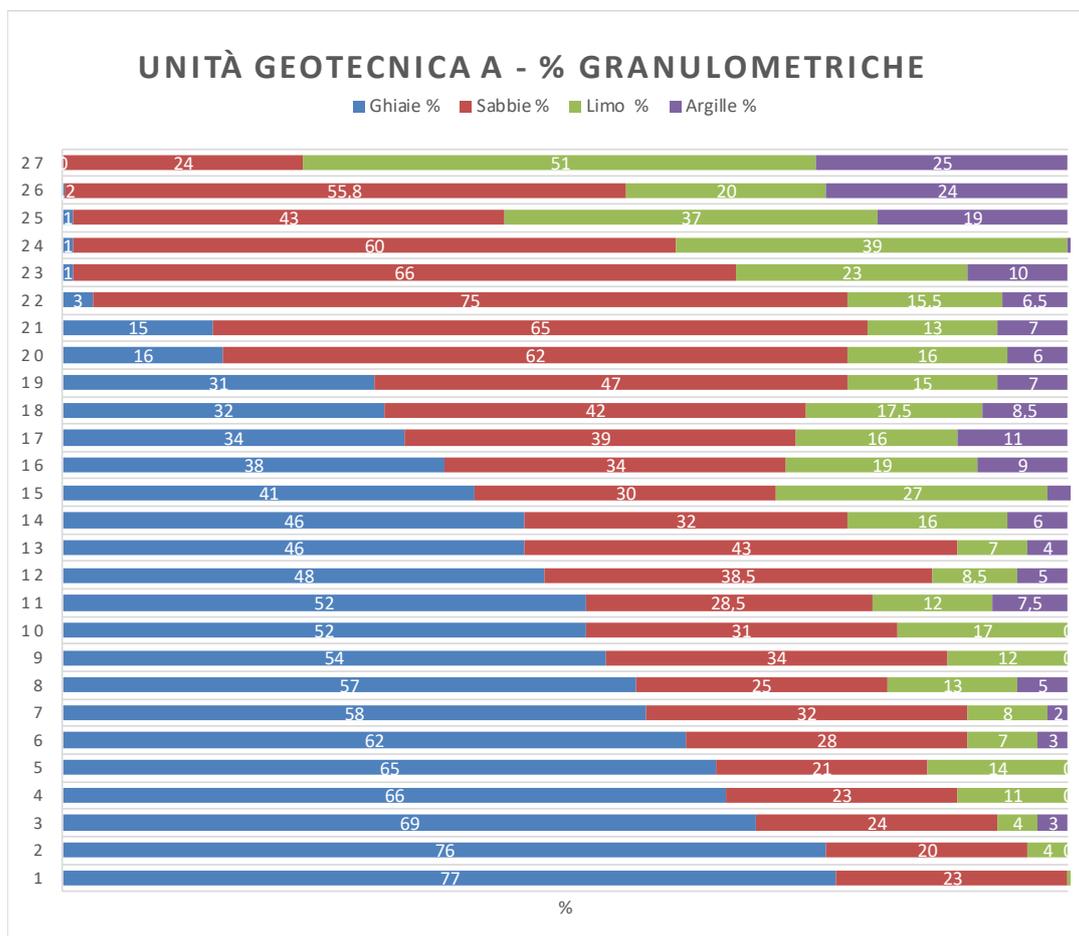


Figura 12: Analisi granulometriche nell'Unità Geotecnica A

Questa unità si ritrova lungo l'intera estesa della Tratta 1 dalla base del terreno di riporto fino a profondità variabili tra 11 e 17 m dal p.c. Nella tratta 2 è stato riscontrato un livello continuo di questa unità geotecnica ad una profondità maggiore, compresa tra circa 7,5 m e 15 m da p.c.

Il peso di volume del terreno ( $\gamma$ ) è valutato compreso tra 19 e 21 kN/m<sup>3</sup>, per i calcoli geotecnici si suggerisce di adottare il valore di 20 kN/m<sup>3</sup>.

Alla coesione di picco ( $c'$ ) e non drenata ( $c_u$ ) è assegnato un valore nullo, sulla base della natura granulometrica del materiale e dell'assenza di cementazione.

L'angolo di resistenza al taglio di questa unità geotecnica incoerente è stato stimato sulla base di correlazioni empiriche con il valore di  $N_{spt}$ . In particolare, le correlazioni Peck-Hanson & Thornburn, Japanese National Railway, Road Bridge Specification e De Mello 1971 (cfr. Allegato 2)

**Road Bridge Specification (1982):** il metodo è valido per sabbie fini o limose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8 - 10 m per terreni sopra falda e superiori a 15 m per terreni in falda ( $\sigma > 1520$  t/mq). Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\phi = \text{RADQ}(15 \cdot N_{spt}) + 15$$

**Japanese National Railway (1999):** questo metodo è valido per sabbie da medie a grosse fino a sabbie ghiaiose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità superiori a 8 - 10 m nel caso di terreni sopra falda e di 15 m per terreni immersi in falda ( $\sigma > 15-20$  t/mq).

Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\phi = 0,3 \cdot N_{spt} + 27$$

**De Mello (1971)** è valido per le sabbie in genere e per qualunque profondità, tranne che per i primi 2 m sotto il p.c. È da considerarsi inattendibile però per valori di  $\phi$  superiori a  $38^\circ$ . Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\phi = 19 - 0,38 \cdot \sigma + 8,73 \cdot \text{Log}(N_{spt})$$

dove  $\sigma$  è la pressione litostatica efficace a metà strato in  $\text{kg/cm}^2$ .

**Peck-Hanson & Thornburn (1974)** hanno elaborato un metodo valido per le sabbie in genere, che trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova inferiori a circa 5 m per terreni sopra falda e inferiori a circa 8 m per terreni in falda (pressione efficace inferiore a 8-10 t/m<sup>2</sup>). La relazione proposta da questi autori è la seguente:

$$\phi = 27,2 + 0,28 \cdot N_{spt}$$

Viste le correlazioni descritte sopra, la natura dei terreni e la variabilità dei valori  $N_{spt}$  misturati, i valori di angolo di attrito suggeriti per l'unità geotecnica A sono compresi tra  $38^\circ$  e  $42^\circ$ . Il valore pari a  $38^\circ$  può essere considerato come indicativo dei materiali di questa unità geotecnica.

Il Modulo di elasticità è stato anch'esso valutato sulla base delle correlazioni empiriche con la misura  $N_{spt}$ . A questo scopo, tra i vari modelli proposti in letteratura, sono stati considerati alcuni che considerano le condizioni che meglio approssimano la formazione in oggetto, che risulta di natura ghiaiosa sabbiosa, con presenza di matrice a tratti limosa ed anche, a tratti, con componenti argillose, fuori falda. Nell'allegato Allegato 2 sono presentati i risultati dei calcoli effettuati per ogni prova  $N_{spt}$ .

**Schmertmann (1978)** propone una correlazione valida per sabbie in genere. La relazione non considera l'influenza della pressione efficace, che porta a parità di  $N_{spt}$  ad una diminuzione di  $E$  con la profondità. Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2B \cdot N_{spt}$$

dove il coefficiente "B" varia in funzione della granulometria del materiale.

B	Tipo di materiale
4	sabbia fine
6	sabbia media
10	sabbia grossolana

Nel sito in esame sono stati considerati i primi due casi, assumendo che il materiale presente lungo la linea si approssimi maggiormente a queste due categorie individuate dall'autore.

È stato inoltre applicato il metodo di **Webb**, valido per sabbia sotto falda o sabbia con fine plastico. Anche questo metodo, come il precedente, non considera l'influenza della pressione efficace, che porta a parità di  $N_{spt}$  ad una diminuzione di  $E$  con la profondità.

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 4,87 \cdot N_{spt} + 73 \text{ (Sabbia satura)}$$

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3,22 \cdot N_{spt} + 16 \text{ (Sabbia con fine plastico)}$$

Per il sito in esame è stato considerato il caso di sabbia con fine plastico, data la presenza di limi e seppur in minor quantità, anche di argilla.

Il metodo proposto da **Tornaghi et al.** è valido per sabbia con ghiaia e sabbia pulita. La relazione proposta da questi autori non considera l'influenza della pressione efficace, che porta a parità di  $N_{spt}$  ad una diminuzione di  $E$  con la profondità. Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$E \text{ (MPa)} = B \cdot \text{RADQ}(N_{spt})$$

dove  $B$  è una costante pari a 7 Mpa.

Il metodo di **D'Appolonia et al. (1970)**. è valido per sabbia con ghiaia e sabbie sovra consolidate. Il metodo non considera l'influenza della pressione efficace, che porta a parità di  $N_{spt}$  ad una diminuzione di  $E$  con la profondità. Il metodo si basa sulla seguente relazione:

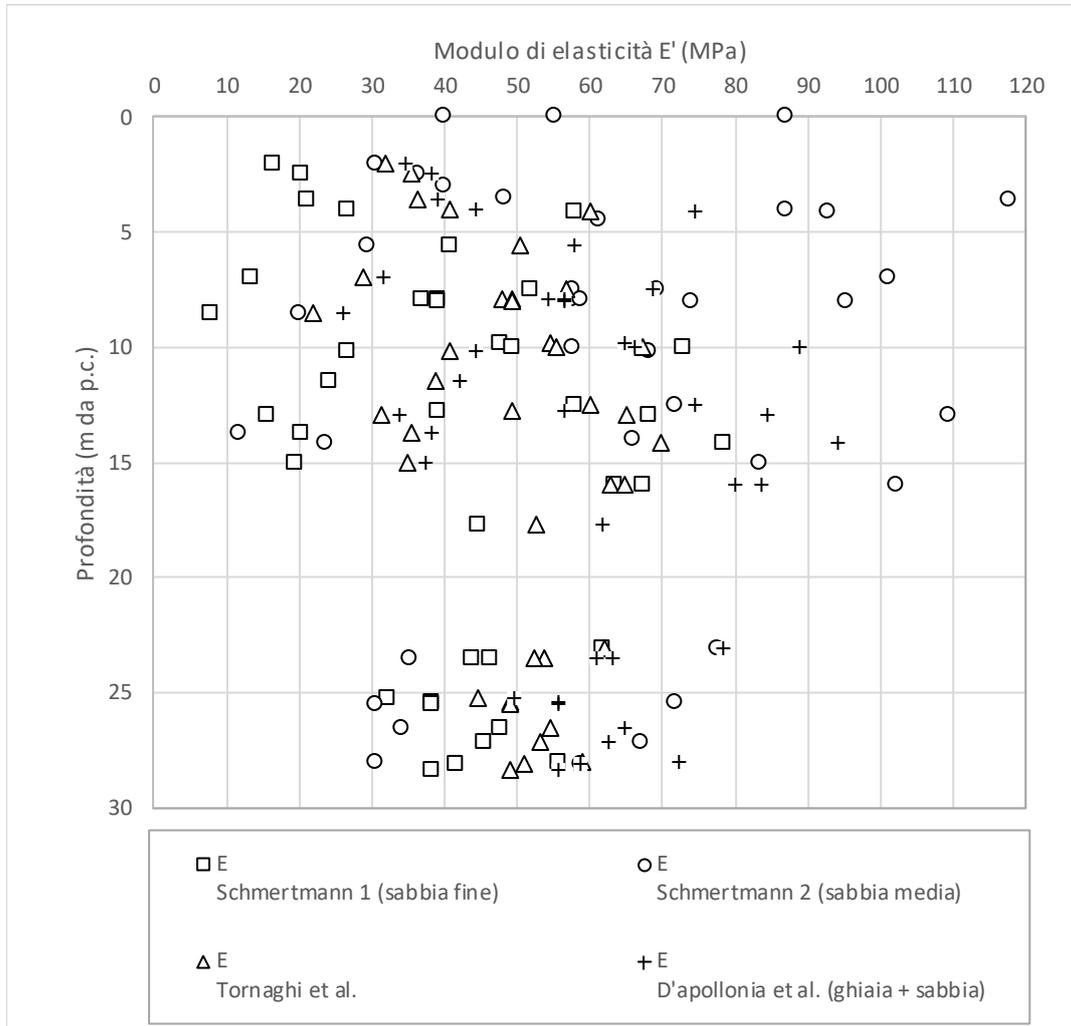
$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 7,71 \cdot N_{spt} + 191 \text{ (Ghiaia + sabbia)}$$

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 10,63 \cdot N_{spt} + 375 \text{ (Sabbia sovra consolidata)}$$

I risultati delle prove penetrometriche standard (SPT) sono riportati nell'Allegato 4. La tabella della pagina seguente mostra il riassunto dei risultati ottenuti e le correlazioni empiriche per la stima dei parametri geotecnici.

Tratta	Sondaggio	Opera di riferimento	Risultati delle prove SPT							U.G.	Descrizione	Valutazioni empiriche sulla base dei valori di NSPT																					
			DA	A	N1	N2	N3	NSPT	φ Peck-Hanson & Thornburn			φ Japanese national railway	φ Road bridge specification	φ De Mello 1971	E Tornaghi et al.	E Schmertmann 1 (sabbia fine)	E Schmertmann 2 (sabbia media)	E Schmertmann 3 (sabbia grossa)	E D'apollonia et al. (ghiaia + sabbia)	E Webb (sabbia satura)	E Webb (sabbia con fine plastico)	Modulo Edometrico Farrent	E Terzaghi										
			m da p.c.	m da p.c.	colpi	colpi	colpi	colpi	(*)			(*)	(*)	(*)	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa								
Tratta 1	S1	GN via	28,10	28,55	11	31	22	53	A	GS	(*)	(*)	(*)	(*)	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	32	18	37	50					
			4,10	4,55	21	31	43	74	A	GS / SG	48	49	48	35	60	58	87	145	75	43	25	52	59	43	25	52	59						
	S2	Fermata via Libia Rampa Est GN Bentivoglio	7,90	8,35	22	27	20	47	A	GS	40	41	42	34	48	47	37	55	92	54	30	16	33	47	30	16	33	47					
			10,20	10,65	26	15	19	34	A	GS	37	37	38	32	41	27	40	67	44	23	12	24	40	23	12	24	40						
			12,80	13,25	17	28	22	50	A	GS	41	42	42	34	49	39	59	98	57	31	17	35	49	31	17	35	49						
			23,10	23,55	22	39	40	79	A	S / SL	49	51	49	36	62	62	93	155	78	45	27	55	61	45	27	55	61						
			25,40	25,85	16	23	26	49	A	SL-LS / GS	41	42	42	34	49	38	58	96	56	31	17	34	48	31	17	34	48						
			27,20	27,65	20	27	31	58	A	SL-LS / GS	43	44	44	34	53	46	68	114	63	35	20	40	52	35	20	40	52						
			3,50	3,95	30	46	-	-	R	A	GS																						
			7,50	7,95	20	28	38	66	A	GS	46	47	46	35	57	52	78	129	69	39	22	46	56	39	22	46	56						
	9,80	10,25	23	29	32	61	A	GS	44	45	45	35	55	48	72	120	65	36	21	42	54	36	21	42	54								
	S3	Rampa Ovest Fermata Rimesse	17,70	18,15	19	28	29	57	A	GSL	43	44	44	34	53	45	67	112	62	34	20	40	52	34	20	40	52						
			25,30	25,75	19	16	25	41	A	SAL(G)	39	39	40	33	45	32	48	80	50	27	15	29	44	27	15	29	44						
	T1-1	Fermata via Libia	28,40	28,85	14	20	29	49	A	SG	41	42	42	34	49	38	58	96	56	31	17	34	48	31	17	34	48						
			3,00	4,30	50	-	-	-	R	A	S-L/G-SL																						
			4,50	5,80	38	50	-	-	R	A	SL-G																						
			6,50	7,80	50	-	-	-	R	A	LA-G/G-SL																						
			8,00	9,30	50	-	-	-	R	A	G-SL/SL																						
			4,00	5,30	8	14	20	34	A	SL+G	37	37	38	40	41	27	40	67	44	23	12	24	40	23	12	24	40						
			5,55	6,85	15	22	30	52	A	S+G	42	43	43	41	50	41	61	102	58	32	18	36	50	32	18	36	50						
7,50			8,80	50	-	-	-	R	A	G-L																							
10,00			11,30	24	30	33	63	A	G-LA	45	46	46	43	56	49	74	124	66	37	21	44	54	37	21	44	54							
12,50			13,80	27	35	39	74	A	G-SL	48	49	48	44	60	58	87	145	75	43	25	52	59	43	25	52	59							
T1-2	Fermata via Libia	15,00	16,30	8	10	15	25	A	G	34	35	34	45	35	20	29	49	38	19	9	17	34	19	9	17	34							
		23,50	24,80	19	27	32	59	A	S+L	44	45	45	46	54	46	69	116	63	35	20	41	53	35	20	41	53							
		25,55	26,85	18	16	33	49	A	S+L	41	42	42	47	49	38	58	96	56	31	17	34	48	31	17	34	48							
		26,55	27,85	19	28	33	61	A	S+L+G	44	45	45	48	55	48	72	120	65	36	21	42	54	36	21	42	54							
		28,00	29,30	23	33	38	71	A	LS-G/S+L+G	47	48	48	49	59	56	84	139	72	41	24	49	58	41	24	49	58							
		31,55	32,85	8	12	18	30	A	S/L-G	36	36	36	50	38	24	35	59	41	21	11	21	38	21	11	21	38							
		36,00	37,30	9	11	15	26	A	G-LS	34	35	35	51	36	20	31	51	38	20	10	18	35	20	10	18	35							
		37,55	38,85	8	13	16	29	A	S-L-G	35	36	36	52	38	23	34	57	41	21	11	20	37	21	11	20	37							
		2,50	3,80	16	12	14	26	A	SL	34	35	35	53	36	20	31	51	38	20	10	18	35	20	10	18	35							
		2,00	2,45	5	8	13	21	A	GS	33	33	33	31	32	16	25	41	35	17	8	15	31	17	8	15	31							
S4	Fermata Rimesse	3,60	4,05	20	18	9	27	A	GS / SG	35	35	35	31	36	21	32	53	39	20	10	19	36	20	10	19	36							
		9,70	10,15	10	13	5	18	B	GA / A	32	32	31	30	30	14	21	35	32	16	7	13	29	16	7	13	29							
Tratta 2 via Larga	S1	Fermata via Larga	7,90	8,35	23	25	25	50	A	SL	41	42	42	34	49	39	59	98	57	31	17	35	49	31	17	35	49						
			11,50	11,95	16	17	14	31	A	SG	36	36	37	32	39	24	36	61	42	22	11	22	38	22	11	22	38						
			13,70	14,15	5	7	19	26	A	S / GS	34	35	35	31	36	20	31	51	38	20	10	18	35	20	10	18	35						
			14,15	14,60	35	50	50	100	A	S / GS	55	57	54	36	70	78	118	196	94	55	33	70	69	55	33	70	69						
			14,00	14,20	35	R	R	R	A	GS	41	42	42	34	49	39	59	98	57	31	17	35	49	31	17	35	49						
	T2-1	Fermata via Larga	2,50	3,80	3	5	4	9	B	LA/LAS	30	30	27	36	21	7	11	18	26	11	4	6	21	11	4	6	21						
			8,50	9,80	3	5	5	10	A	LA-LAS+SL	30	30	27	37	22	8	12	20	26	12	5	7	22	12	5	7	22						
			13,00	14,30	3	6	14	20	A	G+LA	33	33	32	38	31	16	24	39	34	17	8	14	31	17	8	14	31						
			16,00	17,30	18	38	43	81	A	G+S	50	51	50	39	63	64	95	159	80	46	27	56	62	46	27	56	62						
			20,50	21,80	18	12	15	27	B	L+S/LA	35	35	35	40	36	21	32	53	39	20	10	19	36	20	10	19	36						
T2-2	Fermata via Larga	23,50	24,80	18	24	32	56	A	SL+G/SL	43	44	44	41	52	44	66	110	61	34	19	39	51	34	19	39	51							
		2,50	3,80	5	7	7	14	B	SL	31	31	29	42	26	11	16	27	29	14	6	10	26	14	6	10	26							
		4,00	5,30	5	3	4	7	B	SL+G	29	29	25	43	19	5	8	14	24	11	4	5	18	11	4	5	18							
		7,00	8,30	7	7	10	17	A	LA-SL	32	32	31	44	29	13	20	33	32	15	7	12	28	15	7	12	28							
		10,00	11,30	26	43	50	93	A	G+S	53	55	52	45	68	73	109	182	89	52	31	65	66	52	31	65	66							
		13,00	14,30	38	37	50	87	A	G+LS	52	53	51	46	65	68	102	171	85	49	29	61	64	49	29	61	64							
		14,50	15,80	35	50	-	-	R	A	LA-LAS/G+LS																							
		16,00	17,30	35	42	44	86	A	G-SL	51	53	51	48	65	67	101	169	84	48	29	60	64	48	29	60	64							
		19,00	20,30	37	48	50	98	B	G-SL	55	56	53	49	69	77	115	192	93	54	33	68	68	54	33	68	68							
		23,50	24,80	11	15	30	45	B	LAS-LA	40	41	41	50	47	35	53	88	53	29	16	31	46	29	16	31	46							
T1-A2	Fermata via Cellini	2,50	3,80	4	5	7	12	B	LA-LS/L+S	31	31	28	51	24	9	14	24	28	13	5	8	24	13	5	8	24							
		5,50	6,80	4	3	3	6	B	LA-LAS	29	29	24	52	17	5	7	12	23	10	3	4	17	10	3	4	17							

Il grafico seguente mostra la variazione del modulo di elasticità con la profondità, desunto dalle correlazioni con le prove Nspt.



**Figura 13: Variazione del modulo di elasticità con la profondità nell'Unità Geotecnica A, desunto dalle prove Nspt.**

Sulla base di queste correlazioni, per questa unità geotecnica si individua una forchetta di valori caratteristici del modulo di elasticità compresa tra 35 e 50 MPa. Tuttavia, poiché esso risulta variabile con la profondità, al fine dei calcoli geotecnici delle opere in progetto, si suggerisce di adottare un valore pari a 35 MPa fino a 20 m di profondità, e pari a 50 MPa da 20 a 30 m di profondità.

#### 8.4 Unità B - Limo e argilla

Questa unità geotecnica caratterizza i livelli limoso argillosi con una continuità laterale tra sondaggi contigui presenti lungo la linea.

Nella Tratta 1, in corrispondenza della fermata Libia, dove si trova anche la galleria naturale Bentivogli, l'unità B giace sottostante alla unità A, a partire da circa 17 m da p.c., e risalente fino

a 11 m circa da p.c. in corrispondenza del sondaggio 3, lungo la rampa est della citata fermata. Dal lato est della stazione della fermata Libia è stato rilevato un livello discontinuo di unità B alla profondità di circa 5 m da p.c., potente circa 1 m.

In corrispondenza della fermata Rimesse, sempre nella Tratta 1, l'unità B si incontra a profondità di 5 m da p.c., per uno spessore di 2,3 m, e poi nuovamente alla profondità di circa 10 m da p.c. fino a fondo foro del sondaggio S4 (15 m da p.c.).

Nella Tratta 2 in corrispondenza della fermata di via Larga l'Unità B è più superficiale e continua, essendo presente da p.c. fino a circa 7,5-11 m di profondità.

Per quanto riguarda la granulometria di questa Unità, i campioni provenienti dai sondaggi e analizzati in laboratorio mettono in luce la presenza di terreni prevalentemente limoso-argillosi, più raramente argilloso limosi, con una componente sabbiosa sempre presente ma molto variabile, da meno di 2% a 39%.

I risultati delle prove granulometriche sono riassunti nel grafico seguente.

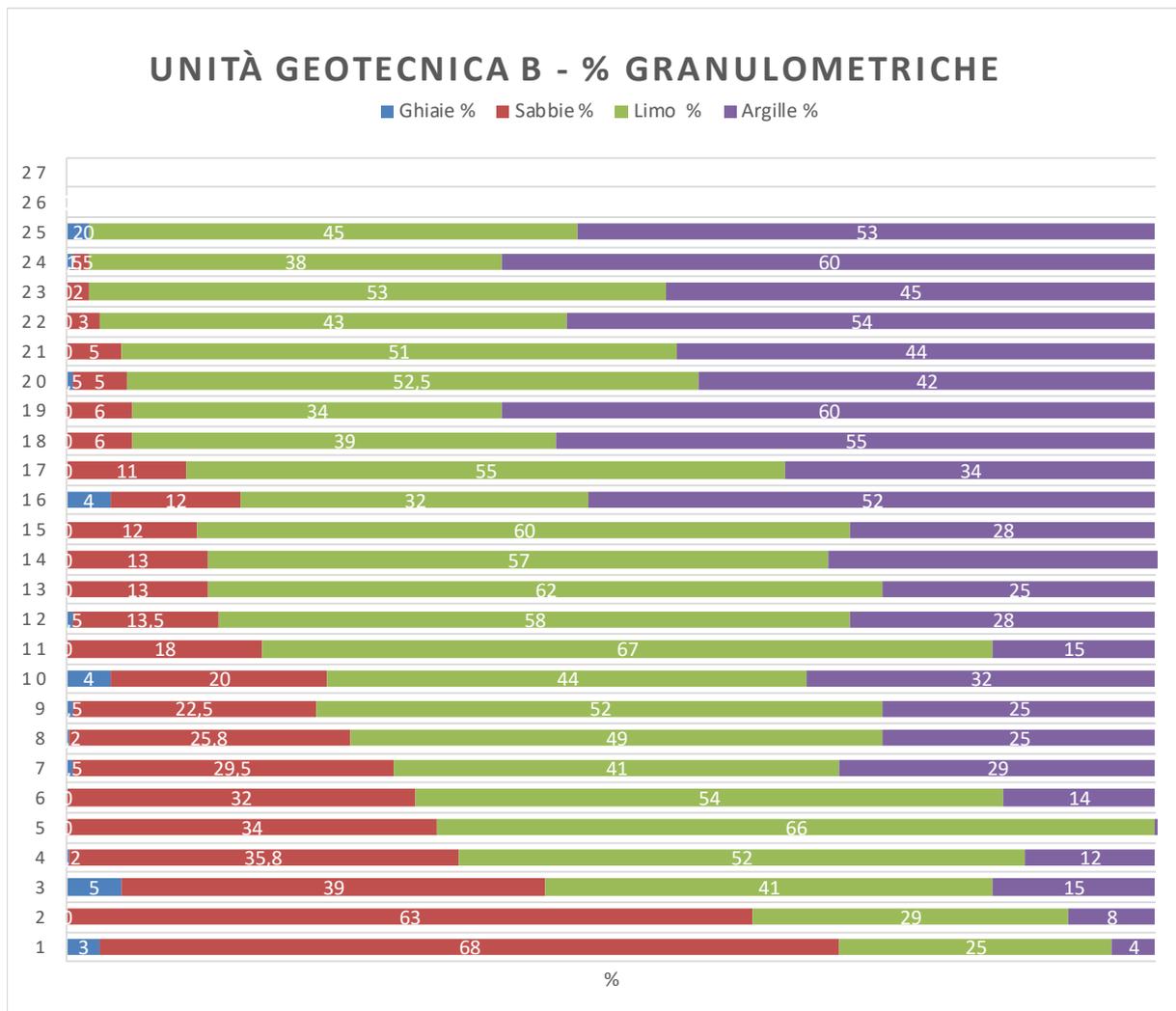
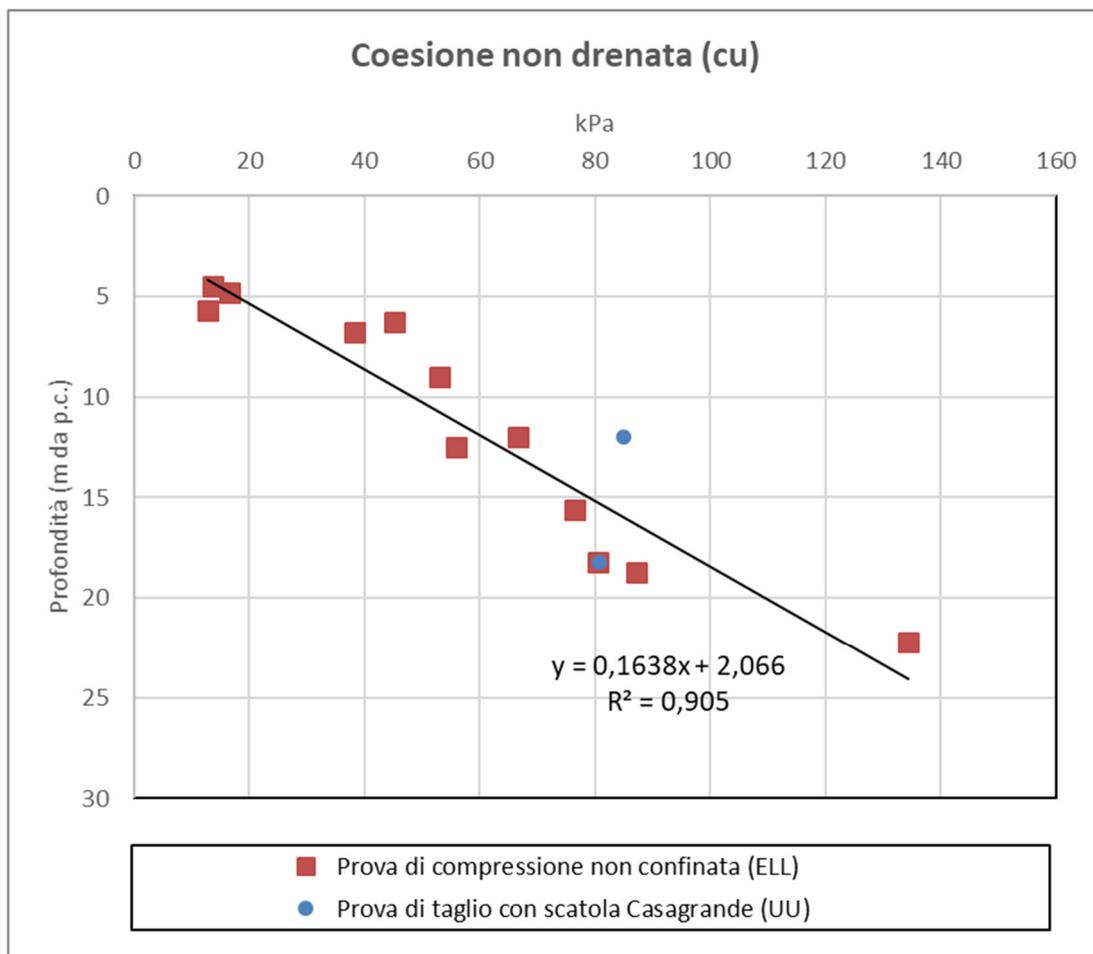


Figura 14: Analisi granulometriche nell'Unità Geotecnica B.

La coesione di picco  $c'$  è stata misurata in laboratorio mediante prove di taglio diretto consolidate e drenate (TCD). Dall'analisi dei risultati dei dieci campioni analizzati si individuano valori compresi tra 6 e 15 kPa, ed un valore rappresentativo per i calcoli pari a 10 kPa.

La coesione non drenata ( $c_u$ ) è stata misurata in laboratorio mediante la prova di compressione non confinata (ELL) e la prova di taglio con la scatola di Casagrande. I risultati permettono di constatare la variazione con la profondità di questo parametro, che è mostrata nel grafico seguente. I valori di  $c_u$  sono da ritenersi indicativi, perché entrambe le tipologie di prova menzionate non consentono il controllo delle pressioni neutre e, pertanto, non è possibile realizzare condizioni perfettamente non drenate.

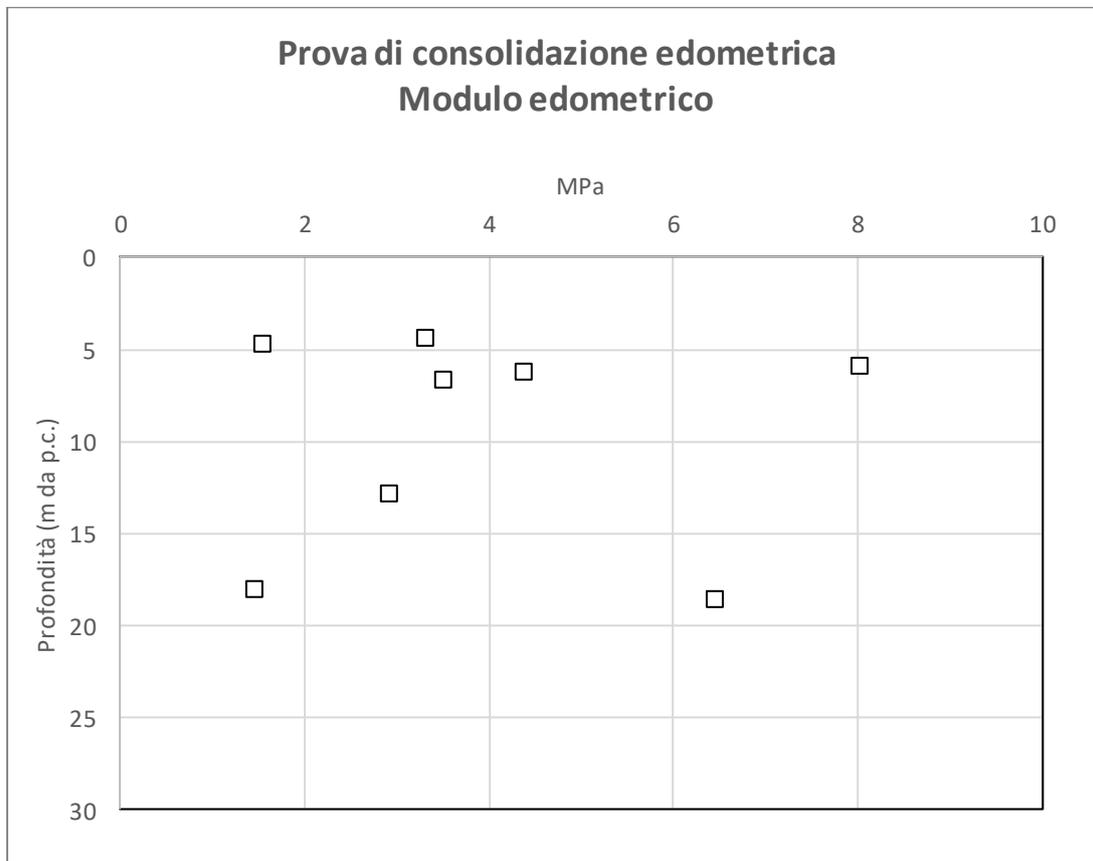


**Figura 15: Relazione tra la coazione non drenata  $c_u$  e la profondità nell'Unità Geotecnica B**

L'angolo di resistenza al taglio di picco  $\phi'$  è misurato tramite la prova di taglio diretto consolidata e drenata (TCD). Scartando i valori massimi e minimi è possibile indicare una variazione tra  $21^\circ$  e  $34^\circ$ , ed un valore caratteristico pari a  $25^\circ$ .

Il modulo edometrico ( $E_{ed}$ ) è stato calcolato dai risultati di prove di consolidazione edometrica (IL), negli intervalli di pressione efficace corrispondenti alle profondità di prelievo dei campioni, comprese tra 5 e 20 m. Il grafico seguente mostra i risultati disponibili, scremati dei valori estremi ritenuti meno significativi. La relazione ottenuta è da utilizzare con cautela dato l'esiguo numero

di prove disponibili. Per una caratterizzazione dell'Unità Geotecnica B si suggerisce di adottare valori di  $E_{ed}$  compresi tra 3 e 5 MPa fino a 10 m di profondità.



**Figura 16: Relazione tra il modulo di elasticità e la profondità nell'Unità Geotecnica B**

In mancanza di prove specifiche (triassiali consolidate isotropicamente e non drenate -TX CIU), il modulo di deformazione in condizioni non drenate ( $E_u$ ) è stato ottenuto utilizzando l'abaco di Duncan e Buchignani (1976) riportato in Figura 17. L'abaco esprime la dipendenza funzionale tra modulo di deformazione non drenato (corrispondente al 50% della massima resistenza in prova non drenata,  $E_{u50}$ ), e coesione non drenata ( $c_u$ ), secondo la relazione

$$E_u = K \cdot c_u$$

In cui  $K$  dipende dall'indice di plasticità ( $I_p$ ) e dal grado di sovraconsolidazione (OCR).

Nel caso specifico, sono stati selezionati i campioni per i quali fosse disponibile un valore di  $I_p$  e di  $c_u$  e determinato l'OCR dai risultati delle prove edometriche disponibili. I valori ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

Tutti i campioni esaminati hanno  $I_p < 30$ , per cui rientrano nella regione dell'abaco che mostra la maggiore dispersione dei dati (Figura 17). Si è scelto, pertanto, di considerare i valori di  $K$  ricavati dal limite inferiore del campo con  $I_p < 30$ .

I campioni prelevati nei primi 7,00m di profondità hanno  $OCR > 1$ ; per profondità maggiori, la formazione è prevalentemente normal-consolidata ( $OCR = 1$ ). Per i campioni mancanti della

corrispondente prova edometrica, si è assunto un OCR coerente coi valori misurati e la profondità di prelievo del campione.

I dati sono stati interpretati individuando 3 valori di  $E_u$  ed i corrispondenti intervalli di profondità.

In Figura 18 è sono riportati i punti corrispondenti ai valori di  $E_u$  ricavati e la funzione a gradini assunta per interpretare i valori di calcolo.

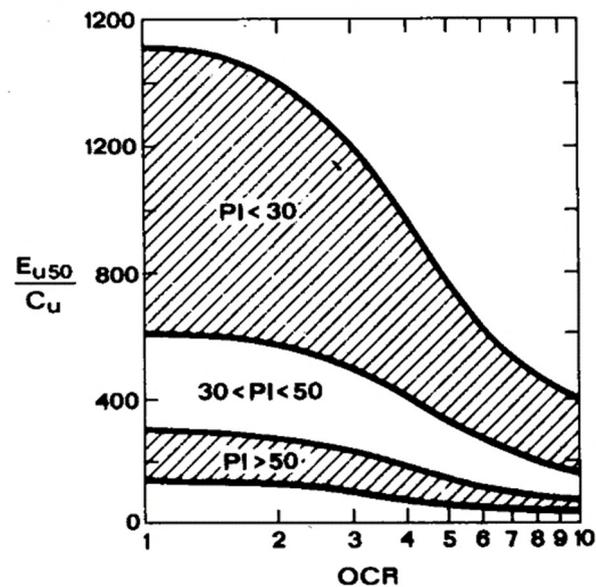


Figura 17: Relazione di Duncan e Buchignani (1976) per la determinazione del rapporto  $E_u/c_u$

Sondaggio	Profondità			$l_p$	$c_u$ [kPa]	OCR	$E_u/c_u$	$E_u$ [MPa]
	da [m]	a [m]	media [m]					
S2	4,5	5	4,75	7	13,73	7	400	5
S3	4,8	5,2	5	34	16,67	1	600	10
S2	6	6,35	6,175	17	108,85	6	400	44
S1	6,3	6,9	6,6	32	45,11	3	500	23
S4	6,8	7,3	7,05	11	38,25	3	500	19
S1	9	9,6	9,3	18	52,96	1*	600	32
S4	12	12,5	12,25	20	66,69	1*	600	40
S2	12,5	13	12,75	22	55,90	1*	600	34
S3	13	13,5	13,25	25	16,67	1	600	10
S3	15,6	16,1	15,85	11	76,49	1*	600	46
S2	18,2	18,8	18,5	61	80,41	1	600	48
S1	18,7	19,2	18,95	24	87,28	1	600	52
S3	22,2	22,7	22,45	20	134,35	1*	600	81

\* indica i valori di OCR desunti dall'andamento con la profondità e non definiti da prova edometrica

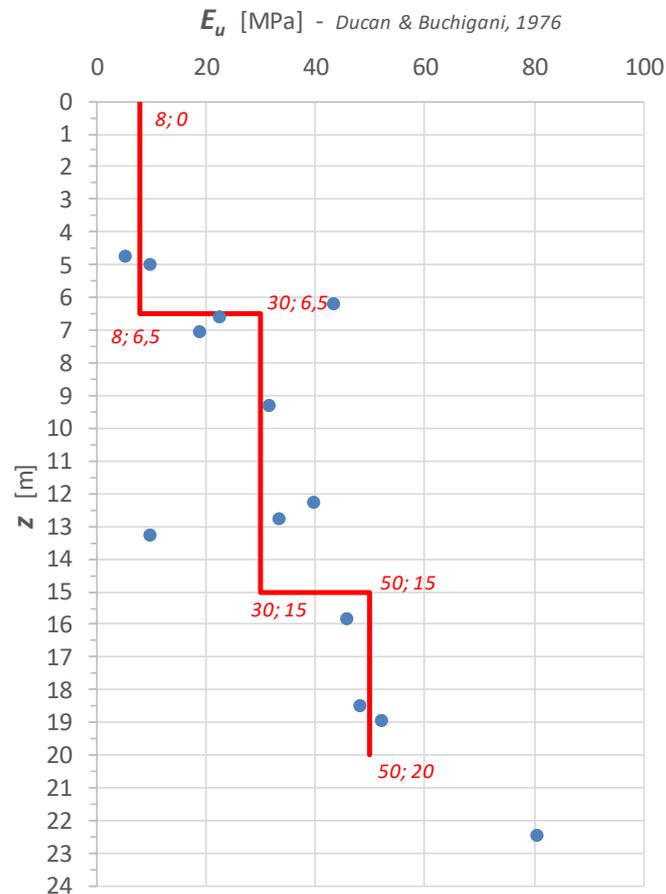


Figura 18: Andamento del modulo elastico non drenato,  $E_u$ , con la profondità: i punti sono i valori calcolati, la funzione a gradini è il modello interpretativo assunto per l'UG B.

## 8.5 Sintesi della caratterizzazione geotecnica

Nel complesso i terreni interessati dalle indagini svolte, presentate nelle pagine precedenti, appartengono ad un deposito quaternario di conoide fluviale, continentale, che in accordo alla sua stessa genesi si compone da alternanze di livelli sabbioso ghiaiosi in matrice sabbioso limosa e livelli più fini, limoso argillosi e raramente argilloso limosi. Tutti i depositi dell'apparato di conoide si presentano normal-consolidati. Non sono presenti fenomeni di cementazione.

È ragionevole descrivere le unità geotecniche riconosciute in termini di un volume rappresentativo dello stesso terreno in funzione delle differenze granulometriche significative tra le unità.

Per quanto attiene i parametri di resistenza e deformabilità delle unità geotecniche sono riportati i valori dei parametri di resistenza  $c'$  e  $\phi'$ , nonché del modulo di deformabilità.

Nella tabella seguente sono riportati i parametri per le varie unità geotecniche. Per ogni parametro è indicata una forchetta di valori tipici e, tra parentesi, ove possibile un valore consigliato.

**Tabella 15. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche**

Unità geotecniche	$\gamma$	$c'$	$C_u$	$\phi'$	$E'$	$E_{ed}$	$E_u$
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	kPa	[gradi]	MPa	MPa	MPa
Unità A Ghiaie e sabbie	19-21 (20)	0	0	38-42 (38)	35-50 (varia con la profondità)	-	-
Unità B Limi e argille	18-20 (19)	6-15 (10)	50-80 (varia con la profondità)	21-34 (25)	-	3-5 (varia con la profondità)	z = 0 - 6.5m <b><math>E_u</math></b> = 8Mpa; z = 6.5 – 15m <b><math>E_u</math></b> = 30Mpa; z = 15 - 25m <b><math>E_u</math></b> = 50Mpa (varia con la profondità)

$\gamma$ : peso di volume del terreno;  $c'$ : coesione di picco;  $c_u$ : coesione non drenata;  $\phi'$ : angolo di resistenza al taglio;  $E'$ : modulo di elasticità;  $E_{ed}$ : modulo edometrico (drenato),  $E_u$ : modulo non drenato.

## 9 ZONAZIONE GEOTECNICA LUNGO IL TRACCIATO

La caratterizzazione geotecnica dei terreni ha condotto alla discretizzazione delle unità geotecniche lungo il tracciato dell'opera, in corrispondenza delle opere. La distribuzione delle unità lungo il tracciato è stata, infatti, possibile sulla base delle informazioni provenienti dalle singole verticali d'indagine, che seppur omogeneamente distribuite e numericamente sufficienti, non permettono di escludere, all'interno di ciascuna tratta, un andamento dei contatti tra le singole unità differente da quello proposto.

**Tabella 16. Zone delle tratte e sondaggi di riferimento per la caratterizzazione geotecnica**

Tratta	Opera	PK	PK	L (m)	Sondaggi di riferimento
1	Fermata Libia	2+084	3+000	916	T1-S1, T1-S2, T1-S3, T1-1, T1,2
1	Fermata Rimesse	3+000	3+328	328	T1-S4, T1-A2
2	Raccordo via Cellini	4+292	4+338	46	T2-A1, PB24
2	Fermata via Larga	4+188	5+170	982	T2-S1, T2-S2, T2-1, T2-2

Le caratteristiche sostanziali dei vari segmenti riconosciuti lungo il tracciato, in termini di unità geotecniche presenti, facendo riferimento alle opere, sono state riepilogate nelle tabelle seguenti.

In particolare, la Tratta 1 è stata suddivisa in due segmenti: il primo in corrispondenza della fermata Libia, dove sono previsti scavi in sotterraneo e il secondo alla fermata Rimesse, che è prevista a raso, con minori scavi. La Tratta 2 è descritta in un unico segmento, essendo lì presente la sola fermata via Larga, in sotterraneo.

Per un maggior dettaglio della zonizzazione geotecnica lungo il tracciato si riamanda all'elaborato grafico "PLANIMETRIA E PROFILO GEOLOGICO E GEOTECNICO", suddiviso in due tavole (cod. FER-BP-D-T0-GEO-GEN-S-005/6).

### 9.1 Tratta 1 - Tra la galleria esistente Zanolini (Pk 2+029,65) e la Fermata Rimesse (Pk 3+354,59)

Il tracciato della Tratta 1 si sviluppa parte in sotterraneo e parte in trincea fino a raggiungere con il piano ferro la quota del piano campagna. La varietà di situazioni che devono essere affrontate nell'intervento richiede una altrettanto varia tipologia di sezioni:

- galleria naturale a singolo binario adottata solo in corrispondenza del passaggio al disotto del cavalcavia Bentivogli, tra le progressive chilometriche 2.434 e 2+460,
- gallerie a cielo aperto a singolo binario realizzate fra paratie,
- trincea racchiusa da una struttura ad U realizzata all'interno di uno scavo contenuto da palancole provvisorie.

Il tratto in galleria comprende la predisposizione della fermata Libia, quello in trincea la fermata Rimesse.

La falda è stata misturata nei piezometri esistenti alla profondità di 16,9 m da p.c. (piezometro T1-2) in data 17/05/2019, periodo che può considerarsi significativo di acque alte. Questa quota è ampiamente al di sotto del piano di scavo, ma interferisce con il piede delle paratie nel tratto più profondo della fermata Libia, in un tratto lungo circa 200 m e per un'altezza di circa 4 m della falda sopra il piede della paratia.

La posizione indicativa delle opere citate sopra è riportata nella figura seguente.



Figura 19: Visualizzazione della Tratta 1 su immagine GoogleEarth®

Nei paragrafi seguenti sono riassunti i parametri geotecnici di riferimento opera per opera.

## 9.1.1 GN Bentivogli e Fermata Libia

**Tabella 17. Parametri geotecnici di riferimento per GN Bentivogli e Fermata Libia nella Tratta 1**

Opera di riferimento	Unità geotecniche				Peso di volume del terreno $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Coesione		Angolo di resistenza al taglio $\phi'$ [gradi]	Modulo di elasticità E' MPa	Modulo edometrico (drenato) E <sub>ed</sub> MPa
	da	a	Unità	Spessore		c'	C <sub>u</sub>			
	m	m								
Fermata Libia lato Ovest GN Bentivoglio	0,0	2,9	1	2,9	20	0	0	38	35	-
	2,9	16,9	A	14,0	20	0	0	38	35	-
	16,9	21,6	B	4,7	19	10	80	25	-	5
	21,6	30,0	A	8,4	20	0	0	38	50	-
Fermata via Libia lato Est	0,0	2,0	1	2,0	20	0	0	38	35	-
	2,0	15,3	A	13,3	20	0	0	38	35	-
	15,3	20,0	B	4,7	19	10	80	25	-	5
	20,0	30,0	A	10,0	20	0	0	38	50	-
Fermata via Libia Rampa Est veso Fermata Rimesse	0,0	2,0	1	2,0	19	0	0	38	35	-
	2,0	11,3	A	9,3	20	0	0	38	35	-
	11,3	15,9	B	4,6	19	10	70	25	-	5
	15,9	30,0	A	14,1	20	0	0	38	50	-

## 9.1.2 Fermata Rimesse

**Tabella 18. Parametri geotecnici di riferimento per Fermata Rimesse nella Tratta 1**

Opera di riferimento	Unità geotecniche				Peso di volume del terreno $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Coesione		Angolo di resistenza al taglio $\phi'$ [gradi]	Modulo di elasticità E' MPa	Modulo edometrico (drenato) E <sub>ed</sub> MPa
	da	a	Unità	Spessore		c'	C <sub>u</sub>			
	m	m								
Fermata Rimesse	0,0	2,0	1	2,0	19	0	0	38	35	-
	2,0	5,0	A	3,0	20	0	0	38	35	-
	5,0	7,3	B	2,3	19	10	50	25	-	3
	7,3	9,8	A	2,5	20	0	0	38	35	-
	9,8	15,0	B	5,2	19	10	70	25	-	5

## 9.2 Tratta 2 - Fermata Via Larga (tra Pk 4+000,00 e Pk 5+100,00)

Il tracciato della Tratta 2 inizia alla prog. km 4+000 e termina alla prog. km 5+100.

Mediante una trincea a singolo binario, realizzata fra paratie, la livelletta iniziale raggiunge un dislivello di 90 cm rispetto all'attuale piano campagna all'intersezione con via Cellini, fino a circa 5 m sotto il p.c. nella stazione di via Larga. Nel tratto successivo la livelletta ricomincia a guadagnare quota per raccordarsi con il piano campagna esistente.

La falda è stata misturata in data 17/05/2019, periodo che può considerarsi significativo di acque alte, alla profondità di 17,6 m da p.c. nel piezometro T2-1 e alla profondità di 15,9 m da p.c. nel piezometro T2-2. Questa quota è ampiamente al di sotto del piano di scavo, ma interferisce con il piede delle paratie nel tratto più profondo della fermata via Larga, in un tratto lungo circa 170 m e per un'altezza di circa 1 m della falda sopra il piede della paratia.

La posizione indicativa delle opere citate sopra è riportata nella figura seguente.



Figura 20: Visualizzazione della Tratta 2 su immagine GoogleEarth®

Nel paragrafo seguente sono riassunti i parametri geotecnici di riferimento per questa tratta.

## 9.2.1 Fermata via Larga

**Tabella 19. Parametri geotecnici di riferimento per Fermata via Larga nella Tratta 2**

Opera di riferimento	Unità geotecniche				Peso di volume del terreno $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Coesione		Angolo di resistenza al taglio $\phi'$ [gradi]	Modulo di elasticità E' MPa	Modulo edometrico (drenato) E <sub>ed</sub> MPa
	da	a	Unità	Spessore		c'	C <sub>u</sub>			
	m	m								
Raccordo via Cellini	0,0	1,5	1	1,5	19	0	0	38	35	-
	1,5	11,0	B	9,5	19	10	50	25	-	3
	11,0	15,6	A	4,6	20	0	0	38	35	-
	15,6	23,8	B	8,2	19	10	50	25	-	3
	23,8	28,3	A	4,5	20	0	0	38	35	-
	28,3	33,0	B	4,7	19	10	50	25	-	3
Fermata via Larga	0,0	1,3-2,5	1	1,3-2,5	20	0	0	38	35	-
	1,3-2,5	7,5-8,5	B	6,0-7,2	19	10	50	25	-	3
	7,5-8,5	14,7-19,8	A	7,2-11,3	20	0	0	38	50	-
	14,7-19,8	>30	B		19	10	80	25	-	5
Rampa Est fermata via Larga	0,0	2,5	1	2,5	19	0	0	38	35	-
	2,5	7,3	B	4,8	19	10	50	25	-	3
	7,3	11,6	A	4,3	20	0	0	38	50	-
	11,6	13,1	B	1,5	19	10	50	25	-	3
	13,1	15,0	A	1,9	20	0	0	38	50	-

## 10 BIBLIOGRAFIA

- BARLA G., MACCHI A., CAVALLERO G., PEDEMONTE S.: *"Il Nodo di Torino. Geologia e geotecnica: misure in corso d'opera"*. Ass. Geot. It. Atti XVIII Conv. Naz. Rimini 1993
- BARLA G., MACCHI A., MATTALIA C., RABAGLIATI U.: *"Mathematical modelling and performance monitoring for the Corso Vittorio Emanuele II underpass in Turin"*. FMGM 95 4<sup>th</sup> Int. Symp, Bergamo, 1995.
- BARLA G., VAI L.: *"Indagini geotecniche per la caratterizzazione del sottosuolo di Torino lungo il tracciato del Passante Ferroviario"*. XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma 1999.
- BONSIGNORE G., BORTOLAMI G., ELTER G., MONTRASIO A., PETRUCCI F., RAGNI U., SACCHI R., STURANI C. E ZANELLA E.: *"Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia"* fogli 56 e 57 (TorinoVercelli). Servizio Geologico d'Italia, Roma, 1969.
- BORTOLAMI G., DE LUCA D., FILIPPINI G.: *"Le acque sotterranee della pianura di Torino. Aspetti e problemi"*. Provincia di Torino, Assessorato Ecologia, 1990.
- BOTTINO G., CIVITA M.: *"A computer semi-quantitative model for microzonation of hazard from interconnection of engineering-geological features and urban sub-service network"* 5th International IAEG Congress, Buenos Aires, 1986, pp. 1731-1740
- BOTTINO G., CIVITA M.: *"Engineering geological features and mapping of subsurface in the metropolitan area of Turin, North Italy"*. 5th International IAEG Congress, Buenos Aires, 1986, pp. 1741-1753
- CIVITA M., PIZZO S. (2001). *"L'evoluzione spazio-temporale del livello piezometrico dell'acquifero libero nel sottosuolo di Torino"* GEAM n°4, dicembre 2001
- DUNCAN J.M., BUCHIGNANI A. (1987) – "An Engineering Manual for Settlement Studies". Dep. Of Civil Eng. University of Berkley, California.
- FRANCERI E., BORTOLAMI G., RICCI B.: *"Lineamenti geoidrologici della provincia di Torino con riferimento allo stato idrogeochimico delle falde del sottosuolo dell'area ecologico torinese"*. Provincia di Torino – Assessorato Ecologia. Marzo 1980.
- JAMIOLKOWSKI M., BALDI G., BELLOTTI R., GHIONNA V., PASQUALINI E., (1985). *"Penetration Resistance and Liquefaction of Sands"*, Proc.11th ICSMFE, San Francisco.
- LIAO S., WHITMAN R.V., (1985). *"Overburden Correction Factors for SPT in Sand."* J. of Geotechnical Engng., Vol.112, n. 3.
- PAPANTONOPOULOS & D.K. ATMATZIDIS, 1993. *"A fallure criterion for natural and artificial soft rocks"*. Geotechnical Engineering of Hard Solls – Soft Rocks, Anagnostopoulos et al. (eds) 1993 Balkema, Rotterdam.
- ROBERTSON P.K., CAMPANELLA R.G., WIGHTMAN A., (1983). *"SPT-CPT Correlations"* J.G.E.D., ASCE, novembre.
- SKEMPTON A.W. (1986). *"Standard Penetration Test Procedure and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation"*. Geotechnique 3, N°36.
- YOSHIDA Y., IKEMI M. & KOKUSHO T. (1988). *"Empirical formulas of SPT blow-counts for gravelly solls"*. Penetration testing ISOPT-1, 381 – 387, Orlando, Balkema.

## ALLEGATI