

COMUNE DI PECCIOLI



Lavori di realizzazione di nuova viabilità a Fabbrica di Peccioli.

CUP: ...

Committente: Comune di Peccioli

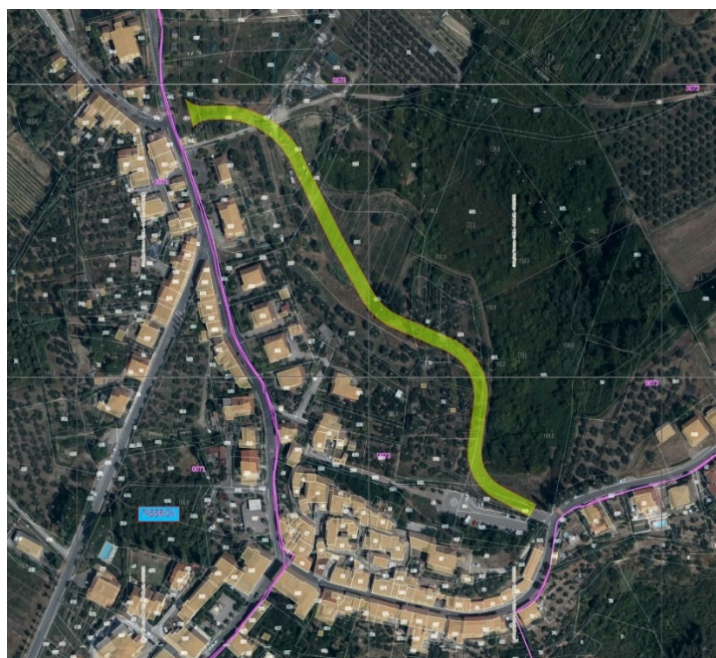
R.U.P.: Arch. Antonio Cortese

Progettisti: Ing. Francesco Donati e Geom. Marco Casati

Coordinatore della Sicurezza: Geom. Simone Sgherri

Progetto Esecutivo

Relazione Geologica e caratterizzazione geotecnica del suolo

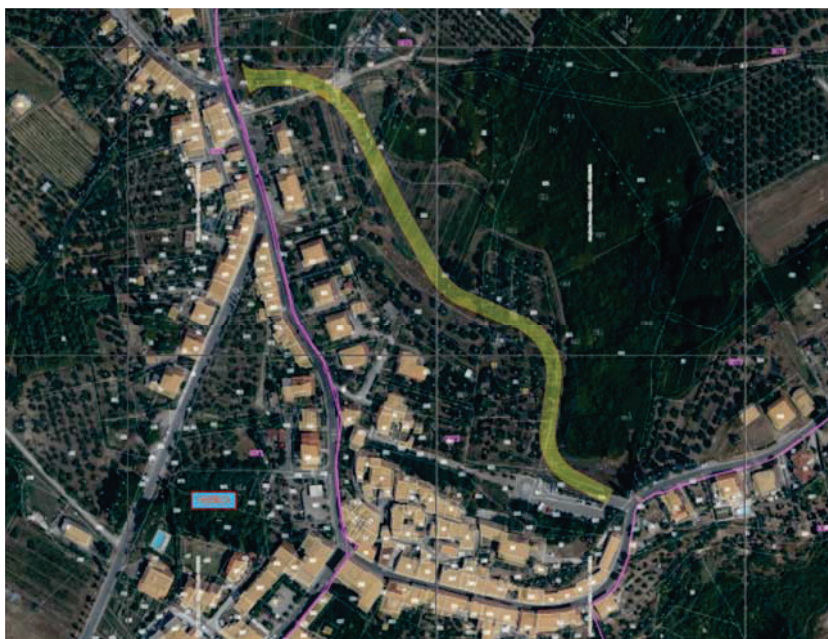




COMUNE DI PECCIOLI

Aprile 2025

REALIZZAZIONE NUOVA VIABILITA' A FABBRICA DI PECCIOLI



RELAZIONE GEOLOGICA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO

Dott. Geol. Andrea Petresi

Vicolo Petresi, 7 – 56037 Peccioli (PI) - Tel. 0587.636054 - Cell. 338.9608019
e.mail : apetre@libero.it - P.E.C. : a.petresi@pec.geologitoscana.net

Dott. Geol. Carlo Meoni

Via Giovanni Pascoli, 53/A - 56038 Ponsacco (PI) - Tel. 0587.732249 - Cell. 348.4135608
e.mail : carlo.meoni.geo@gmail.com - P.E.C. : c.meoni@pec.epap.it

Documento informatico firmato digitalmente ai sensi del T.U. 445/2000 e del D.LGS. 82/2005 e
rispettive norme collegate, il quale sostituisce il documento cartaceo e la firma autografa.

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. VINCOLI E PRESCRIZIONI DI CARATTERE GEOLOGICO E IDRAULICO	4
3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELLA ZONA.....	9
4. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELLA ZONA.....	11
5. INQUADRAMENTO NEL PIANO STRUTTURALE DEL COMUNE DI PECCIOLI.....	12
5.1. CLASSI DI PERICOLOSITA'	12
5.1.1. MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA (MOPS) E PERICOLOSITÀ SISMICA.	14
5.2. CONDIZIONI DI FATTIBILITA'	16
6. INDAGINI IN SITO E DI LABORATORIO GEOTECNICO	18
6.1. INDAGINI PREGRESSE – ANNO 2021	18
6.2. INDAGINI INTEGRATIVE – ANNO 2025	26
6.3. INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI.....	33
6.4. CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE.....	34
7. PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI.....	34
7.1. VALORI CARATTERISTICI	34
7.2. VALORI DI PROGETTO	35
7.3. SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE	35
7.4. ASPETTI IDROGEOLOGICI	36
8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	37

ALLEGATI

Allegato 1 .	INDAGINI PREGRESSE – Anno 2021
Allegato 2 .	INDAGINI INTEGRATIVE – Anno 2025
Allegato 3 .	SEZIONI LITOLOGICHE – Sezione longitudinale – Sezioni trasversali

1. PREMESSA

L'indagine in oggetto è stata eseguita per incarico del Comune di Peccioli sul terreno interessato dal progetto di una viabilità di servizio e aggiramento a nord della frazione di Fabbrica, Comune di Peccioli, con connessione di tracciati ex-rurali, come da progetto dello Studio Protecno, ing. Francesco Donati, via dei Mille, 2, Santa Croce sull'Arno e dello Studio Tecnico geom. Marco Casati, via Roma, 42, Peccioli, al quale si rimanda per gli elaborati specifici di progetto (vedi **Figura 1/1**).



Figura 1/1 – Indicazione schematica del tracciato su foto aerea

L'indagine è stata espletata tramite rilievi e controlli di campagna, la ricerca di dati esistenti, la consultazione di materiale bibliografico.

Dopo il rilevamento geologico di superficie esteso ad una conveniente zona intorno all'area di intervento, per approfondire la conoscenza delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo, sono stati utilizzati i dati di **indagini pregresse eseguite nel 2021 nell'area di intervento**, costituite da:

- n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo attrezzato con piezometro;
- n. 3 prelievi di campioni indisturbati su cui eseguire analisi di laboratorio;
- n. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe);
- n. 1 prospezione geosismica a rifrazione in onde S;
- n. 1 prospezione geoelettrica.

Premesso quanto sopra, tenendo conto delle caratteristiche strutturali dell'intervento da realizzare, che sono state evidenziate nel corso della predisposizione del progetto esecutivo dell'opera, i dati disponibili sono stati implementati mediante una **indagine geognostica e geofisica integrativa**, eseguita nel mese di **gennaio 2025**; in particolare sono state eseguite le seguenti indagini:

- n. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo;
- n. 3 Prelievi di campioni indisturbati;
- n. 11 Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe);
- n. 1 Stesa sismica in onde P-SH (Tomografia sismica);
- n. 1 Analisi Multicanale delle Onde Superficiali (MASW - Onde di Rayleigh);
- n. 4 Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (HVSr).

L'analisi dei dati raccolti ha permesso di definire la modellazione geologica del sottosuolo e di determinare i parametri geotecnici dei litotipi interessati dall'intervento e la categoria di sottosuolo, tenendo comunque presente che, secondo il D.P.G.R n.36/R del 9 luglio 2009, l'intervento in esame non è applicabile in nessuna classe di indagine.

2. VINCOLI E PRESCRIZIONI DI CARATTERE GEOLOGICO E IDRAULICO

L'area in oggetto è ubicata a nord e nord-est della Frazione di Fabbri, nel Comune di Peccioli (vedi **Figura 2/1 - Corografia**; **Figura 2/2 – Ubicazione su CTR**; **Figura 2/3 - Ubicazione su foto aerea**).

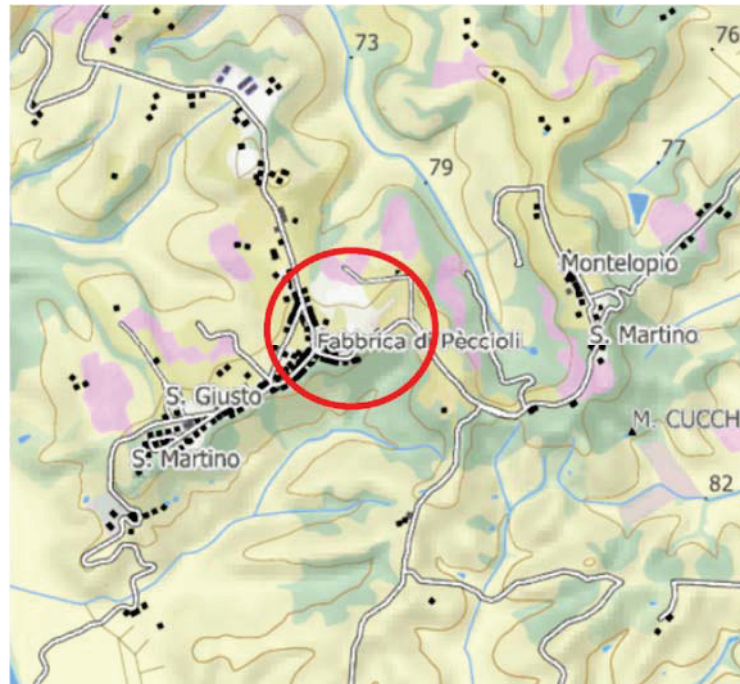


Figura 2/1 – Corografia

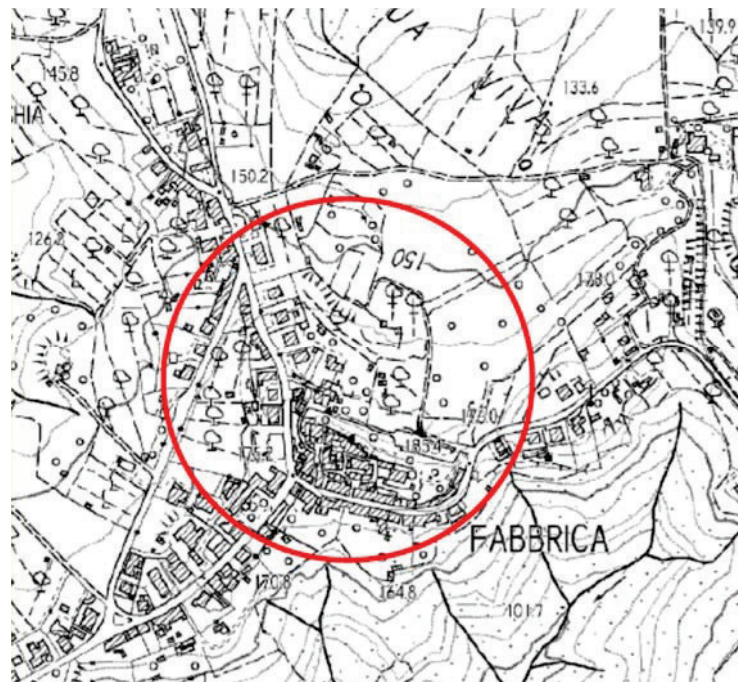


Figura 2/2 – Ubicazione su CTR



Figura 2/3 – Ubicazione su foto aerea

L'analisi del vincolo idrogeologico, in ottemperanza del Regio Decreto del 30/12/1923, n° 3267: *"Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani"*, ha messo in evidenza che l'area di intervento **non** è interessata dal vincolo (vedi **Figura 2/4**).

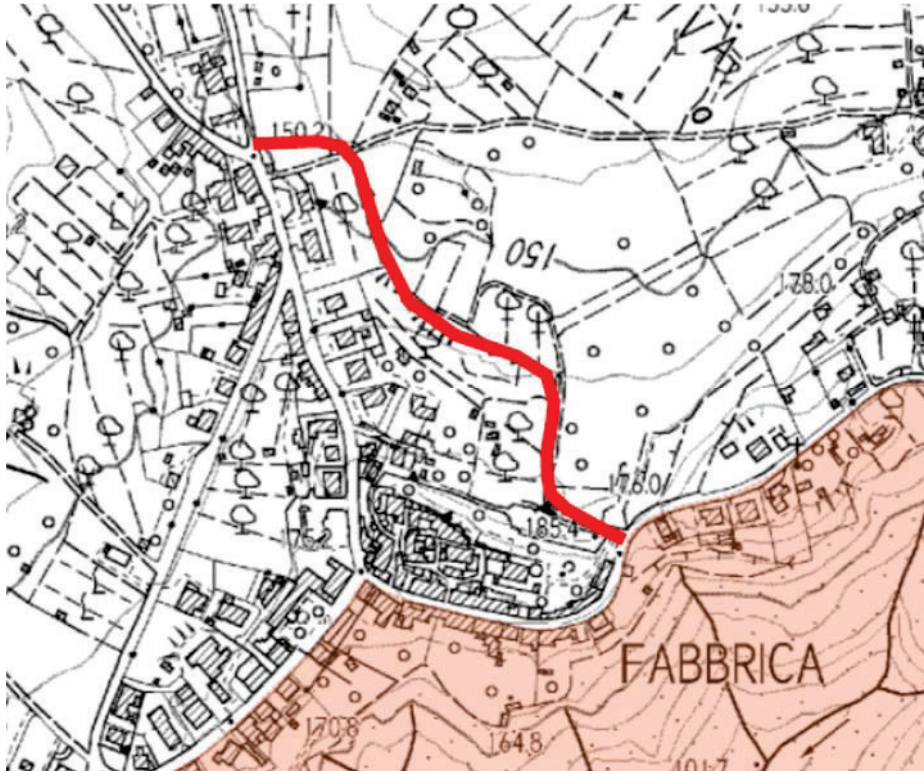


Figura 2/4 – Vincolo idrogeologico

Per quanto ricavabile dalla cartografia disponibile, redatta in scala 1:25.000, l'area di indagine risulta **esclusa** dalle aree interessate da inondazioni eccezionali e dalle aree interessate da inondazioni durante gli eventi alluvionali degli anni 1991-1992-1993 rappresentate nella "Carta guida delle aree allagate redatta sulla base degli eventi alluvionali significativi (1966-1999) – **Stralcio n. 106**" allegata al Progetto di Piano del Bacino del Fiume Arno e che delimita le aree soggette ad allagamento per eventi alluvionali che si sono succeduti dal 1966 al 1999 (D.P.C.M. 5/11/99).

La zona in studio **non** è compresa nelle aree perimetrate dal Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale (**PGRA**), con le relative misure di salvaguardia, approvato con Delibera n. 235 del 3 marzo 2016.

Nella mappa della pericolosità da alluvione fluviale del Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale è rappresentata la distribuzione degli elementi a rischio individuati ai sensi della direttiva 2007/60/CE e definiti all'art. 5.

La mappa del rischio deriva dalla sovrapposizione della mappa di pericolosità da alluvione con le classi di danno potenziale.

L'area di indagine **non** presenta livelli di rischio idraulico e **non** è coinvolta nella gestione del rischio alluvioni ai sensi del D.Lgs. 23 febbraio 2010, n. 49: "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni" e **non** vi sono previsti interventi strutturali di mitigazione del rischio idraulico.

Per quanto riguarda il Piano Assetto Idrogeologico (**PAI**) Dissesti, con la pubblicazione dell'avviso di adozione nella G.U. n. 82 del 8 aprile 2024 sono entrate in vigore le misure di salvaguardia adottate dalla Conferenza Istituzionale Permanente, con delibera n. 40 del 28 marzo 2024; si rileva che la maggior parte dell'intervento in oggetto ricade in area **PF2 – pericolosità media** ma il tratto subito a nord-est della frazione di Fabbrica (parte meridionale del tracciato) ricade in area classificata come **PF3 – pericolosità elevata** in quanto attraversa un **corpo di frana quiescente** (vedi Figura 2/5).

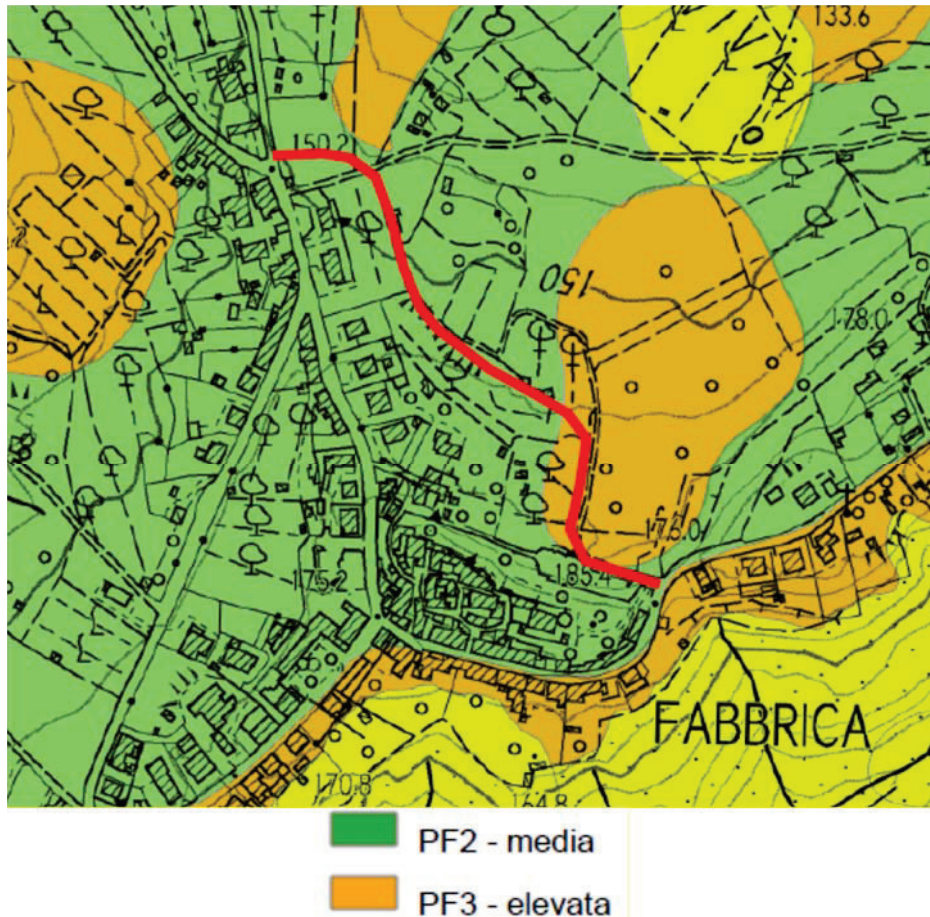


Figura 2/5 – Aree con pericolosità da frana – da PAI

In **Figura 2/6** è riportata la perimetrazione delle zone boscate, come rilevate nella cartografia del P.I.T. con valenza di Piano Paesaggistico (approvato con Deliberazione di Consiglio Regionale 27 marzo 2015, n. 37), che evidenzia che **due parti del tracciato stradale di progetto attraversano zone cartografate come boscate**.

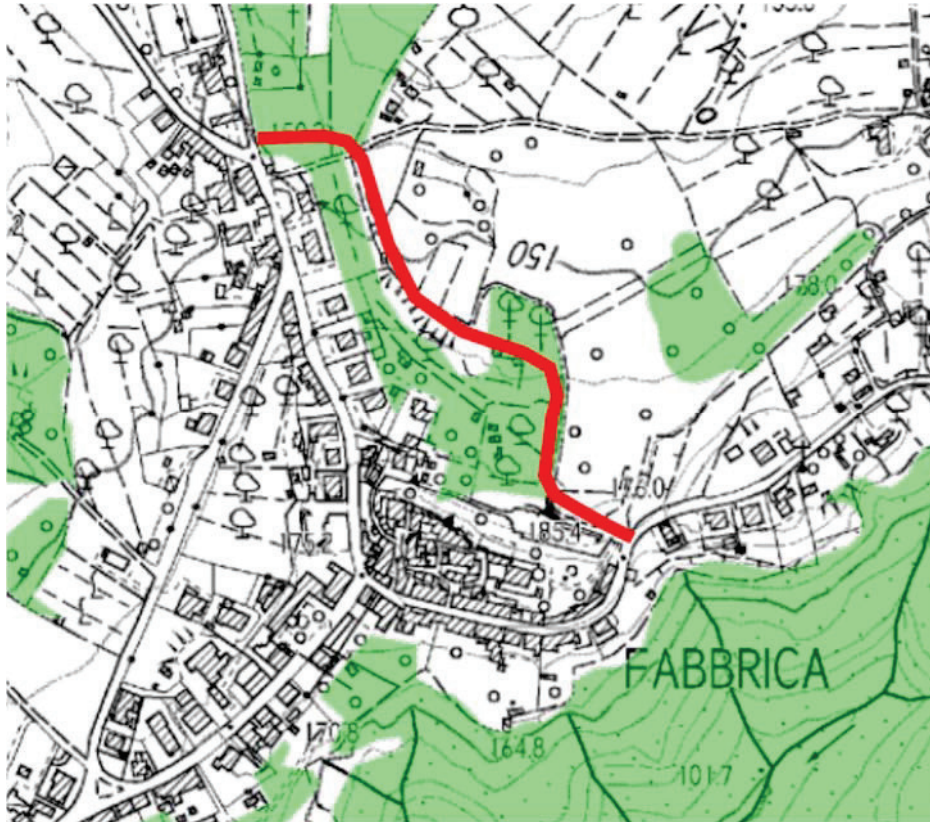


Figura 2/6 – Zone boscate – da PIT

L'area di intervento **non** risulta interessata dalle fasce di rispetto da fiumi e torrenti, ai sensi del D.Lgs. 42/2004, art. 142 lettera c): i fiumi, i torrenti, i corsi d'acqua iscritti negli elenchi previsti dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque ed impianti elettrici, approvato con Regio Decreto 11 dicembre 1933, n. 1775, e le relative sponde o piedi degli argini per una fascia di 150 metri ciascuna e **non** risulta interessata dalle fasce di rispetto contermini ai laghi comprese in una fascia della profondità di 300 m dalla linea di battigia.

L'area di intervento **non** ricade inoltre in zone individuate come parchi/riserve nazionali, regionali o provinciali, in zone di interesse archeologico e **non** interessa beni architettonici tutelati.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELLA ZONA

Sotto il profilo geologico (vedi ***Indagine geologica del Piano Strutturale - Studio Geoprogetti - Dicembre 2015***), nell'area in esame affiorano le seguenti formazioni (vedi **Figura 3/1**):

- **Sabbie argillose (p2):** bancate ben stratificate di sabbie molto argillose, ricche di fossili; talvolta sono presenti letti torbosi o frustoli carboniosi
- **Sabbie con livelli argillosi (p1):** alternanza di bancate sabbioso gialle e orizzonti argilloso – sabbiosi (limi) di colore grigio - giallo e di spessore ridotto
- **Argille azzurre (p):** argille grigio azzurre di facies marina (“mattaione”), che localmente e nella parte alta diventano sabbioso siltose

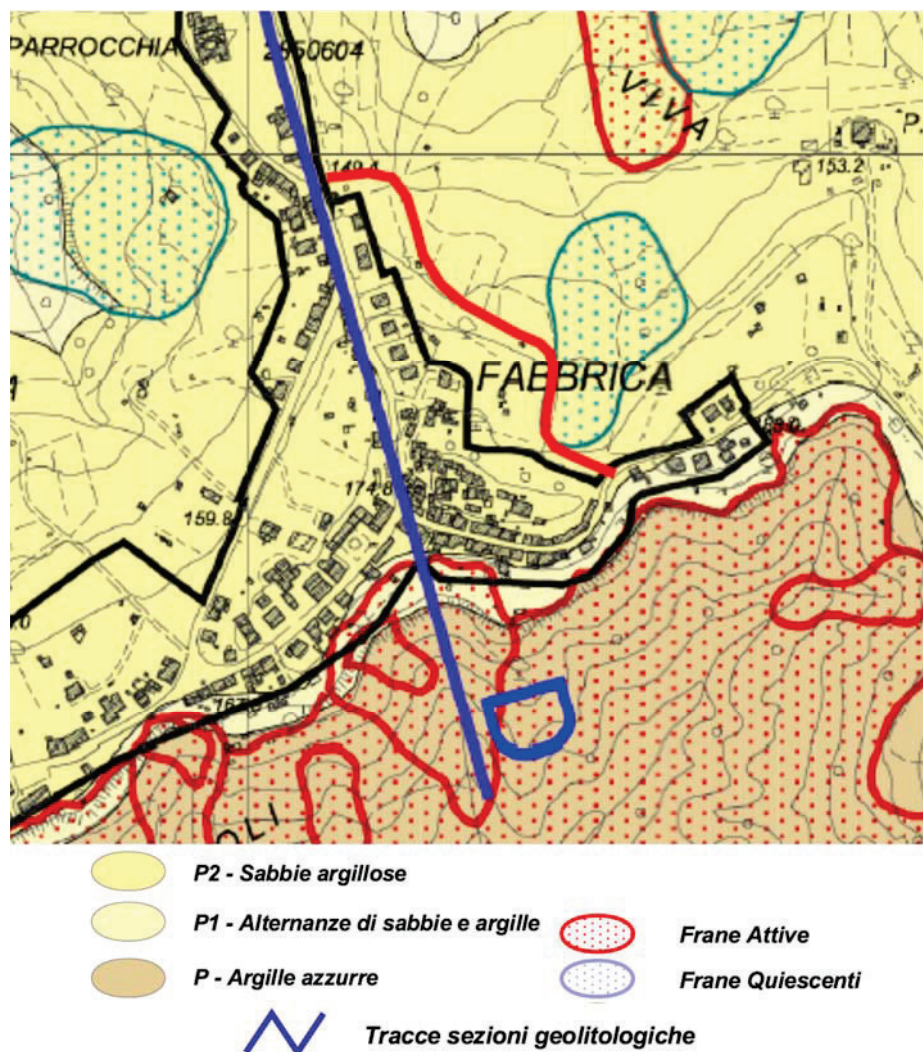


Figura 3/1 – Carta geologica

Il tracciato di progetto si sviluppa interamente all'interno della formazione delle **Sabbie argillose (p2)**, che sono costituite da bancate di sabbie fini caratterizzate da una notevole matrice siltoso-argillosa, ricche di fossili. In esse è talora osservabile la presenza di letti torbosi o frustoli carboniosi dispersi, specie in corrispondenza di una

frazione argillosa più abbondante. In genere le sabbie hanno una granulometria molto fine, come le sottostanti sabbie **P1**, ma se ne distinguono per un contenuto argilloso diffuso in tutto lo spessore e per la frequente concentrazione di fossili. La formazione si presenta ben stratificata in banchi spessi di potenza decametrica. Lo spessore rilevato è molto variabile e pari a circa 60-70 metri nei dintorni della frazione di Fabbrica di Peccioli (vedi **Figura 3/2**).

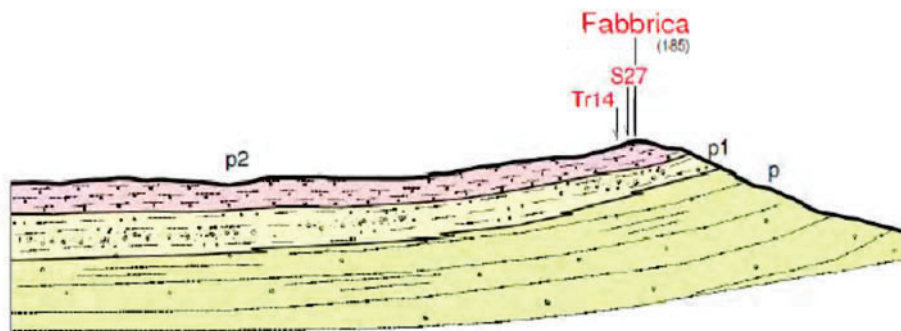


Figura 3/2 – Sezione geologica D

Dal punto di vista stratigrafico, la **Sezione D**, che taglia l'abitato di Fabbrica in direzione Nord-Sud (vedi **Figura 3/1**), evidenzia una modesta inclinazione della sequenza pliocenica verso Nord-Nord-Ovest, con una modesta riduzione di spessore del litotipo **P1**.

4. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELLA ZONA

Il centro abitato di Fabbrika è posto in una zona collinare ad una quota altimetrica di circa 174 m s.l.m., ed è collocato, sotto il profilo idrografico, nel bacino del Fiume Era, più specificatamente tra il Botro di Civoli a sud ed il Botro del Tamburino a nord, entrambi affluenti di sponda destra del Fiume Era.

Il settore di versante che degrada verso nord presenta un'acclività del 12% circa; il versante meridionale (ad acclività del 30 % circa), invece, per cause litologiche e giaciture (vedi **Figura 3/2**), presenta un orlo di scarpata di frana e/o di degradazione ("balza").

Più a sud, nelle Argille azzurre, è da rilevare la presenza di fenomeni di soliflusso e di ruscellamento superficiale talora molto sviluppati insieme a frane attive di varia tipologia.

La viabilità di progetto interseca parzialmente, nella sua porzione meridionale, una **frana** classificata come **quiescente** che, alla data odierna, **non** evidenzia alcun segnale di riattivazione (vedi **Figura 4/1**).

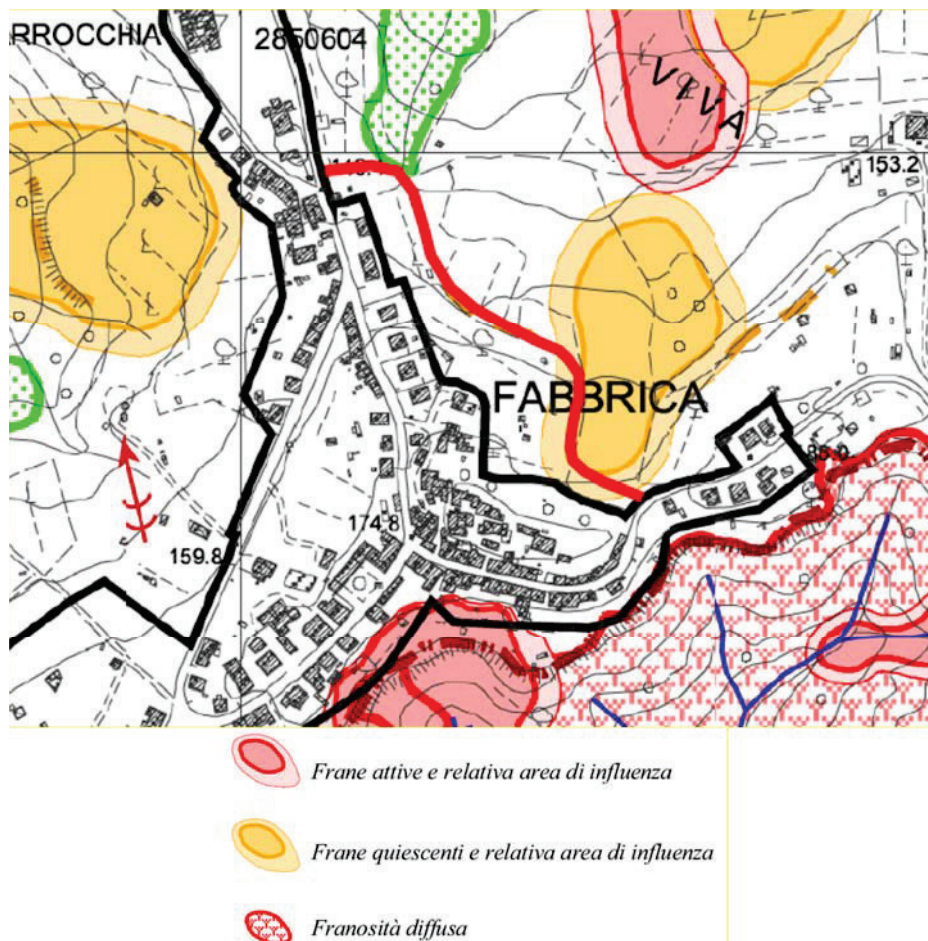


Figura 4/1 – Carta geomorfologica

5. INQUADRAMENTO NEL PIANO STRUTTURALE DEL COMUNE DI PECCIOLI

Per quanto attiene il quadro conoscitivo del Piano Strutturale del Comune di Peccioli, si evidenzia quanto segue.

5.1. CLASSI DI PERICOLOSITA'

Dalla consultazione degli elaborati redatti dallo **Studio Geoprogetti - Indagine geologica del Piano Strutturale - 2015**, l'area in esame ricade in parte, per quanto riguarda la **Pericolosità Geomorfologica** (vedi **Figura 5.1/1**), all'interno della classe di:

- **Pericolosità Geologica Media G.2** - aree in cui sono presenti fenomeni inattivi e stabilizzati (naturalmente o artificialmente); aree con elementi geomorfologici, litologici e giaciturali dalla cui valutazione risulta una bassa propensione al dissesto: corpi detritici sui versanti con pendenze inferiori al 25%.

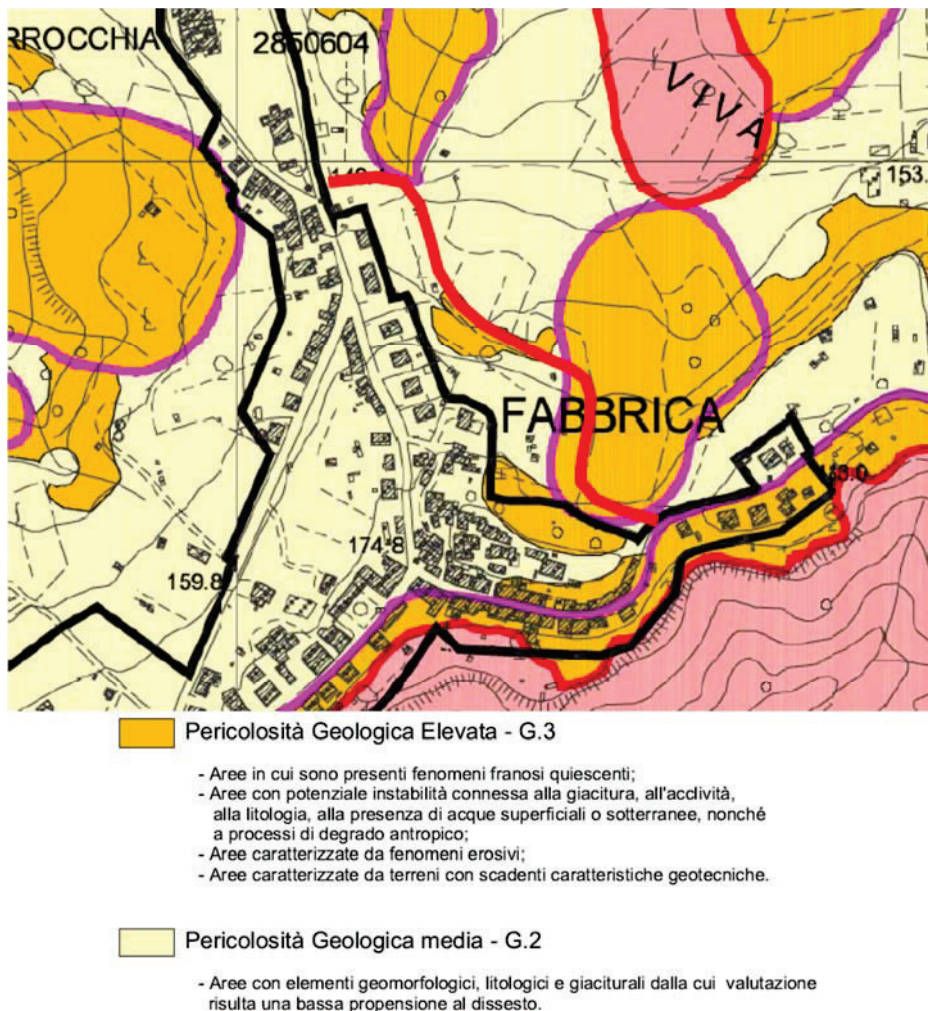


Figura 5.1/1 – Pericolosità geologica

Una parte consistente del tracciato appartiene invece (vedi **Figura 5.1/1**) alla classe di:

- **Pericolosità Geologica elevata G.3** - aree in cui sono presenti fenomeni quiescenti; aree con indizi di instabilità connessi alla giacitura, alla litologia, alla presenza di acque superficiali e sotterranee, nonché processi di degrado di carattere antropico, aree interessate da intensi fenomeni erosivi o di subsidenza.

Tutto il tracciato di progetto (vedi **Figura 5.1/2**) ricade in:

- **Pericolosità Idraulica bassa I.1** – aree a scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi: aree collinari o montane prossime ai corsi di acqua per le quali ricorrono le seguenti condizioni:
 - non vi sono notizie storiche di inondazioni;
 - sono in condizione di alto morfologico rispetto alla piana alluvionale adiacente, di norma a quote altimetriche superiori a metri 2 rispetto al piede esterno dell'argine o, in mancanza, al ciglio di sponda.

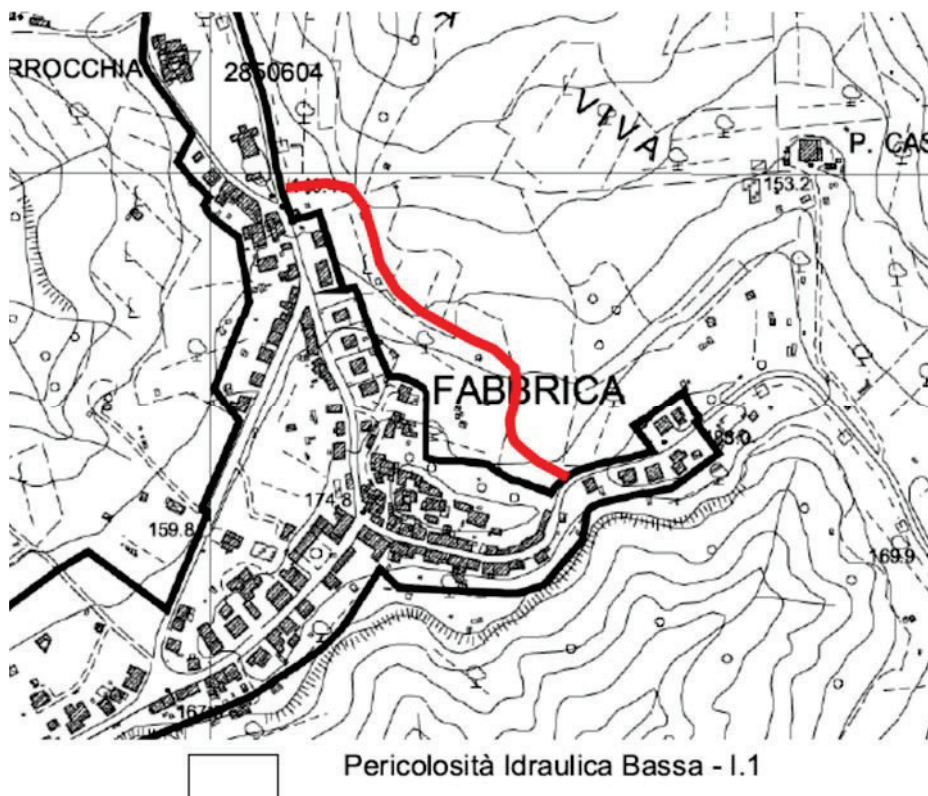


Figura 5.1/2 – Pericolosità idraulica

Infine, secondo le classi di Vulnerabilità Idrogeologica ai sensi dell'art. 20 del P.T.C. della Provincia di Pisa (vedi **Figura 5.1/3**), tutta l'area interessata dal tracciato di progetto è caratterizzata da:

- **Vulnerabilità Idrogeologica Bassa** - corrisponde a situazioni in cui la risorsa idrica considerata è apparentemente non vulnerabile, in base a considerazioni riguardanti la natura degli eventuali acquiferi e quella dei terreni di copertura, ma per cui permangono margini di incertezza dovuti a diversi fattori, quali la scarsa disponibilità di dati, la non precisa definibilità delle connessioni idrogeologiche, e simili.

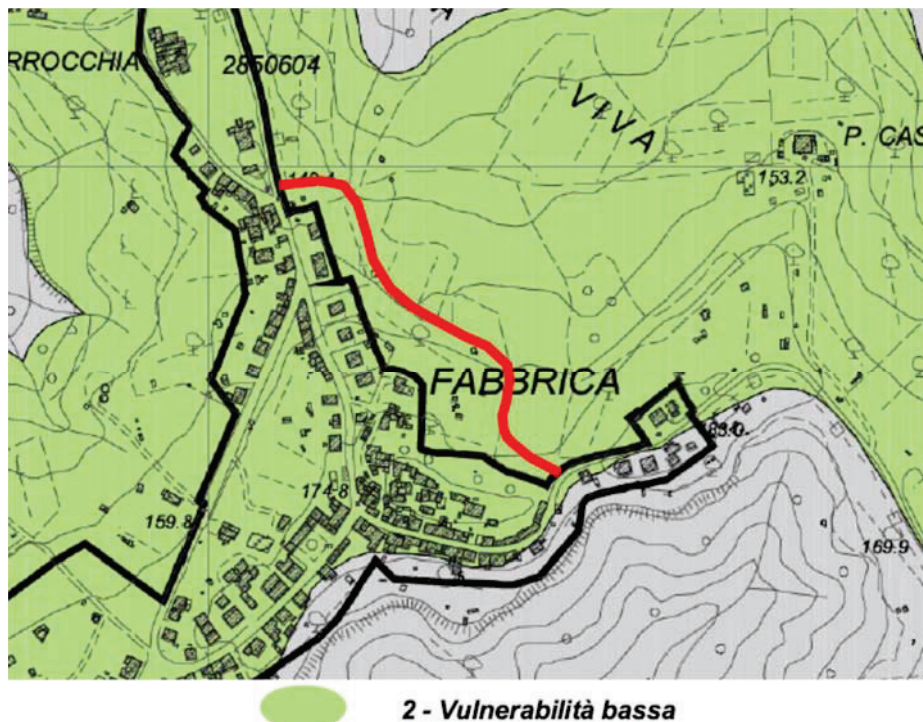


Figura 5.1/3 – Vulnerabilità idrogeologica

5.1.1. MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA (MOPS) E PERICOLOSITÀ SISMICA

La classificazione sismica redatta dalla Regione Toscana (D.G.R.T. del 26/05/2014 n. 421) ha aggiornato, secondo quanto prescritto dall'O.P.C.M. 3159/2006, il quadro precedentemente definito dall'O.P.C.M. 3274/2003 e dalla D.G.R.T. 461/2006, confermando il Comune di Peccioli nella Zona 3. In particolare viene chiesto di realizzare la **carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)** secondo le specifiche tecniche definite dagli ICMS (indirizzi e criteri per la microzonazione sismica) redatte dal Dipartimento della Protezione Civile e nelle specifiche tecniche di cui all'O.D.P.C.M. 3907/2010 (allegato A). La Giunta Regionale Toscana ha inoltre redatto una specifica normativa (D.G.R.T. 741/2012) per definire la metodologia da utilizzare, al fine di valutare gli effetti locali e di sito in relazione all'obiettivo della riduzione del rischio sismico.

Gli studi di microzonazione sismica devono individuare le zone in cui le condizioni locali possono modificare le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni, per le infrastrutture e l'ambiente. In sede di pianificazione territoriale viene richiesto di eseguire almeno gli studi di livello 1, che sono propedeutici ai successivi, e che consistono in una raccolta organica e ragionata dei dati di natura geologica, geofisica e geotecnica al fine di suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico. Gli studi di livello 1 vengono concretizzati nella carta delle "Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica" (MOPS) la quale individua le microzone in cui è prevedibile l'occorrenza di diverse tipologie di effetti prodotti dall'azione sismica.

La sintesi di tutte le informazioni derivanti dallo studio di microzonazione sismica ha consentito di valutare le condizioni di pericolosità sismica degli areali indagati.

La zona ricade nella **Pericolosità sismica media S.2** (è stata attribuita alle zone suscettibili di instabilità di versante inattiva e che pertanto potrebbero subire una riattivazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici; alle zone stabili suscettibili di amplificazione locali che non rientrano tra quelle previste per la classe S.3). La **parte più a sud del tracciato stradale di progetto** interseca invece una zona di classe **S.3**: attribuita alle zone suscettibili di instabilità di versante quiescente che pertanto potrebbero subire una riattivazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici.

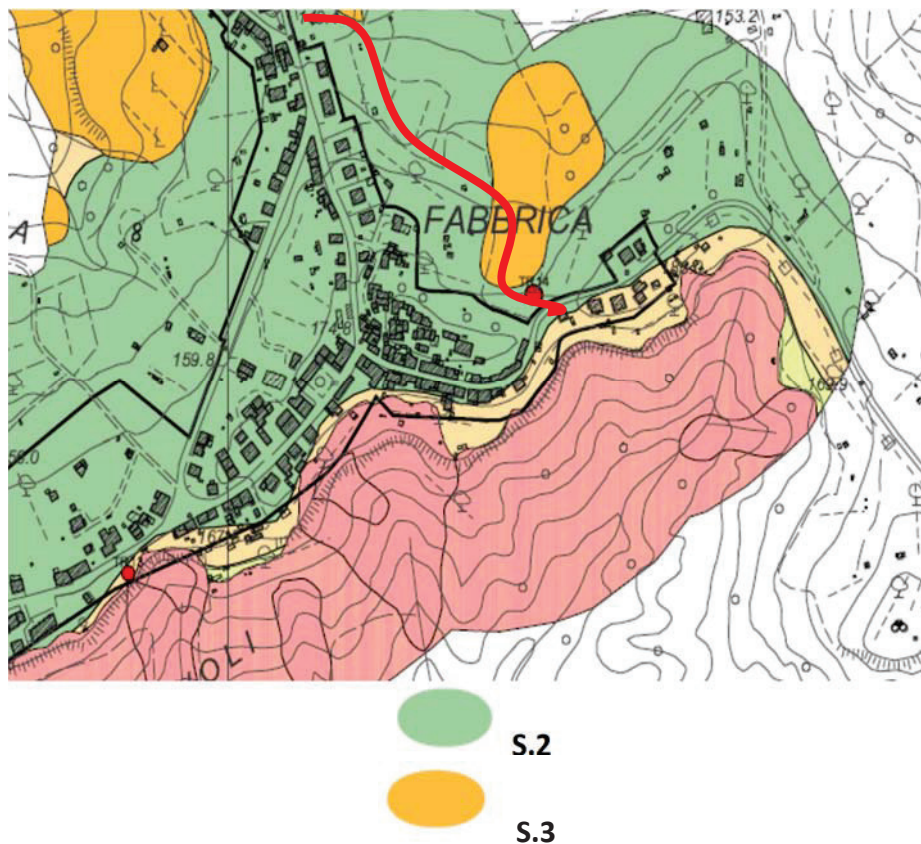


Figura 5.1/4 – Pericolosità sismica

5.2. CONDIZIONI DI FATTIBILITA'

Infine, per quanto attiene la **Fattibilità** di un intervento di realizzazione di **nuova viabilità**, essendo l'area localizzata nel **Territorio Aperto**, le classi di fattibilità individuate risultano le seguenti.

➤ **fattibilità geologica FG.3 – fattibilità condizionata**

- *Si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali ricadenti in aree nelle quali sono state riscontrate situazioni di pericolosità. In questi casi sono richieste indagini di dettaglio condotte a livello di "area complessiva" sia come supporto alla redazione di strumenti urbanistici attuativi che nel caso sia ipotizzato un intervento diretto*
- *Tenuto conto che le condizioni alla fattibilità trovano motivazione nel livello di pericolosità geologica, il progetto di intervento deve essere supportato da un'eshaustiva documentazione geologica esplicativa degli approfondimenti condotti ed al minimo composta da:*
 - *carta geologica e geomorfologica di dettaglio;*
 - *risultati di indagini geognostiche condotte per aumentare il grado di conoscenza delle caratteristiche litologiche e litotecniche del sottosuolo;*
 - *sezioni quotate, possibilmente dedotte da un rilievo planoaltimetrico di dettaglio, che mostrino con precisione il rapporto tra morfologia attuale e morfologia di progetto;*
 - *risultati di specifiche verifiche di stabilità del versante nelle condizioni attuali e di progetto qualora, nelle aree collinari, siano previsti consistenti operazioni di sbancamento e riporto;*
 - *studio di dettaglio delle condizioni di stabilità del versante e del contesto idrogeologico, qualora siano previste immissioni di acque reflue nel suolo e nel sottosuolo mediante subirrigazione, fertirrigazione e spandimento di acque di vegetazione;*
 - *analisi accurata delle problematiche rilevate e indicazione degli eventuali interventi per la mitigazione del rischio i quali in ogni caso non dovranno pregiudicare le condizioni di stabilità nelle aree adiacenti, nè limitare la possibilità di realizzare interventi definitivi di stabilizzazione e prevenzione dei fenomeni.*

➤ **fattibilità idraulica FI.1 – fattibilità senza particolari limitazioni**

- *Si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali non sono necessarie prescrizioni specifiche ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.*
- *Per gli interventi edilizi di modesto impatto che ricadono in questa classe, la caratterizzazione geotecnica del terreno a livello di progetto, può essere ottenuta per mezzo di raccolta di notizie; i calcoli geotecnici, di stabilità e la valutazione dei cedimenti possono essere omessi ma la validità delle soluzioni progettuali adottate deve essere motivata con un'apposita relazione.*
- *Gli interventi di nuova edificazione, di Ristrutturazione Urbanistica, di Sostituzione Edilizia o di Ristrutturazione Edilizia (con variazione dell'entità e/o della distribuzione dei carichi sul terreno di fondazione) dovranno comunque essere supportati da specifiche ed adeguate indagini geognostiche, che amplino le conoscenze sulle caratteristiche litologiche e le problematiche evidenziate nelle cartografie tematiche inserite nel Quadro Conoscitivo dello Strumento Urbanistico.*

- *Gli interventi previsti dallo Strumento Urbanistico sono attuabili senza particolari condizioni.*
- **fattibilità sismica FS.3 – fattibilità condizionata**
- *Si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali ricadenti in aree nelle quali sono state riscontrate situazioni di pericolosità. In questi casi sono richieste indagini di dettaglio condotte a livello di “area complessiva” sia come supporto alla redazione di strumenti urbanistici attuativi che nel caso sia ipotizzato un intervento diretto.*
- *Se le condizioni alla fattibilità trovano motivazione nel livello di pericolosità sismica, il progetto dell'intervento deve essere supportato da un'esaustiva documentazione geologica e geognostica esplicativa degli approfondimenti condotti, secondo le seguenti prescrizioni:*
 - *nel caso di zone suscettibili di instabilità di versante quiescente, oltre a rispettare le prescrizioni riportate nelle condizioni di fattibilità geologica, devono essere realizzate indagini geofisiche e geotecniche per le opportune verifiche di sicurezza e per la corretta definizione dell'azione sismica. Si consiglia l'utilizzo di metodologie geofisiche di superficie capaci di restituire un modello 2D del sottosuolo al fine di ricostruire l'assetto sepolto del fenomeno gravitativo. E' opportuno che tali indagini siano tarate mediante prove geognostiche dirette con prelievo di campioni su cui effettuare la determinazione dei parametri di rottura anche in condizioni dinamiche e cicliche. Tali indagini sono in ogni caso da rapportare al tipo di verifica (analisi pseudostatica o analisi dinamica), all'importanza dell'opera e al meccanismo del movimento del corpo franoso;*
 - *nel caso di terreni di fondazione particolarmente scadenti, devono essere realizzate adeguate indagini geognostiche e geotecniche finalizzate alle verifiche dei cedimenti;*
 - *per i terreni soggetti a liquefazione dinamica, devono essere realizzate adeguate indagini geognostiche e geotecniche finalizzate al calcolo del coefficiente di sicurezza relativo alla liquefazione dei terreni;*
 - *in presenza di zone di contatto tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche significativamente diverse, deve essere realizzata una campagna di indagini geofisiche di superficie che definisca geometrie e velocità sismiche dei litotipi posti a contatto al fine di valutare l'entità del contrasto di rigidità sismica; è opportuno che tale ricostruzione sia tarata mediante indagini geognostiche dirette;*
 - *nelle zone stabili suscettibili di amplificazione locali caratterizzate da un alto contrasto di impedenza sismica tra copertura e substrato rigido entro alcune decine di metri, deve essere realizzata una campagna di indagini geofisica (ad esempio profili sismici a riflessione/rifrazione, prove sismiche in foro, profili MASW) e geotecniche (ad esempio sondaggi, preferibilmente a c.c.) che definisca spessori, geometrie e velocità sismiche dei litotipi sepolti al fine di valutare l'entità del contrasto di rigidità sismica dei terreni tra coperture e bedrock sismico. Nelle zone di bordo della valle, per quanto attiene alla caratterizzazione geofisica, è preferibile l'utilizzo di prove geofisiche di superficie capaci di effettuare una ricostruzione bidimensionale del sottosuolo (sismica a rifrazione/riflessione) orientate in direzione del maggior approfondimento del substrato geologico e/o sismico.*

6. INDAGINI IN SITO E DI LABORATORIO GEOTECNICO

6.1. INDAGINI PREGRESSE – ANNO 2021

Durante la campagna di indagine geologico-geotecnica dal marzo 2021 al 12/05/2021 (vedi **Allegato 1**) sono stati effettuati:

- n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo attrezzato con piezometro;
- n. 3 prelievi di campioni indisturbati su cui eseguire analisi di laboratorio;
- n. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe);
- n. 1 prospezione geosismica a rifrazione in onde S;
- n. 1 prospezione geoelettrica.

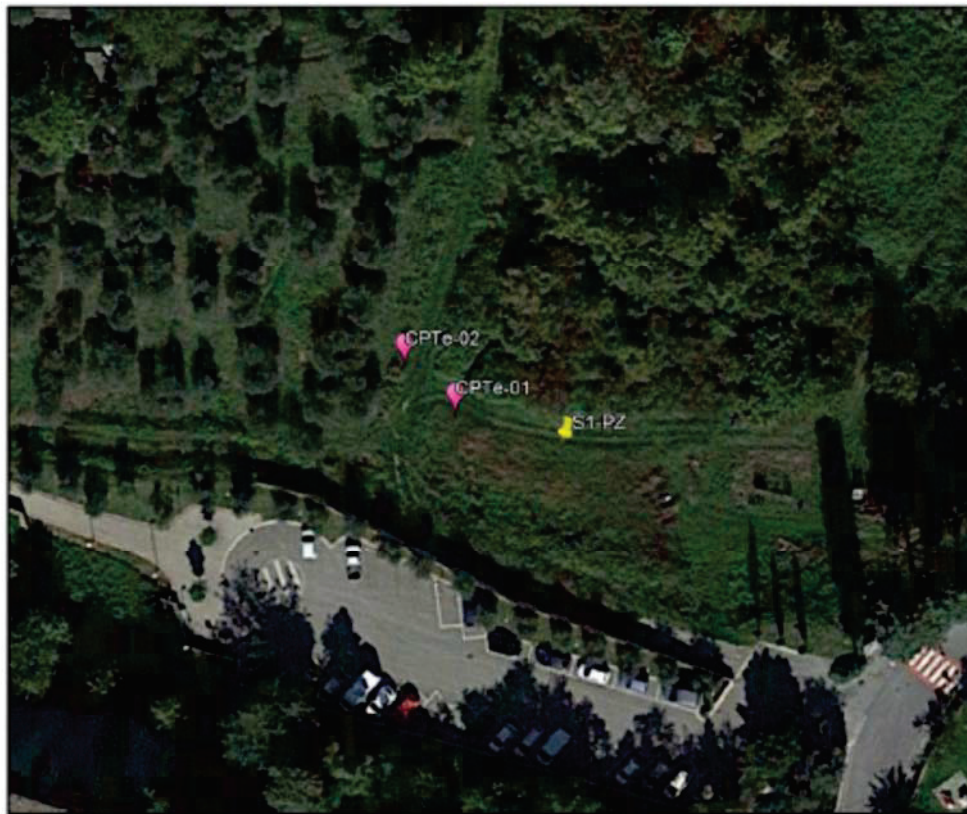


Figura 6.1/1 – Ubicazione indagini geognostiche

Il sondaggio geognostico è stato eseguito mediante una Sonda CMV Mk600 dalla ditta Bierregi s.r.l. di Lucca, laboratorio autorizzato con D.C.L.PP. n.00007464 del 04/08/2011; per le caratteristiche vedi Allegato 1.

Quadro riassuntivo

Sondaggio n°	Data di esecuzione	Certificato	Profondità (m)	Falda (m)	Coordinate Gauss-Boaga	
					X	Y
S1-PZ	05/05/2021	BHc-079/21	15,00	3,55	1642297,6586	4818731,3074

Nel corso dell'esecuzione del sondaggio sono state effettuate le seguenti operazioni:

- raccolta in apposite cassette catalogatrici del materiale estratto (totale n.3);
- prelievi di campioni indisturbati con fucella Shelby (totale n.3);
- effettuazione di prove S.P.T. standard (totale n.3);
- documentazione fotografica.

Al termine della perforazione, il sondaggio S1-PZ è stato attrezzato con tubo piezometrico fino a fine foro ($\varnothing = 2''$) per consentire il monitoraggio della falda.

Alla data di esecuzione delle prove penetrometriche (12 maggio 2021) la falda è risultata livellare alla profondità di -3,55 metri dal piano campagna.

- **Prove SPT (Standard Penetration Test)**

La prova S.P.T. consiste nel registrare il numero di colpi necessari per far penetrare di 45 cm nel terreno a fondo foro un tubo campionatore di dimensioni standard, collegato alla superficie mediante batteria di aste in testa alle quali agisce un maglio del peso di 63,5 kg che cade liberamente da un'altezza di 0,76 m.

Durante la prova si misura:

- N_1 = numero di colpi di maglio necessari a provocare l'avanzamento del campionatore per i primi 15 cm, assunti come tratto di "avviamento";
- N_2 = numero di colpi che provoca la penetrazione del campionatore nei successivi 15 cm;
- N_3 = numero dei colpi necessari per gli ultimi 15 cm di avanzamento.

Si assume come resistenza alla penetrazione il valore:

$$N_{SPT} = N_2 + N_3$$

SONDAGGIO S1-PZ

N° SPT	Profondità d'indagine				N_1	N_2	N_3	N_{SPT}
1	4.70	÷	5.15	m	2	3	3	6
2	7.50	÷	7.95	m	20	26	35	61
3	12.00	÷	12.45	m	25	41	62	103

I dati desunti dalle prove SPT sono stati elaborati tramite opportune correlazioni empiriche in funzione del tipo di terreno rinvenuto nei sondaggi, al fine di stimare alcuni parametri geotecnici. I valori di N_{SPT} , ricavati dalla somma dei numeri di colpi N_2 e N_3 sono stati normalizzati per tener conto dell'influenza del valore della tensione verticale efficace alla quota di esecuzione della prova, attraverso il fattore di correzione C_N , calcolato secondo la formula di Liao e Whitman (1986):

$$C_N = (\sigma'_o / \sigma'_{vo})^{0,5}$$

dove:

- σ'_o = pressione litostatica di riferimento assunta pari a 100 kPa;
- σ'_{vo} = pressione verticale efficace alla quota della prova.

I valori di SPT normalizzati sono stati ottenuti considerando l'espressione seguente:

$$N_{norm} = C_N * N_{SPT}$$

• **Sondaggio S1**

N° SPT	profondità di indagine	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'_v kPa	C_N	N _{norm}
1	4,70 ÷ 5,15 m	2	3	3	6	94	1,03	6
2	7,50 ÷ 7,95 m	20	6	5	61	152	0,81	50
3	12,00 ÷ 12,45 m	25	41	62	103	263	0,62	64

• **Densità relativa D_R (%)**

Una stima del grado di addensamento medio si è fatto riferimento alla relazione proposta da Meyerhof (1957) basata sui dati sperimentali di Gibbs & Holtz (1957), che fornisce il valore della densità relativa D_R in funzione del parametro N_{SPT} e della pressione verticale agente al livello indagato con la prova SPT, secondo la seguente espressione: $D_R = 21[N_{SPT}/(\sigma'_v + 0,7)]^{0,5}$, dove il valore di σ'_v è espresso in kg/cm².

N° SPT	N _{SPT}	σ'_v (kg/cm ²)	C_N	N _{norm}	D_R (%)
1	6	0,96	1,03	6	40
2	61	1,55	0,81	50	100
3	103	2,68	0,62	64	100

- **Resistenza al taglio**

Una stima dell'angolo di attrito ϕ' (a lungo termine), è stata ottenuta mediante l'interpretazione delle prove SPT, utilizzando le usuali correlazioni della letteratura geotecnica e i risultati delle prove di taglio diretto. È stato utilizzato il metodo di correlazione diretta RBS (Road Bridge Specification), che si basa sulla relazione: $\phi' = (15 N_{\text{norm}})^{0,5} + 15$, dove N_{norm} è il numero di colpi normalizzato.

- **Sondaggio S1**

N° SPT	N_{norm}	ϕ' (°)
1	6	24
2	61	>35
3	103	>35

N.B. i valori di ϕ' (°) ricavati sono stati volutamente e cautelativamente limitati con >35, perché il calcolo analitico forniva valori molto superiori.

Per una stima della coesione non drenata C_u (a breve termine), essa è stata stimata a partire dai risultati delle prove SPT con la correlazione empirica di Stroud (1974): $C_u = f_1 N_{\text{SPT}}$ in cui f_1 è un coefficiente funzione dell'indice di plasticità, in questo caso in esame è stato adottato un valore medio $f_1 = 4,4$ kPa.

- **Sondaggio S1**

N° SPT	N_{norm}	C_u (kPa)
1	6	26
2	61	268
3	103	412

I valori del coefficiente di consolidazione C_v sono stati ricavati dalla prova edometrica eseguita su campione indisturbato nel sondaggio S1.

Pressione (kPa)	S1C3- C_v Cm ² /s
da 196,2 a 392,4	$9,04 \times 10^{-4}$
da 392,4 a 784,8	$4,50 \times 10^{-4}$
da 784,8 a 1569,6	$4,88 \times 10^{-4}$

Al fine di caratterizzare da un punto di vista geotecnico i terreni indagati, sono state eseguite analisi geotecniche di laboratorio su n. 3 campioni indisturbati (sigillati in cantiere immediatamente dopo il prelievo). Le analisi geotecniche sono state eseguite dal laboratorio certificato SOCOTEC ITALIA SRL - Dipartimento di Ferrara.

Di seguito si indicano sinteticamente le analisi svolte sul campione raccolto:

Tabella di sintesi parametri geotecnici

TIPO DI PROVA	NORMA	CAMPIONI INDISTURBATI		
		S1C1	S1C2	S1C3
UMIDITA' DI UNA TERRA	UNI EN ISO 17892-1	SI	SI	SI
MASSA VOLUMICA APPARENTE	UNI EN ISO 17892-2	SI	SI	SI
PESO SPECIFICO DEI GRANULI CON PICNOMETRO	UNI EN ISO 17892-3	SI	SI	SI
LIMITI DI ATTERBERG	ASTM D4318 metodo A	SI	SI	SI
ANALISI GRANULOMETRICA (1)	ASTM D 422	SI	SI	SI
PROVA DI TAGLIO DIRETTO	UNI CEN ISO 17892-10	SI	SI	SI
PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA	ASTM D 2435 metodo A	-	-	SI
PROVA DI COMPRESSIONE AD ESPANSIONE LATERALE LIBERA	ASTM D 2166-91	-	SI	-
PROVA TRIASSIALE CONSOLIDATA NON DRENATA (CIU)	ASTM D 4767	SI	-	SI

(1) per setacciatura e sedimentazione

Dalle prove sopra riportate sono stati ricavati i seguenti parametri:

CAMPIONI INDISTURBATI	QUOTA PRELIEVO		W	γ	γ _s	LIMITI DI ATTERBERG			GRANULOMETRIA (UNI)				ELL				
						LL	LP	IP	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla		Cu			
	da m.	a m.				(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(kPa)
S1C1	3.00	3.50	19.10	20.10	26.66	36.00	20.00	16.00	1.40	7.60	68.50	22.50	-				
S1C2	6.00	6.50	20.20	20.60	27.13	47.00	23.00	24.00	0.40	5.50	63.20	30.80	296.62				
S1C3	10.50	11.00	21.90	20.40	26.74	55.00	31.00	24.00	0.20	1.10	52.00	46.70	-				

CAMPIONI INDISTURBATI	QUOTA PRELIEVO		PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA									TAGLIO DIRETTO		TRIASSIALE CIU			
			Pressione da 196.2 a 392.4 kPa			Pressione da 392.4 a 784.8 kPa			Pressione da 784.8 a 1569.6 kPa			Condizioni di picco		Condizioni a rottura (tensioni efficaci)		Condizioni a rottura (tensioni totali)	
			K	C _v	C _{alfa}	K	C _v	C _{alfa}	K	C _v	C _{alfa}	c'	φ'	c'	φ'	c	φ'
	da m.	a m.	(m/s)	(cm ² /s)	(-)	(m/s)	(cm ² /s)	(-)	(m/s)	(cm ² /s)	(-)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
S1C1	3.00	3.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.50	31.0	9.30	33.3	29.10	26.5
S1C2	6.00	6.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54.58	22.0	-	-	-	-
S1C3	10.50	11.00	5.10E-11	9.04E-04	1.13E-04	1.99E-11	4.50E-04	7.56E-04	1.21E-11	4.88E-04	1.00E-03	32.63	16.0	4.00	23.50	5.20	18.40

dove:

- W Umidità naturale
- γ Peso di volume
- γ_s Peso specifico
- Cu Coesione non drenata
- K Permeabilità
- Cv Coefficiente di consolidazione verticale
- c Coesione apparente
- ϕ Angolo di attrito apparente
- c' Coesione consolidata drenata
- ϕ' Angolo di attrito consolidato drenato

- **Prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTe**

Le prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTe, permettono di effettuare la misura dei valori di resistenza alla punta (q_c) e dell'attrito laterale locale (f_s), in continuo, ogni cm di avanzamento, con un maggior dettaglio nel rilievo stratigrafico e nella identificazione del tipo di terreno.

Sono state effettuate con un penetrometro statico/dinamico Pagani TG-63/200 da 20 tonn. di spinta, con maglio di 63,5 kg.

Le prove eseguite sono state n.2:

Prova n°	Data di esecuzione	Profondità (m)	Coordinate Gauss-Boaga	
			X	Y
CPTe-01	12/05/2021	9,21	1642276,4314	4818732,5629
CPTe-02	12/05/2021	10,08	1642267,9427	4818741,4750

La falda, misurata direttamente nei perfori al termine delle prove, è risultata livellare alla profondità di - 1,45 metri (CPTe-01) e -1,88 metri (CPTe-02) rispetto al piano campagna. La differenza riscontrata è dovuta alla differenza di quota tra le due prove.

Per una visione dettagliata dei grafici e tabulati delle prove penetrometriche si rimanda ad **Allegato 1**; la stratigrafia rilevata risulta la seguente:

- **PROVA CPTe-01**

m 0,00 – 5,00 Limi sciolti (corpo di frana quiescente)

m 5,00 - 9,20 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi

- **PROVA CPTe-02**

m 0,00 - 0,50 Terreno vegetale o di riporto

m 0,50 - 10,10 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi

- **INDAGINI GEOFISICHE**

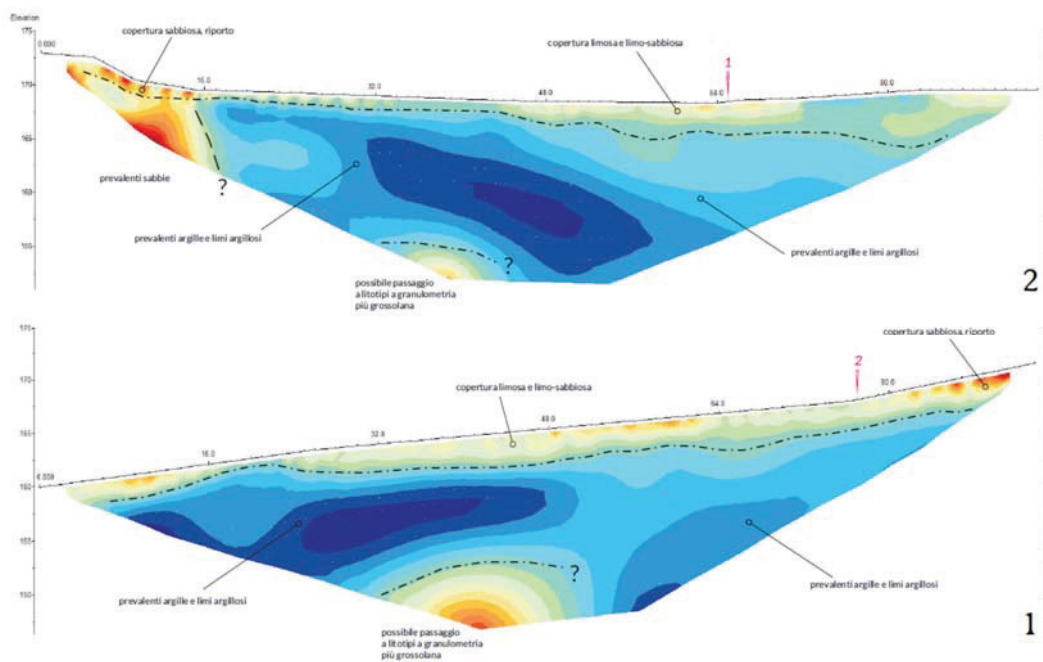


Figura 6.1/2 – Ubicazione indagini geofisiche

- **Prospezione geoelettrica**

L'indagine in oggetto si è articolata sull'esecuzione di due profili in tomografia elettrica 2D ed ha avuto lo scopo di ottenere informazioni relativamente alle caratteristiche litostratigrafiche dei terreni presenti; questo tipo di prospezioni geofisiche consente di effettuare ricostruzioni di insieme delle caratteristiche di resistività del terreno secondo profili bidimensionali, potendo infine interpretare le variazioni di resistività in termini di variazioni litologiche e di porosità/alterazione/saturazione dei terreni (vedi **Allegato 1**).

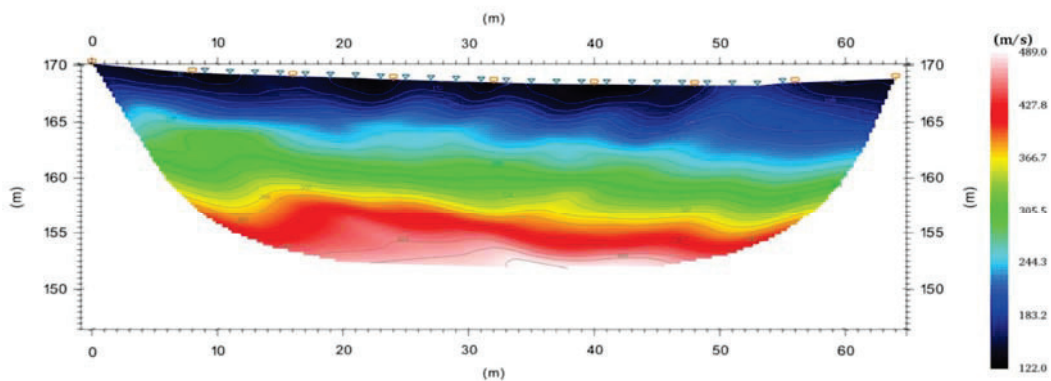
In entrambe le sezioni si osserva la presenza di un substrato conduttivo con una coltre più resistiva avente spessore in genere piuttosto contenuto, nel tratto iniziale del profilo n.2 il terreno è più resistivo fin dalla superficie. Un'interpretazione presumibile di questo andamento di resistività è che il conduttivo sia dato da litotipi a dominante limo-argillosa e che la coltre leggermente più resistiva sia costituita da una copertura (probabilmente detritico-colluviale) limosa e limo-sabbiosa.



Per una visione dettagliata dei grafici e tabulati delle prove di laboratorio si rimanda ad **Allegato 1**.

- **Geosismica a rifrazione in onde S**

Le indagini sismiche a rifrazione si basano sulla misurazione del tempo necessario perché la perturbazione elastica causata nel terreno da una sorgente di energia pervenga a una serie di strumentazioni di ricezione (geofoni) dopo aver percorso uno strato superficiale di terreno (onde dirette) e superfici di separazione fra strati a velocità crescente verso il basso (mediante onde rifratte). Si osserva (vedi **Allegato 1**), che con l'eccezione dello spessore superficiale, le variazioni di velocità con la profondità sono complessivamente caratterizzate da una certa continuità. Si può quindi individuare un complesso di terreni aventi velocità delle onde S inferiore a 160-170 m/s, che può corrispondere allo strato di copertura/detrito, cui seguono terreni con velocità comunque mediamente inferiore a 250 m/s, che rappresentano litotipi di buona consistenza/addensamento, ma non possiedono le caratteristiche dei terreni di substrato pliocenici (potrebbe essere spessore di alterazione); a partire dai terreni con $V_s > 330-350$ m/s, è presumibile la presenza di litotipi pliocenici ben addensati/consolidati, che più in profondità presentano valori di V_s superiori ai 400 m/s.



profilo sismostratigrafico (elaborazione tomografica 2D) in onde S - scala 1:300

6.2. INDAGINI INTEGRATIVE – ANNO 2025

Nel mese di gennaio 2025 sono state eseguite indagini geognostiche e geofisiche integrative (vedi **Allegato 2**); in particolare sono state eseguite le seguenti indagini:

- n. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo;
- n. 3 Prelievi di campioni indisturbati;
- n. 11 Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe);
- n. 1 Stesa sismica in onde P-SH (Tomografia sismica);
- n. 1 Analisi Multicanale delle Onde Superficiali (MASW - Onde di Rayleigh);
- n. 4 Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (HVSr);

ubicate come in **Figura 6.2/1**.

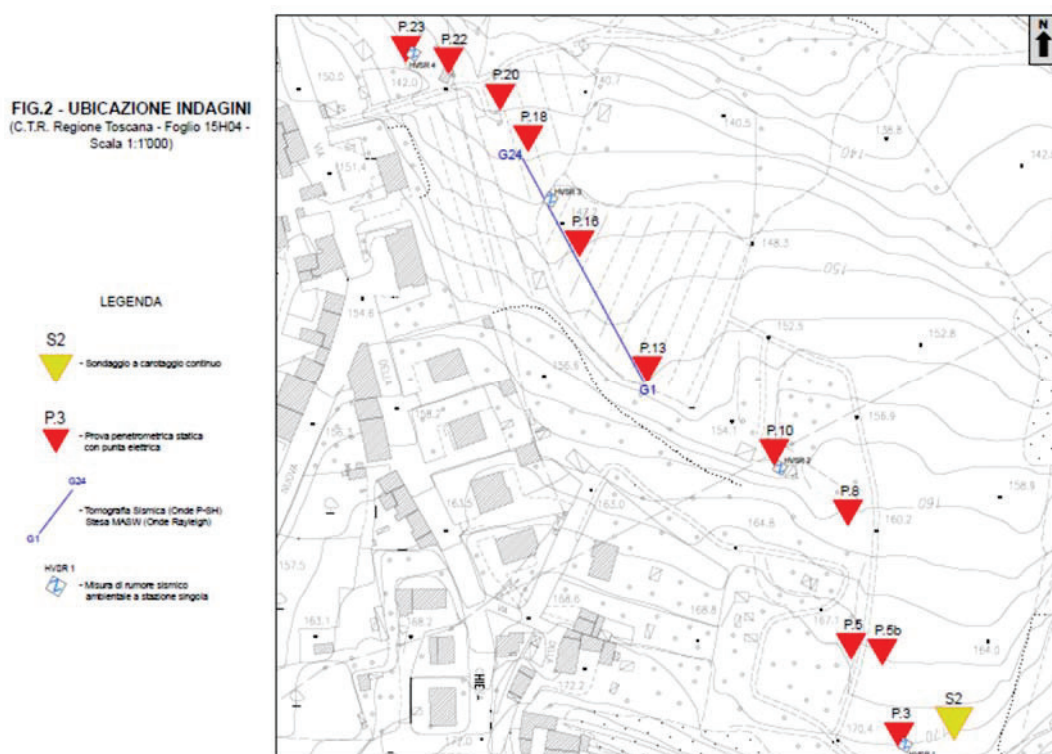


Figura 6.2/1 – Ubicazione indagini integrative – Gennaio 2025

Il sondaggio geognostico è stato eseguito mediante una Sonda CMV MK 600.

A seguire si riporta schematicamente un quadro riassuntivo delle specifiche del sondaggio eseguito:

Sondaggio n°	Data di esecuzione	Profondità (m)	Certificato	Coordinate Gauss-Boaga	
				X	Y
S2	14/01/2025	15,00	BHc-007/25	1642312.0777	4818725.6959

Nel corso dell'esecuzione del sondaggio, sono state effettuate le seguenti operazioni:

- Raccolta in apposite cassette catalogatrici del materiale estratto (totale n. 3);
- Prelievo di campioni indisturbati - Shelby (totale n. 3);
- Documentazione fotografica

Al fine di caratterizzare da un punto di vista geotecnico il terreno investigato, sono state eseguite analisi geotecniche di laboratorio su n. 3 campioni indisturbati. Le analisi geotecniche sono state eseguite dal laboratorio certificato SOCOTEC SRL di Ferrara.

CAMPIONE	QUOTA PRELIEVO		W	γ	Ps	GRANULOMETRIA (UNI)				LIMITI DI ATTERBERG			ELL
						Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	LL	LP	IP	
Id	da m.	a m.	(%)	(Mg/m ³)	(Mg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kPa)
S2C1	3.00	3.50	19.80	2.00	2.71	13.30	14.10	51.20	21.50	41.00	20.00	21.0	86.01
S2C2	8.00	8.50	14.60	2.00	2.71	0.10	74.80	20.80	4.30	ND	NP	ND	142.55
S2C3	12.00	12.50	16.30	2.07	2.70	9.50	3.50	61.20	25.80	34.00	19.00	15.0	-

CAMPIONE	QUOTA PRELIEVO		TAGLIO DIRETTO CD				PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA								
			Condizioni di picco		Condizioni residuali		Pressione da 392.4 a 784.8 Kpa			Pressione da 7848 a 1569.6 Kpa			Pressione da 1569.6 a 3139.2 Kpa		
			c'	ϕ'	c'	ϕ'	k	Cv	Calfa	k	Cv	Calfa	k	Cv	Calfa
Id	da m.	a m.	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(m/s)	(cm ² /s)	(-)	(m/s)	(cm ² /s)	(-)	(m/s)	(cm ² /s)	(-)
S2C1	3.00	3.50	10.4	29.0	9.4	21.0	1.23E-10	2.39E-03	1.64E-03	7.55E-11	2.14E-03	2.01E-03	4.27E-11	2.08E-03	2.23E-03
S2C2	8.00	8.50	3.98	39.0	-	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S2C3	12.00	12.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Dove:

- W Umidità
- γ Peso di volume
- Ps Peso specifico
- LL Limite di liquidità
- LP Limite di plasticità
- IP Indice di plasticità
- Ic Indice di consistenza
- Ws Limite di ritiro
- Rs Coefficiente di ritiro
- Cu Coesione non drenata
- c' Coesione consolidata drenata
- ϕ' Angolo di attrito consolidato drenato
- K Permeabilità
- Cv Coefficiente di consolidazione verticale
- Calfa Coefficiente di consolidazione secondario

• Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe)

Tutte le prove penetrometriche sono state effettuate mediante un Penetrometro statico/dinamico modello Pagani TG-63/200 da 20 tonn di spinta, con maglio di 63,5 Kg.

La prova penetrometrica statica elettrica (CPTe) permette di effettuare in continuo, ogni cm di avanzamento la misura dei valori di resistenza alla punta (q_c) e dell'attrito laterale locale (f_s), ottenendo così un maggior dettaglio nel rilievo stratigrafico e nella identificazione del tipo di terreno.

Come anticipato sono state eseguite n° 11 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe), di cui a seguire si riporta una tabella di sintesi delle specifiche tecniche:

Prova n°	Data di esecuzione	Profondità (m)	Falda (m)	Coordinate Gauss-Boaga	
				X	Y
P.3	10/01/2025	9.25	3.01	1642291.3097	4818722.5829
P.5	10/01/2025	10.87	3.99	1642273.2151	4818756.1132
P.5b	10/01/2025	9.37	1.80	1642284.9907	4818753.9127
P.8	10/01/2025	9.77	/	1642272.0317	4818806.2364
P.10	10/01/2025	7.89	3.52	1642244.2513	4818828.9296
P.13	13/01/2025	5.11	/	1642196.4002	4818860.7798
P.16	13/01/2025	7.97	/	1642170.8723	4818908.0981
P.18	13/01/2025	6.34	/	1642151.5275	4818947.3190
P.20	13/01/2025	9.28	3.65	1642140.9663	4818962.9478
P.22	15/01/2025	5.64	3.76	1642121.5151	4818976.5947
P.23	15/01/2025	4.23	/	1642105.4457	4818980.9042

La falda, misurata direttamente in foro al termine delle prove è risultata livellare alle profondità indicate nella tabella precedente. Le misure sono da riferirsi al piano campagna.

I dati acquisiti in campagna sono stati elaborati con il programma CPeT-IT-v.1.7.3.30 della Geologismiki Geotechnical Software. Il software, a partire dai valori di qc (cone resistance - resistenza alla punta), fs (sleeve friction - attrito laterale), permette di ricavare i dettagli stratigrafici dei terreni attraversati e i parametri principali del terreno.

Per la stratigrafia dei terreni viene riportato il grafico di P.K. Robertson et al. 1986 che utilizza i valori non-normalizzati (qc, fs e u2) e il grafico di P.K. Robertson et al. 1990 che utilizza i valori normalizzati (Qt, Fs), in quanto quest'ultimo tiene conto delle tensioni geostatiche totali ed efficaci. I dati di output ricavati dal software di elaborazione CPeT-IT sono i seguenti:

- grafici delle resistenze
- grafici di Robertson (SBT plot e SBTn plot);
- grafici delle resistenze e classificazione SBT;
- grafici dei parametri normalizzati e classificazione SBTn;
- grafici dei parametri geomeccanici del terreno;
- formulario;
- basic output data (parametri di base per l'elaborazione);
- estimations (parametri geomeccanici ricavati).

Le prove CPTe sono state realizzate prevalentemente lungo lo sviluppo del tracciato di progetto ed hanno permesso di individuare orizzonti con differenti caratteristiche fisico-meccaniche, individuando terreni dalle buone caratteristiche litotecniche, eccettuate la **CPTe-3** e la **CPTe-5b**, realizzate all'interno del corpo di frana quiescente.

Per una visione dettagliata dei grafici e tabulati delle prove penetrometriche si rimanda ad **Allegato 2**; la stratigrafia rilevata risulta la seguente:

- **PROVA CPTe-3**
 - m 0,00 – 5,00 Limi sciolti (corpo di frana quiescente)
 - m 5,00 - 9,20 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-5**
 - m 0,00 - 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 - 11,00 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-5b**
 - m 0,00 - 4,50 Limi sciolti (corpo di frana quiescente)
 - m 4,50 –9,35 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-8**
 - m 0,00 – 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 –9,70 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-10**
 - m 0,00 - 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 – 7,85 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-13**
 - m 0,00 - 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 - 5,10 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-16**
 - m 0,00 – 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 –8,00 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi
- **PROVA CPTe-18**
 - m 0,00 - 0,50 Terreno vegetale o di riporto
 - m 0,50 –6,30 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi si

- **PROVA CPTe-20**

m 0,00 – 0,50 Terreno vegetale o di riporto

m 0,50 – 9,25 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi

- **PROVA CPTe-22**

m 0,00 – 0,50 Terreno vegetale o di riporto

m 0,50 – 5,60 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi

- **PROVA CPTe-23**

m 0,00 – 0,50 Terreno vegetale o di riporto

m 0,50 – 4,20 Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi

- **Indagini Geofisiche**

Come anticipato in premessa, nell'area oggetto di studio sono state eseguite le seguenti indagini sismiche:

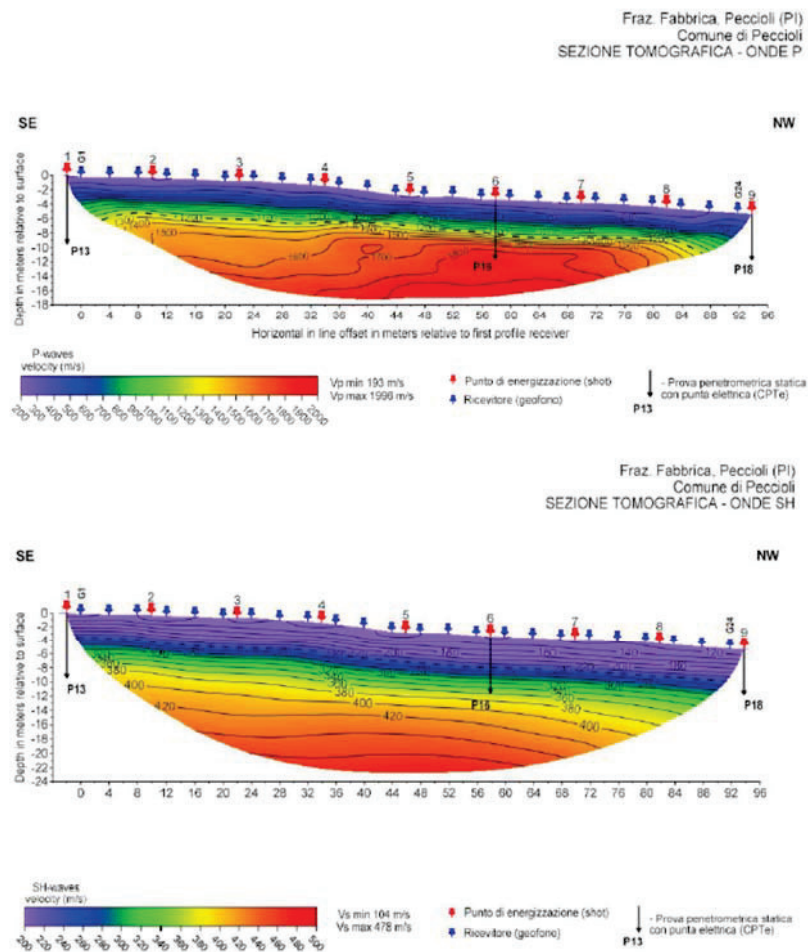
- n° 1 Stesa sismica a rifrazione in onde P/SH
- n° 1 Analisi multicanale delle Onde Superficiali (MASW - Onde di Rayleigh)
- n° 4 Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (HVSr)

Relativamente alle elaborazioni prodotte, la **tomografia sismica** in onde P ha messo in evidenza un primo sismostrato con spessore medio pari a circa 5 metri e caratterizzato da V_p media di circa 700 m/s, presente lungo tutto lo stendimento.

Anche la tomografia sismica in onde SH ha messo in evidenza un primo sismostrato con spessore medio pari a circa 4 metri e V_s media di circa 170 m/s, ad andamento regolare.

A seguire, per le onde P, si riscontra un secondo ed ultimo sismo-strato fino alla massima profondità d'indagine (circa 15-16 metri), caratterizzato da V_p media di circa 1600 m/s.

Analogamente alla tomografia in onde P, anche le onde SH evidenziano la presenza di un secondo ed ultimo sismo-strato fino alla massima profondità d'indagine raggiunta (circa 22 metri), caratterizzato da V_s pari a circa 360 m/s.



Nell'area oggetto di studio è stata eseguita n°1 **prospezione sismica MASW** denominata "STR150125A" utilizzando un sistema d'acquisizione a 24 geofoni interspaziati di 4,00 metri (lunghezza stesa 92,00 metri).

Le registrazioni avvenute in campagna sono state ottenute, in fase di acquisizione, utilizzando la medesima sensibilità per ciascun geofono e senza l'utilizzo di filtraggio delle frequenze.

L'analisi MASW fornisce vari modelli (profili di velocità Vs monodimensionale) ottenuti mediante processo di inversione, tra i quali viene adottato quello relativo al modello stratigrafico medio. La velocità della $V_{s,eq}$ (a partire dal piano campagna) è risultata essere pari a:

- **$V_{s,eq} = 355 \text{ m/s}$ (modello medio)**

Infine sono state eseguite **Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (HVSr)**, al fine di fornire la frequenza di risonanza **f0**, nell'area oggetto di studio; in totale sono state eseguite le 4 misure di rumore indicate nella seguente tabella.

Misura n°	Data di esecuzione	Durata registrazione (minuti)	Coordinate Gauss-Boaga	
			X	Y
HVSR 1 (Nk-004/25)	20/01/2024	40	1642293.5770	4818724.0104
HVSR 2 (Nk-003/25)	20/01/2024	40	1642246.4699	4818828.0883
HVSR 3 (Nk-001/25)	15/01/2024	40	1642159.8973	4818929.5811
HVSR 4 (Nk-002/25)	15/01/2024	40	1642108.2634	4818984.2615

6.3. INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI

In base ai dati raccolti e dalla interpretazione dei risultati ottenuti dai sondaggi, dalle prove penetrometriche, dalle analisi di laboratorio geotecnico eseguite e dalle indagini sismiche è stata ricostruita la seguente successione litologica dell'area di intervento (vedi **Allegato 3 – Sezioni litologiche**).

In sostanza, ad esclusione del primo strato di terreno superficiale, dello spessore di circa 50 cm, il tracciato stradale, per tutto il suo percorso, si sviluppa interamente all'interno della formazione delle **Sabbie argillose (p2)**, che, nella zona di intervento, sono costituite da **Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi**.

La viabilità di progetto interseca parzialmente, nella sua porzione meridionale, una **frana** classificata come **quiescente** che, alla data odierna, **non** evidenzia alcun segnale di riattivazione (vedi **Figura 4/1**); di tale situazione è stata data evidenza in **Allegato 3 – Sezioni litologiche**.

L'esame della morfologia della zona e delle sezioni litologiche permettono di rilevare le caratteristiche geometriche del dissesto geomorfologico osservato; in particolare si evidenzia la presenza di una superficie di discontinuità che separa il corpo della frana quiescente, avente le caratteristiche fisico-meccaniche di un limo sciolto, per il fenomeno di rimaneggiamento che i litotipi originari hanno subito a causa del loro movimento, dai sottostanti litotipi dotati di migliori caratteristiche fisico-meccaniche.

Lo stesso esame permette inoltre di ipotizzare le caratteristiche cinematiche del movimento franoso, che presenta la geometria di uno scoscendimento nella zona di distacco a monte ed evolve in colata verso valle; per quanto attiene la profondità del dissesto, essa può essere stimata a circa 5÷6 m dal p.d.c. nella parte centrale dell'area e si mantiene praticamente inalterata anche sui fianchi (vedi **Allegato 3 – Sezioni litologiche**).

6.4. CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stata quindi definita, in base all'interpretazione del Sondaggio Geognostico, delle Prove Penetrometriche e delle Indagini Sismiche eseguite (vedi **Allegati 1 e 2**), la categoria di profilo stratigrafico del suolo dell'area di intervento ai sensi dell'Allegato 2 all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003 e s.m.i..

Il suolo di fondazione è stato quindi classificato come appartenente alla

Categoria C — *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s*

7. PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI

In considerazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi incontrati possono essere fornite alcune indicazioni circa le proprietà fisico-meccaniche medie dei terreni interessati dall'intervento.

7.1. VALORI CARATTERISTICI

Dalle Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (C.S.LL.PP.) sulle NTC, i valori caratteristici prossimi ai valori medi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (in fondazioni superficiali o in una frana il volume interessato dalla superficie di rottura è grande), con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo sono state ricavate dall'interpretazione delle indagini. Si possono definire, per i litotipi indicati nelle sezioni litologiche riportate in **Allegato 3**, i seguenti **parametri geotecnici caratteristici medi**.

Litotipo	Coesione		Resistenza al taglio		Peso di volume
	c_{uk}	c'_k	Φ	Φ_r	
	non drenata	efficace	efficace	residua	
	(KPa)	(KPa)	(°)	(°)	
L1 – Limi argillosi debolmente sabbiosi con livelli di Sabbie e limi sabbiosi	45	15	25	N.D.	20.2
CF - Corpo di frana quiescente	N.A.	9,5	N.A.	21	19.5

N.D. = non determinato / N.A. = non applicabile

7.2. VALORI DI PROGETTO

La nuova normativa, ai fini delle verifiche nei confronti degli stati limite, prevede 2 diversi approcci (DA1 e DA2) con complessive 3 combinazioni. Tali combinazioni prevedono l'utilizzo dei coefficienti riduttivi da inserire nel dimensionamento geotecnico indicati nella Tabella 6.2.II del D.M. 17.01.2018:

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
<i>Coesione efficace</i>	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
<i>Resistenza non drenata</i>	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
<i>Peso dell'unità di volume</i>	γ	γ_T	1,0	1,0

In funzione quindi del diverso approccio che il progettista vorrà utilizzare per le verifiche di sicurezza delle opere strutturali potranno essere utilizzati i suddetti valori di progetto per i litotipi presenti nel sottosuolo.

7.3. SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE

Il fenomeno della liquefazione si manifesta sotto l'azione di carichi ciclici, come quelli indotti da un sisma, quando la pressione dell'acqua nei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, cioè quando gli sforzi efficaci da cui dipende la resistenza al taglio si riducono a zero.

Deve pertanto essere verificata la suscettibilità alla liquefazione di un terreno in presenza di strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una modesta frazione fine, limo argillosa (terreni sabbiosi monogranulari saturi, sotto falda, di bassa densità relativa).

Secondo le NTC 2018, paragrafo 7.11.3.4.2, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;*
2. *profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
3. *depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata ($N1$) $60 > 30$ oppure $qc1N > 180$ dove ($N1$)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e $qc1N$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;*
4. *distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.*

Per quanto attiene la suscettibilità alla liquefazione, si ritiene quindi che i terreni indagati, date le condizioni stratigrafiche, congiuntamente a quelle idrogeologiche, non siano suscettibili a liquefazione; le indagini eseguite nel sottosuolo non hanno infatti rilevato la presenza di strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte (vedi **Allegati 1 e 2**).

7.4. ASPETTI IDROGEOLOGICI

Nella zona in esame la formazione geologica affiorante è costituita dalle **Sabbie argillose** il cui contenuto argilloso diffuso le rende scarsamente permeabili: al loro interno non sono presenti vere e proprie falde idriche. Solamente la parte più superficiale del terreno può essere interessata da modeste circolazioni idriche alimentate da precipitazioni meteoriche; la possibile presenza di lenti di litotipi più sabbiosi all'interno dei litotipi argillosi può portare alla formazione di depositi di ristagno.

Premesso quanto sopra, tenendo conto dell'andamento del tracciato stradale di progetto in relazione alla conformazione morfologica dei luoghi, si ritiene opportuno che la base delle opere da realizzare debba garantire un adeguato deflusso delle acque sotterranee per evitare l'insorgere di sovrapressioni interstiziali a monte delle stesse, che potrebbero comprometterne la stabilità.

8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'intervento programmato prevede la realizzazione, di una viabilità di servizio e aggiramento a nord della frazione di Fabbrica, Comune di Peccioli, con connessione di tracciati ex-rurali.

I litotipi presenti nel sottosuolo costituiscono un discreto terreno di fondazione, fatta eccezione per la porzione meridionale della viabilità di progetto che attraversa e costeggia una **frana quiescente** che, alla data odierna, **non** evidenzia alcun segnale di riattivazione.

La situazione riscontrata renderà dunque necessario valutare la necessità della realizzazione di adeguate opere di contenimento che potranno essere diversificate a seconda delle esigenze progettuali e della rigidità che si renderà necessaria per il substrato di appoggio della viabilità da realizzare.

Tenendo presente che i litotipi rilevati in affioramento possono essere soggetti a dilavamento per ruscellamento, risulterà necessario salvaguardare dall'erosione diffusa il versante adottando le seguenti soluzioni:

- a. le opere da realizzare dovranno essere munite di idonei drenaggi sul lato monte e scarico delle acque raccolte verso il fondovalle, in modo da evitare infiltrazioni nella coltre di depositi colluviali superficiali dell'area, soprattutto nella zona interessata dal dissesto geomorfologico quiescente;
- b. dovrà essere eliminato il ruscellamento selvaggio delle acque procedendo ad un adeguato e immediato inerbimento degli spazi non edificati o pavimentati, specie dove vengano operati dei tagli, e predisponendo anche un'adeguata regimazione delle acque superficiali e il loro corretto smaltimento a valle dell'area di intervento.

Sulla base delle considerazioni precedentemente esposte, non si rilevano impedimenti di carattere geologico-tecnico e/o idrogeologico alla realizzazione dell'intervento.