



STUDIO DI GEOLOGIA  
**GEOMAR**

RELAZIONE GEOLOGICA  
PER IL PIANO DI RECUPERO DI UN' AREA  
DI VECCHIA EDIFICAZIONE SITUATA IN  
VIA DI CERRETO E SOLANO  
  
COMUNE DI PRATO (PO)

Committente:  
Sig.ra Giuditta Guarducci

Il tecnico:  
Dott. Geol. Marco Di Luca

Data:  
Febbraio 2022

## INDICE

1) GENERALITA' . . . . .	pag.3
2) INDAGINE GEOGNOSTICA APPRONTATA NELL'AREA. . . . .	pag.4
2.1) Prospezione sismica a rifrazione . . . . .	pag.4
2.2) Saggi con escavatore S1 e S2 . . . . .	pag.5
3) CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DI DETTAGLIO DEL SOTTOSUOLO DI PROGETTO . . . . .	pag.7
4) VERIFICA PRELIMINARE DI STABILITA' GEOLOGICA DELL'AREA . . . . .	pag.9
5) CONCLUSIONI. . . . .	pag.10

## Figure

Fig.1. Localizzazione geologica dell'area studiata (stralcio della Carta geologica regionale, scala 1.10.000).

Fig.2. Localizzazione di pericolosità geologica dell'area studiata (stralcio del Piano Strutturale del Comune di Prato).

Fig.3. Ubicazione degli accertamenti geologici eseguiti nell'area in esame.

Fig.4. Risultati dell'esame geologico-geotecnico del saggio di scavo "S1".

Fig.5. Risultati dell'esame geologico-geotecnico del saggio di scavo "S2".

Fig.6. Sezione geologica del sottosuolo di progetto, scala 1:100.

## Allegati

ALL.1 INDAGINE SISMICA (Relazione tecnica, Tav. 1 e Tav. 2)



## 1) GENERALITA'

Per incarico della Sig.ra Giuditta Guarducci, nella presente relazione è stata condotta un'analisi geologica generale di un'area sulla quale è in corso di progettazione un Piano di recupero d'iniziativa privata riguardante un complesso edificato sito in via di Solano e Cerreto a Prato (Po). Infatti, su tale area insistono alcuni edifici rurali di vecchia costruzione che saranno recuperati come civili abitazioni secondo un progetto che sarà redatto dall'Arch. Francesco Azzini e dal Geom. Cristian Cuttano, entrambi con studio in Prato. La presente relazione costituisce quindi il necessario supporto a tale progettazione architettonica indirizzandone le scelte in direzione di soluzioni compatibili con lo stato di stabilità geologica d'insieme dell'intera area sia negli aspetti riguardanti l'azione meteorica (dissesto idrogeologico) sia di quella sismica (possibili amplificazioni locali e deformazioni permanenti del suolo).

Secondo la bibliografia geologica consultata, riguardante nello specifico i primi 30 m di sottosuolo, nell'area di studio è presente una coltre di terreno sedimentario di antichissima origine, riferibile al Cretaceo superiore, oggi costituito principalmente da argilliti stratificate con subordinati calcari (Formazione di Sillano) con debole assetto inclinato in direzione del quadrante occidentale. Con maggiore precisione, secondo quanto dedotto dallo scrivente in fase di sopralluogo, la sopra citata formazione geologica è presente nel sottosuolo dell'area con una *litofacies* più complessa comprendendo porzioni stratificate di rocce magmatiche (basalti e gabbri) derivanti da antichi eventi franosi avvenuti nella fase di formazione dell'unità stessa. Un bell'esempio di questa tipologia di terreno affiora su di un'area circoscritta prossima a quella di studio, un tempo adibita a piccola cava di pietrisco. Sempre riguardo agli aspetti geologici dell'area oggetto del presente studio di approfondimento c'è da osservare l'assenza di strutture tettoniche quali faglie e fratture; la faglia più prossima è situata a ovest in posizione ben distante dall'edificio in oggetto (**Fig.1**).

L'area del Piano è stata anche localizzata in termini geomorfologici in occasione degli studi a supporto del Piano Strutturale di Prato, secondo cui la stessa è sottoposta a fenomeni di normale smantellamento meteorico. In altre parole l'area è oggi soggetta a fenomeni



d'erosione idrica di normale entità; gli eventi meteorici non generano quindi erosioni accelerate del suolo così come fenomeni di franamento ai quali si possano ricondurre processi d'instabilità morfologica. In considerazione di questo favorevole assetto geomorfologico è stata riconosciuta una pericolosità di grado medio (PG2) come mostrato in (Fig.2).

Riguardo agli aspetti sismici a grande scala, è stato accertato che i terremoti avvenuti in epoca storica si sono manifestati con un'intensità massima di grado VI (terremoto della Garfagnana del 1920). Analogo grado di evento sismico si ebbe durante il terremoto del Mugello del giugno 1919. Pertanto, per quanto concerne la sismicità "macro-sismica", è stata riconosciuta una categoria d'intensità massima pari al VII° grado della scala MCS. Per quanto concerne la classificazione sismica di scala regionale l'area in esame, parte del Comune di Prato, ricade in zona 3 ( $a_g=0,15$  g). A livello comunale non esistono studi di micro-zonazione sismica specifici sull'area con riferimento alla Carta di pericolosità sismica locale (53/R/11).

In considerazione del favorevole quadro geologico generale, sopra descritto, è stato condotto uno studio di dettaglio (scala 1:100) dei primi 30 m di sottosuolo volto a una più precisa ricostruzione litologica e meccanica delle unità geologiche riconosciute su base bibliografica. Per tale studio è stata approntata nell'area di studio una specifica campagna geognostica articolata in due fasi. L'indagine è iniziata con una prospezione sismica a rifrazione alla quale è seguita un'indagine attraverso la realizzazione di due saggi di scavo (S1 e S2) rivolti all'osservazione diretta della coltre di terreno superficiale già riconosciuta nella fase di studio sismico. Considerato il livello preliminare della progettazione alla quale è rivolto il presente lavoro non sono stati ritenuti necessari ulteriori approfondimenti geognostici che si prevede comunque di realizzare una volta individuati gli elementi strutturali da realizzare (eventuali nuove fondazioni ecc.).



## 2) INDAGINE GEOGNOSTICA APPRONTATA NELL'AREA

Nell'area coinvolta dal presente piano di recupero è stata condotta una campagna d'accertamento geologico preliminare attraverso l'esecuzione di prove *in situ*, sia indirette sia dirette. In particolare è stata realizzata preliminarmente una prova sismica a rifrazione poi elaborata con metodologia tomografica. Tale indagine è stata concepita per valutare lo spessore e la consistenza dello strato eluviale segnalato nell'area ma anche per confermare lo stato di compattezza della formazione costituente il substrato geologico dell'area (Formazione di Sillano) e inoltre per individuare con precisione la profondità del "letto sismico" con spettro di risposta elastico da considerarsi stabile negli aspetti morfologici.

Condotta tale indagine geofisica si è passati all'esecuzione di due saggi di scavo realizzati con escavatore di piccola taglia. Tali accertamenti sono serviti a determinare la litologia e la tessitura dello strato di terreno d'alterazione residuale ma anche a misurarne la compattezza tramite prove geotecniche speditive condotte negli scavi stessi. Detti scavi si sono anche resi indispensabili per comprendere il contenuto di acqua presente nel sottosuolo con riferimento a circolazioni secondarie e a falde superficiali.

L'ubicazione delle indagini geologiche dell'area è mostrata nella **Fig.3**.

### 2.1) Prospezione sismica a rifrazione

L'indagine sismica è stata eseguita da una ditta specializzata nel settore, la Soget di Lucca, alla quale è stato affidato anche l'incarico di elaborare i dati raccolti avendo la stessa il personale qualificato per tale lavoro. La relazione tecnica su quanto svolto è raccolta in allegato alla presente relazione (ALL. 1).

La scelta della posizione in cui fare lo stendimento sismico è stata compiuta dallo scrivente, così come la lunghezza dello stesso, sulle esigenze di esplorazione del sottosuolo. Detta prova è stata fatta con uno stendimento della lunghezza di 70 m ubicato a fianco di via di Cerreto e Solano nel tratto prospiciente l'area di studio.



In buona sostanza quello che emerge dall'indagine sismica, letta in termini geologici, a conferma del quadro bibliografico delineato nella premessa, è la presenza nell'area di un substrato geologico semi-lapideo compatibile con la Formazione di Sillano. Infatti, scorrendo il profilo sismico si nota una graduale crescita, con la profondità, delle velocità di propagazione delle onde sismiche, in termini sia di onde P sia di onde SH, da valori già alti a pochi metri di profondità; per quanto riguarda le onde di taglio SH s'inizia con 200 m/s per terminare con ben 800 m/s a soli 14 m di profondità, valore ritenuto indicativo dell'esistenza di un "letto sismico" con comportamento rigido. Tale sismo-stratigrafia letta in chiave litologica ci suggerisce la presenza di materiali argillitici con caratteristiche di compattezza crescente con la profondità in ragione di un minore stato di degradazione meteorica, riferibile dal punto di vista geologico a un substrato d'antica origine che gli studi disponibili sull'area attribuiscono alla Formazione di Sillano. In altre parole l'indagine sismica ci rivela la presenza nel sottosuolo dell'area di materiale semi lapideo radicato sul rilievo collinare di cui è parte; non siamo quindi in presenza di materiali provenienti da franamenti del versante.

## **2.2) Saggi con escavatore S1 e S2.**

Considerato il modesto spessore del primo strato sismico ( $V_s < 300$  m/s, spessore 2 m) è stato deciso di indagarlo attraverso 2 saggi di scavo entrambi operati utilizzando un escavatore di piccola potenza comunque capace di giungere a quote di poco superiori al citato valore. I due saggi di scavo sono stati posti in adiacenza del fabbricato principale rispettivamente sul lato sud e lato est dello stesso, in aree aperte facilmente accessibili.

Come detto, gli scavi hanno consentito l'osservazione diretta del sottosuolo, incluso il campionamento di piccole porzioni di terreno sulle quali è stata operata in laboratorio un'analisi granulometrica volta a quantificare in modo preliminare la frazione sabbiosa con dimensioni granulometriche maggiori di 0,0063 mm distinguendolo da quella più fine data dalla somma del limo e dell'argilla.





I due saggi hanno fornito risultati analoghi mostrando la presenza di materiale detritico a prevalente granulometria fine, comunque da compatto a molto compatto per basso tenore di umidità come emersa dalla manipolazione del terreno e da prove di cantiere condotte con strumentazione tascabile.

Di seguito sono descritte le osservazioni fatte nei due saggi.

#### Saggio S1

Nello specifico del saggio S1, raggiungente la profondità di 2,0 m dal p.c., è stata osservata una stratigrafia frutto d'alternanza tra una sabbia di media granulometria (60% in volume) con limo (40% in volume) di colore ocra screziato grigio molto addensata (Pocket P. maggiore di 4 MPa) e un'argilla debolmente limosa di colore avana screziato grigio dalla consistenza compatta (P.P.: 2,5;2,0;2,5;3,0 MPa) con inglobati rari clasti spigolosi di roccia calcarea (**Fig.4**).

#### Saggio S2

Simili osservazioni sono state fatte nel saggio S2 raggiungente una profondità di poco inferiore al precedente. Anche su questa verticale d'indagine è stata osservata una stratigrafia



frutto di alternanza tra terreno sabbioso e argilloso (**Fig.5**). Anche nel saggio in questione è stato osservato del terreno asciutto.

### **3) CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DI DETTAGLIO DEL SOTTOSUOLO DI PROGETTO**

In termini morfologici l'area su cui si sviluppa il Piano di recupero si presenta debolmente acclive in direzione sud; il dislivello misurabile è di pochi decimetri. L'area è quindi di tipo pianeggiante con assenza di morfologie secondarie minori quali erosioni/lesioni e riconducibili fenomeni di versante in atto o passati. Tale morfologia del terreno, come meglio spiegato in seguito, è stata ottenuta in tempi lontani attuando un terrazzamento su di un versante collinare dolce semi-pianeggiante con una morfologia strettamente connessa alla presenza di un substrato geologico fatto da rocce facilmente erodibili a prevalente composizione argillitica (formazione di Sillano).

Nello specifico della struttura geologica del sottosuolo, rappresentata nell'elaborato di Fig. 6, sono riconoscibili tre unità di terreno formanti altrettanti strati tra loro sovrapposti.

#### Strato 1

Lo strato più superficiale presente nel sottosuolo dell'area è dato da materiale di riporto di antica formazione avvenuta durante la costruzione del vecchio fabbricato che è stato adagiato su di un ampio terrazzo ottenuto con un lavoro di sterro/riporto. In ragione di quest'origine dell'area, il resede collocato sul lato sud del fabbricato principale è stato realizzato riportando del terreno di scavo per uno spessore di circa 1 m. In termini di materiale, il terreno (Unità R) si compone di detrito, eterogeneo e eterometrico, fatto da grossi blocchi di calcare (v. saggio S1) laterizi (v. Saggio 2) e anche di materiale organico misto a terreno naturale.

#### Strato 2

Proseguendo nelle profondità del sottosuolo dell'area oltre l'unità di riporto sino a giungere a circa 3,0 m si trova del terreno naturale detritico prodottosi da fenomeni locali di





sedimentazione. Tale terreno (Unità A) è costituito da strati sottili di sabbia media con limo alternati ad argilla debolmente limosa. Per entrambe le litologie sono stati rilevati valori molto alti di resistenza alla penetrazione delle stesse, indicativi di compattezza e addensamento del materiale che emerge così, preliminarmente, di buone qualità geotecniche. A conferma di tale favorevole comportamento meccanico la velocità delle onde sismiche di taglio SH risultata intorno a 300 m/s.

### Strato 3

Nell'intervallo di profondità compreso tra 3,0 m e 16,0 m i materiali presenti divengono di tipo roccioso essendo rappresentati da argilliti di antica formazione geologica (Cretaceo superiore - Paleocene) inglobanti lembi di masse ofiolitiche e calcare entrambi testimoni di franamenti di porzioni rocciose avvenute nel bacino di sedimentazione nel quale hanno preso forma le argilliti stesse (Formazione di Sillano). Nel suo insieme lo strato in esame assume le caratteristiche geotecniche proprie di un ammasso roccioso di tipo stratificato presumibilmente non pervaso da sistemi di fratture tettoniche non disgiuntive variamente orientate perlopiù con giacitura verticale. Ne è prova di tale favorevole assetto geotecnico l'elevata velocità raggiunta delle onde sismiche variabile da un minimo di 300 m/s a un massimo di 700 m/s.

### Strato 4

Lo strato di terreno più profondo riconosciuto nel sottosuolo dell'area assume una litologia e una stratificazione del tutto analoga all'unità B1 propria dello strato 3 ma con proprietà meccaniche ancora migliori essendo meno disgiuntivo il sistema delle fratture presenti, data la minore alterazione meteorica alla quale è stato sottoposto nel tempo (unità B2). Gli elevati valori di velocità sismica sono tipici di porzioni argillitiche poco alterate e disgiunte, e considerati letto sismico nel quale le onde di terremoto corrono veloci senza indurre deformazioni permanenti della massa rocciosa stessa.



#### 4) VERIFICA PRELIMINARE DI STABILITA' GEOLOGICA DELL'AREA

L'area del futuro progetto è stata sottoposta a una valutazione di stabilità generale nelle possibili azioni di dissesto idro-geologico derivanti che la possono coinvolgere con riferimento specifico a fenomeni di ruscellamento, propri di un versante collinare a bassa acclività, e di amplificazione sismica locale e infine di alterazione permanente del sottosuolo sempre per fenomeni sismici. Altre forme d'instabilità, legate alla posizione geologica e all'assetto locale, dell'area non sono plausibili e pertanto escluse da ogni valutazione (frammenti con accumulo e distacco di materiale, sedimentazioni di versante, erosioni accelerate, liquefazione e altro).

Per quanto concerne gli aspetti strettamente geomorfologici legati al fattore meteorico, possiamo dire che l'area è oggi antropizzata e privata della possibilità di ruscellamento, accumuli d'importanti sedimenti per fenomeni di versante un tempo lontano attivi e responsabili della formazione dello strato 2 (*colluvium*).

Riguardo all'aspetto sismico è da osservare in primo luogo l'assenza di faglie potenzialmente dislocanti il terreno e quanto su di esso edificato. Tale constatazione, come detto in precedenza, nasce soprattutto da considerazioni di carattere generale su quanto riportato nella Carta geologica edita dalla Regione Toscana.

L'aspetto che maggiormente è in grado di destabilizzare i futuri manufatti è legato ai possibili fenomeni locali di amplificazione della sollecitazione sismica di base. Al riguardo va comunque rilevata l'assenza di tutti quegli aspetti che possono agire in tale direzione, da quello topografico sino a quello litologico. Infatti, l'area è debolmente acclive e prossima al substrato sismico. L'ultimo aspetto da valutare riguarda le eventuali difformità di risposta nell'ambito dell'area a variazioni orizzontali. Anche su questa problematica non sembrano esserci le condizioni favorevoli all'insorgere di cedimenti differenziali e sfasamenti importanti nella sollecitazione. Al riguardo si prende in esame il profilo sismico nel tratto compreso tra le distanze 12-32 nel quale le interfacce tra i vari sismo-strati si mantengono poco inclinate a suggerirci un arrivo simultaneo dell'onda di terremoto.



## 5) CONCLUSIONI

Per incarico della Sig.ra Giuditta Guarducci, nella presente relazione è stata condotta l'analisi geologica generale di dettaglio dei primi metri di sottosuolo di un'area sulla quale sarà approntato, dallo studio Tecnico dell'arch. Francesco Azzini e del geom. Cristian Cuttano di Prato, un progetto per il recupero architettonico di un vecchio edificio con annessi ubicato a Prato in Via Cerreto e Solano.

E' stata condotta una ricerca bibliografica riguardante l'area in studio dalla quale è emerso un sottosuolo costituito da prevalenti litologie argillitiche, proveniente da un deposito di argille sedimentarie d'ambiente marino delle Tetide del Cretaceo superiore, attribuite all'unità stratigrafica della formazione di Sillano. Tale formazione si mostra stratificata anche per la presenza d'intercalazioni di masse discontinue ofiolitiche (gabbri e basalti). Detti strati mostrano una debole inclinazione che conferisce all'area, unitamente all'assenza di faglie, una buona stabilità d'insieme. In ragione di tale assetto l'area è stata codificata dagli studi di Piano Strutturale a pericolosità di grado medio (PG2), e pertanto idonea all'edificazione.

Per comprendere nel dettaglio le problematiche di stabilità dell'area è stato condotto un approfondimento delle conoscenze geologiche generali con riferimento al comportamento fisico meccanico del terreno costituente i primi 30 m di sottosuolo. A tale scopo è stata progettata una campagna d'indagini *in situ* che ha visto la realizzazione di una prospezione sismica a rifrazione e di due saggi di scavo.

Detta indagine si è rivelata appropriata mettendo in luce aspetti geologici importanti compatibilmente con quanto già noto sull'area. In sintesi, l'area del progetto, semi-pianeggiante, insiste su di un sottosuolo dalla litologia in gran parte argillitica inquadrabile stratigraficamente nella formazione di Sillano. Detta unità da luogo a un ammasso roccioso di tipo stratificato poco fratturato mascherato in superficie da una modesta coltre detritica a componente fine comunque molto compatta. Tale ammasso è emerso compatto sin dalla superficie come dimostra l'elevata velocità di propagazione delle onde sismiche siano esse



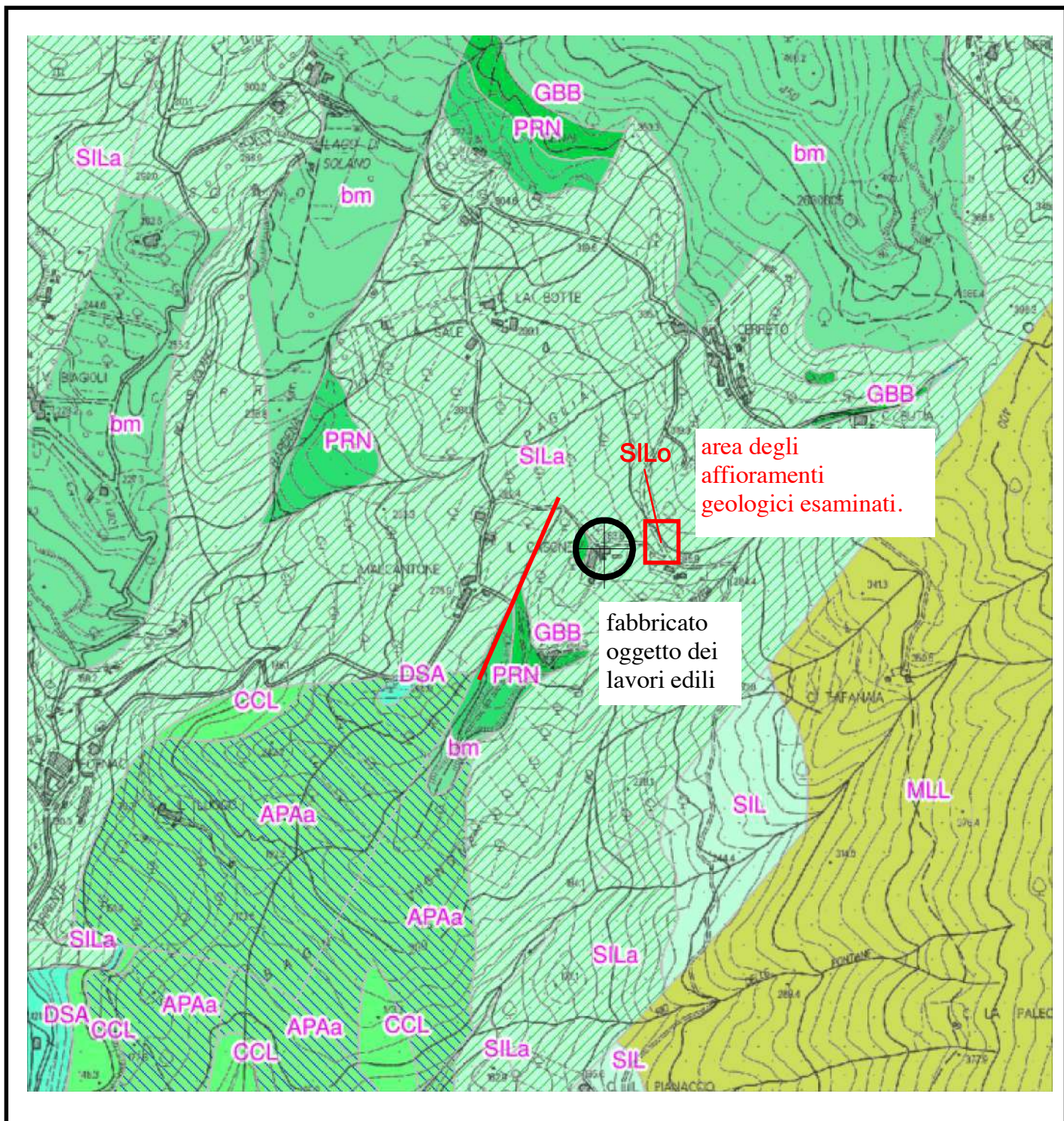
compressive (P) si di taglio (S). Il substrato sismico ( $V_s > 800$  m/s) si colloca a pochi metri di profondità. In termini di stabilità generale, l'area indagata, non soggetta a fenomenologie morfologiche attive (frane, erosioni accelerate, sedimentazioni, alluvionamenti), è scaturita stabile anche nei riguardi della problematica sismica mancando di: amplificazioni locali, dislocamenti per faglie attive capaci, densificazione delle coltri detritiche. In ragione di tale favorevole assetto geotecnico del sottosuolo lo stesso trova, ai sensi del NTC 2018, una piena rispondenza al campo delle “rocce tenere” al quale competono “velocità equivalente comprese tra 360 m/s e 800 m/s” come comprovano gli accertamenti svolti.

Per terminare, stante la natura geologica dell'area studiata, la progettazione in corso di realizzazione potrà attuarsi senza particolare limitazione, e quindi con piena possibilità di recupero e cambio di destinazione dei volumi esistenti ma anche con la possibilità di aggiunta di nuovi locali in elevato e in sotterraneo. Resta ferma la necessità di una successiva indagine geologica, rivolta alla definizione delle soluzioni strutturali maggiormente idonee (fondazioni, opere di sostegno, ecc...), al momento della progettazione architettonica dei singoli manufatti.

Sesto Fiorentino, febbraio 2022.



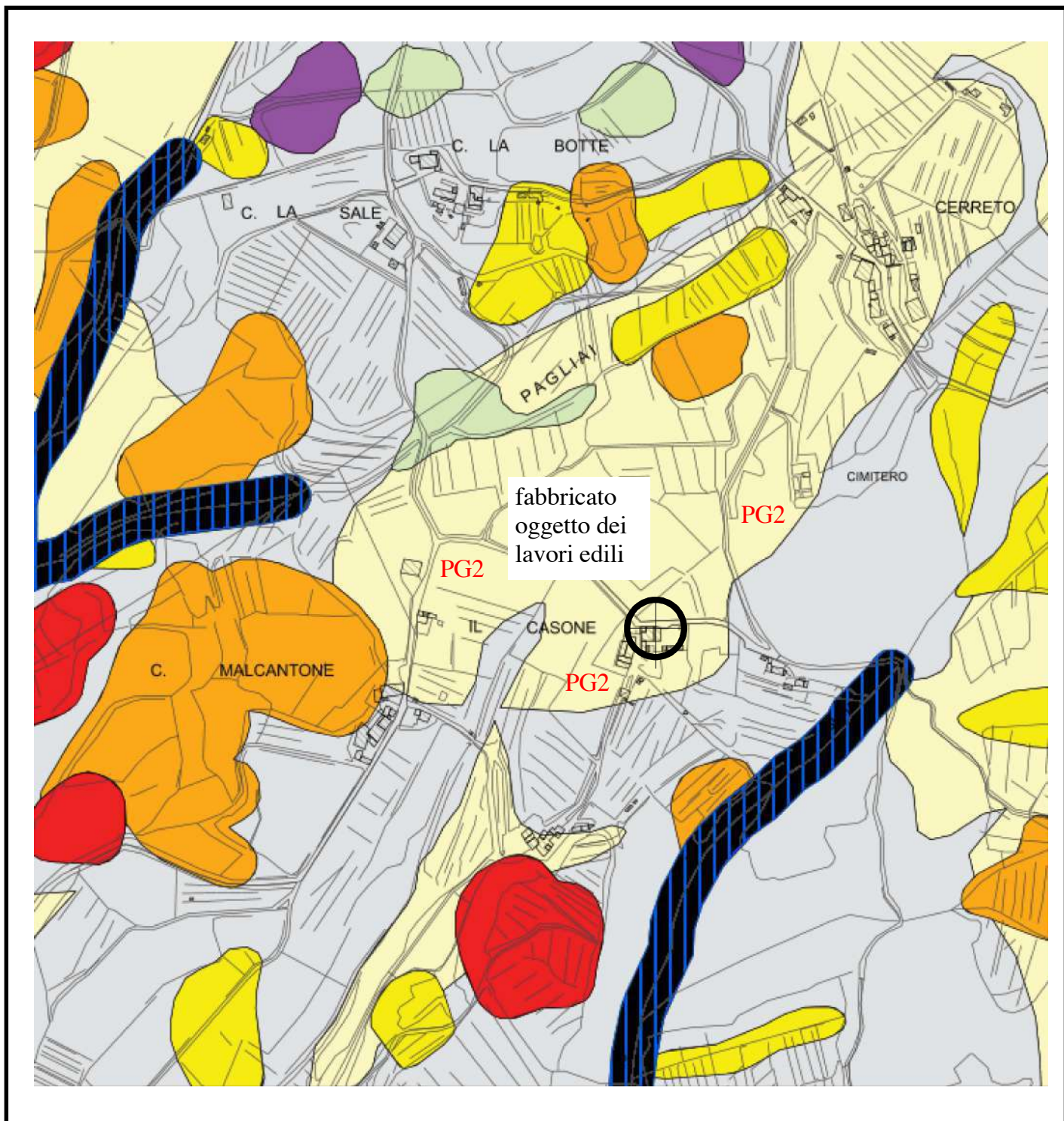




**Fig.1.** Localizzazione geologica dell'area studiata (stralcio della Carta geologica regionale, scala 10.000). "SILa" calcilutiti grige e argilliti nocciola della Formazione di Sillano-S. Fiora; "SILO": olistrostromi ofiolitici. Cretaceo sup.-Paleocene. Con linea rossa è indicata la posizione della faglia più prossima all'area.

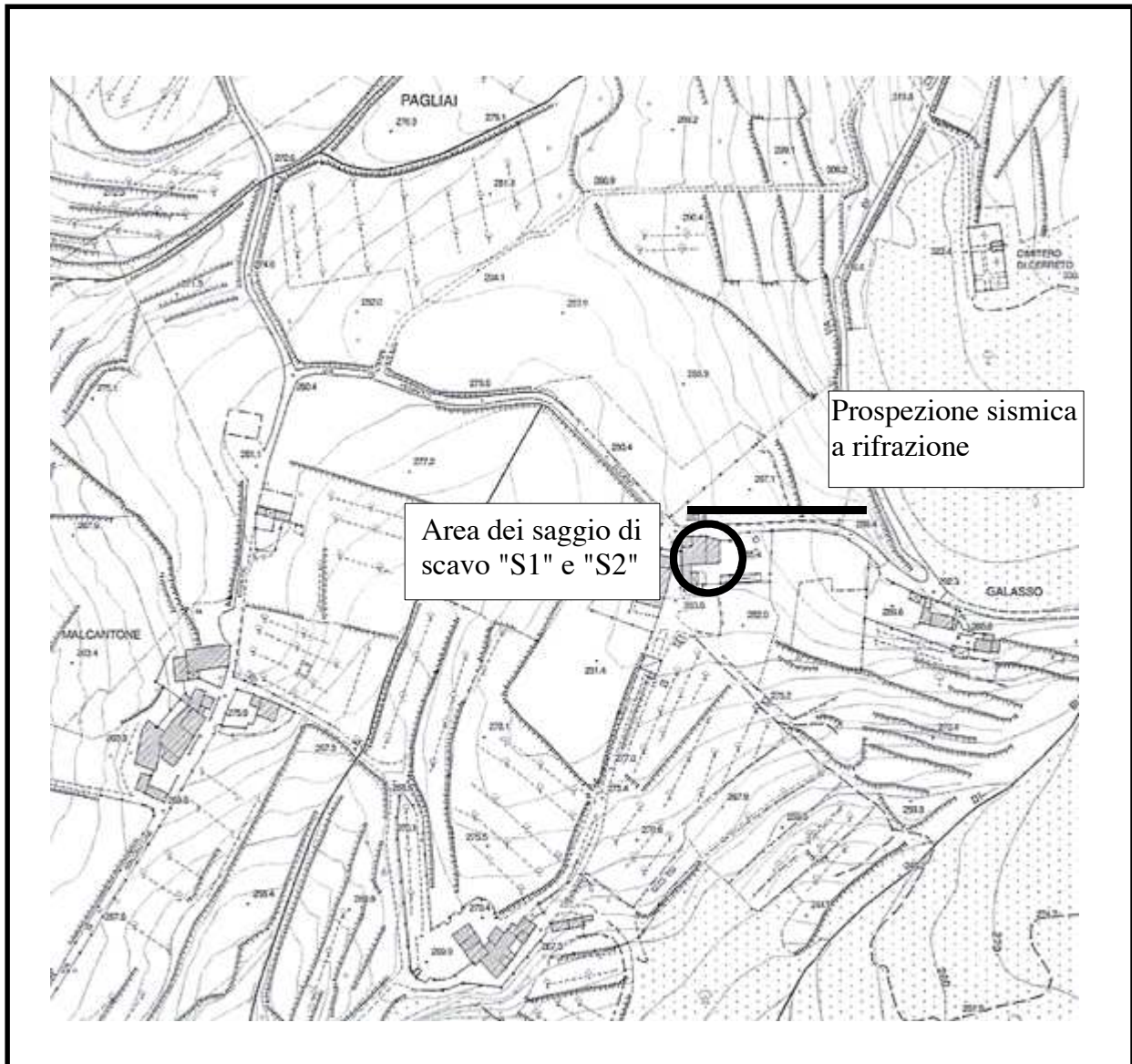






**Fig.2.** Localizzazione di pericolosità geologica dell'area studiata (stralcio del Piano Strutturale del comune di Prato). "PG2" area a pericolosità geomorfologica media con bassa propensione al dissesto in relazione alla pendenza del versante e alla litologia.





**Fig.3.** Ubicazione degli accertamenti geologici e getecnici eseguiti nell'area in esame.





prof. p.c. (m)	descrizione geotecnica del saggio	livello della falda geotecnica
0,2 0,4 0,6 0,8	<p>Unità R</p> <p>terreno a granulometria eterometrica di riporto</p> <p>0,8 m p.c.</p>	
1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0	<p>Unità A</p> <p>sabbia media (60% in volume) con limo (40% in volume) di colore ocra screziato grigio molto addensata (Pocket P. maggiore di 4 MPa) alternata a argilla debolmente limosa di colore avana screziato grigio dalla consistenza compatta (P.P.: 2,5;2,0;2,5;3,0 MPa) con inglobati rari clasti spigolosi di roccia calcarea. Deposito colluviale.</p> <p>2,0 m p.c.</p>	terreno asciutto privo di circolazione idrica
2,2 2,6		

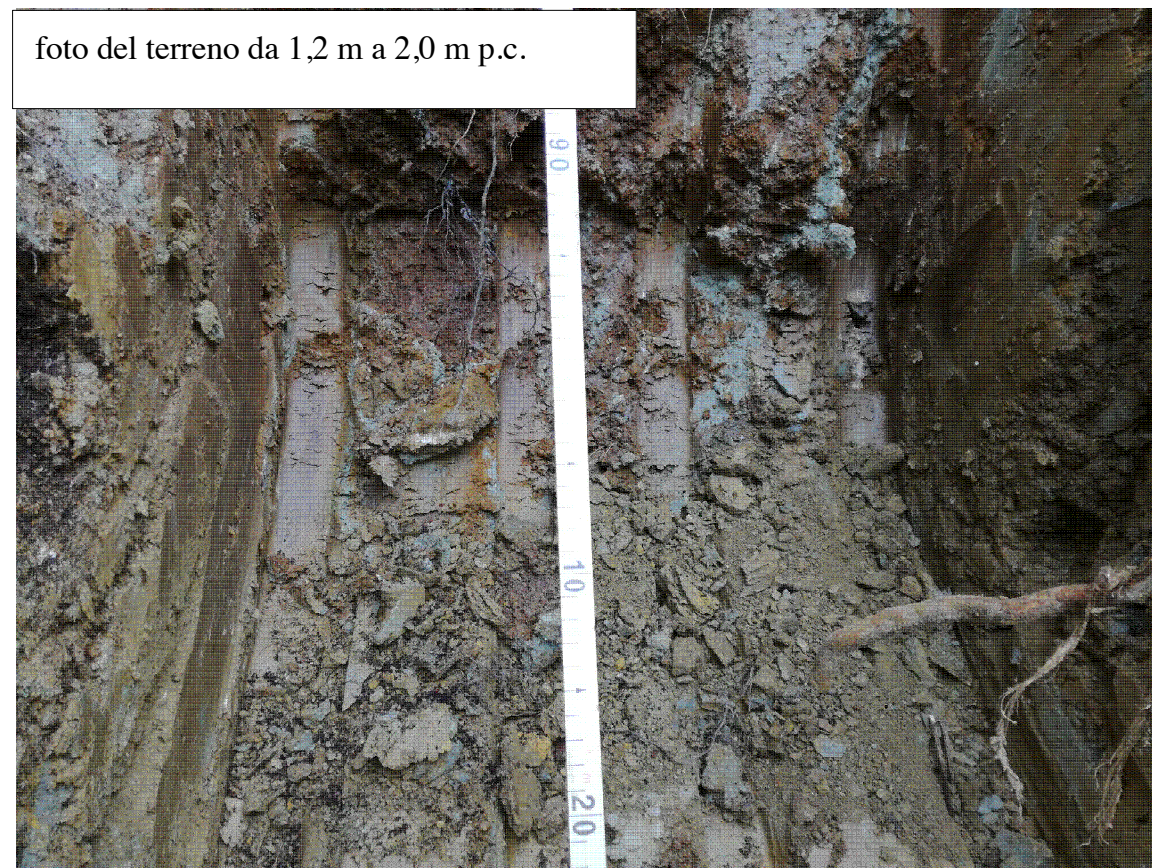
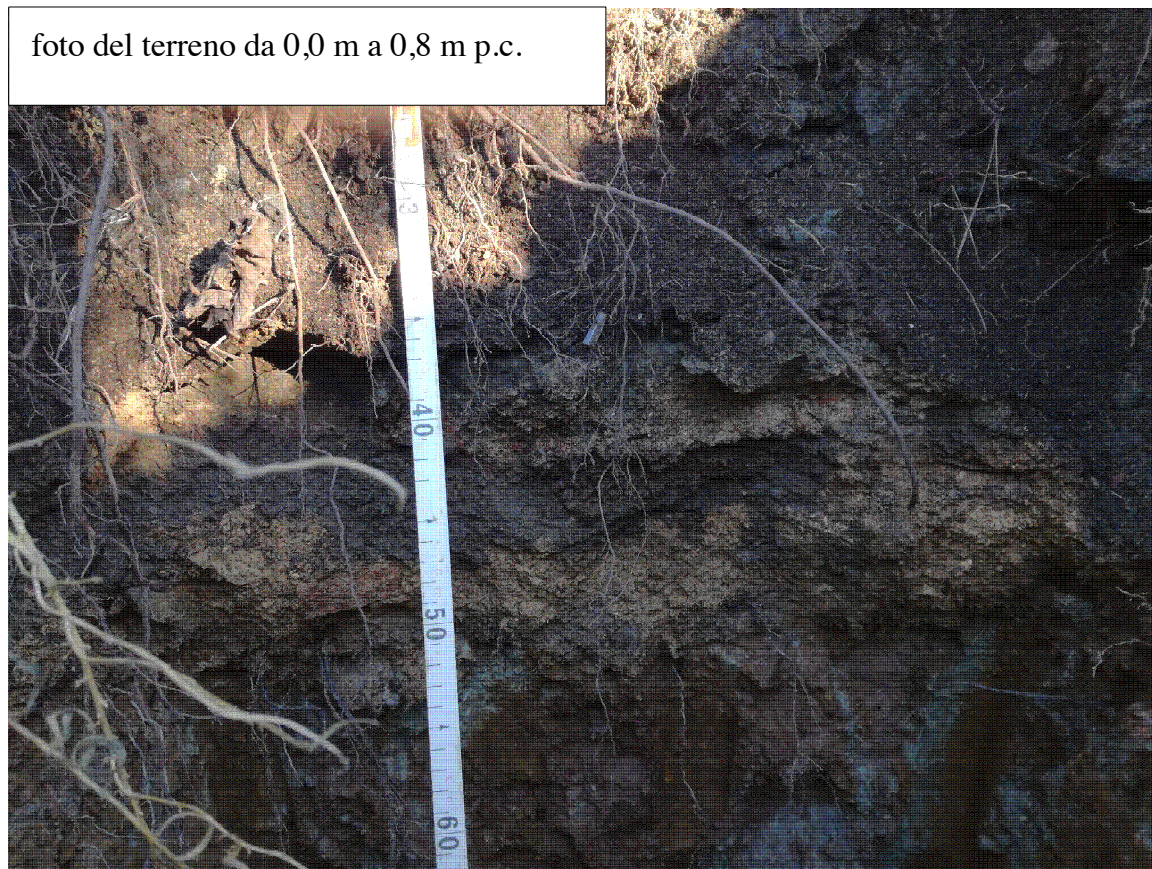


Fig. 4. Risultati dell'esame geologico-geotecnico del saggio di scavo "S1".





prof. p.c. (m)	descrizione geotecnica del saggio	livello della falda geotecnica
0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2	<p><b>Unità R</b></p> <p>terreno a granulometria eterometrica di riporto con clasti di roccia e di laterizio</p>	<p>terreno asciutto privo di circolazione idrica</p>
1,2 m p.c.	<p><b>Unità A</b></p> <p>sabbia media (60% in volume) con limo (40% in volume) di colore ocra screziato grigio molto addensata (Pocket P. maggiore di 4 MPa) alternata a argilla debolmente limosa di colore avana screziato grigio dalla consistenza compatta (P.P.: 2,5;2,0;2,5;3,0 MPa) con inglobati rari clasti spigolosi di roccia calcarea. Deposito colluviale.</p>	
1,8 2,0 2,2 2,6	1,8 m p.c.	



foto del terreno da 0,0 m a 1,2 m p.c.

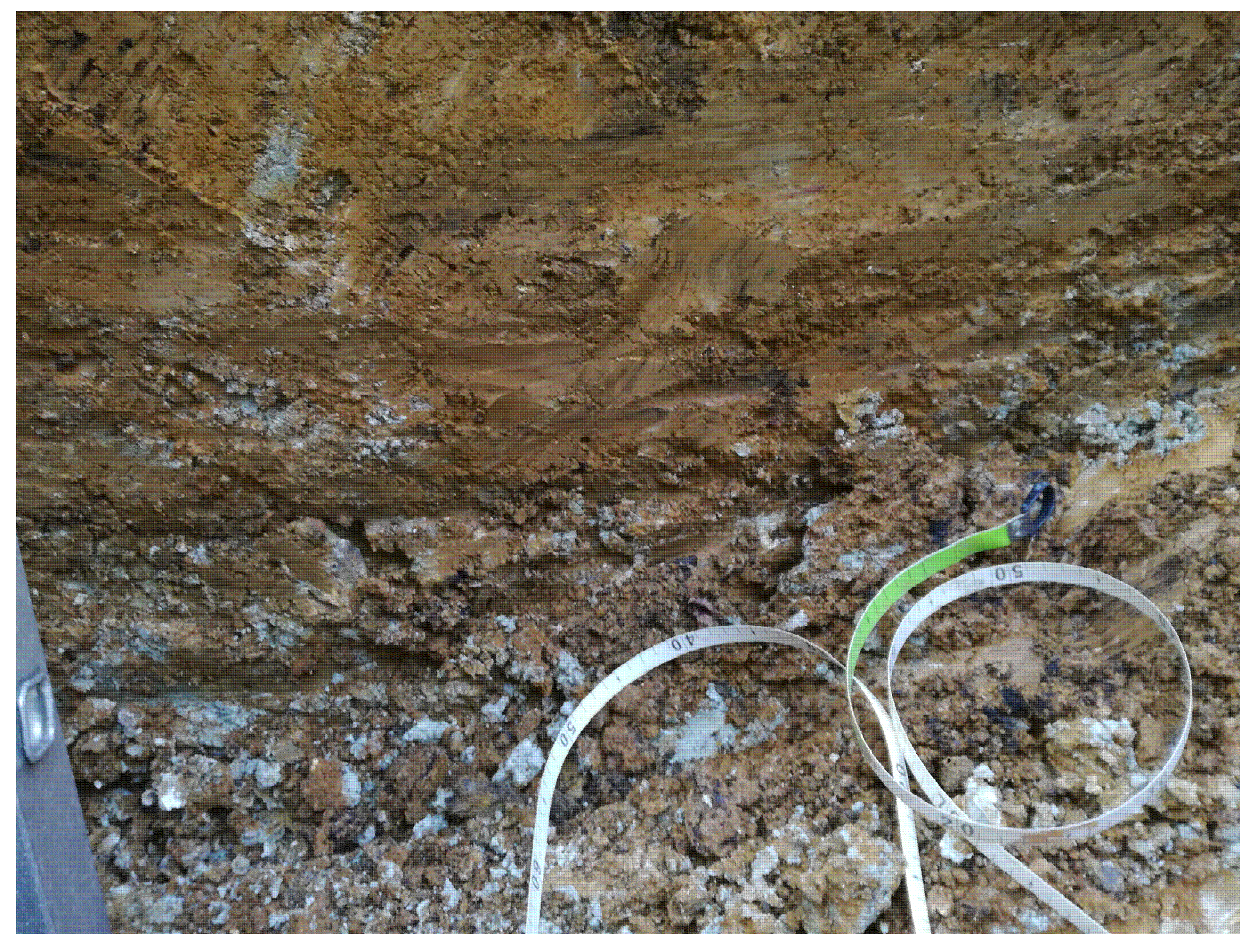


foto del terreno da 1,2 m a 1,8 p.c.

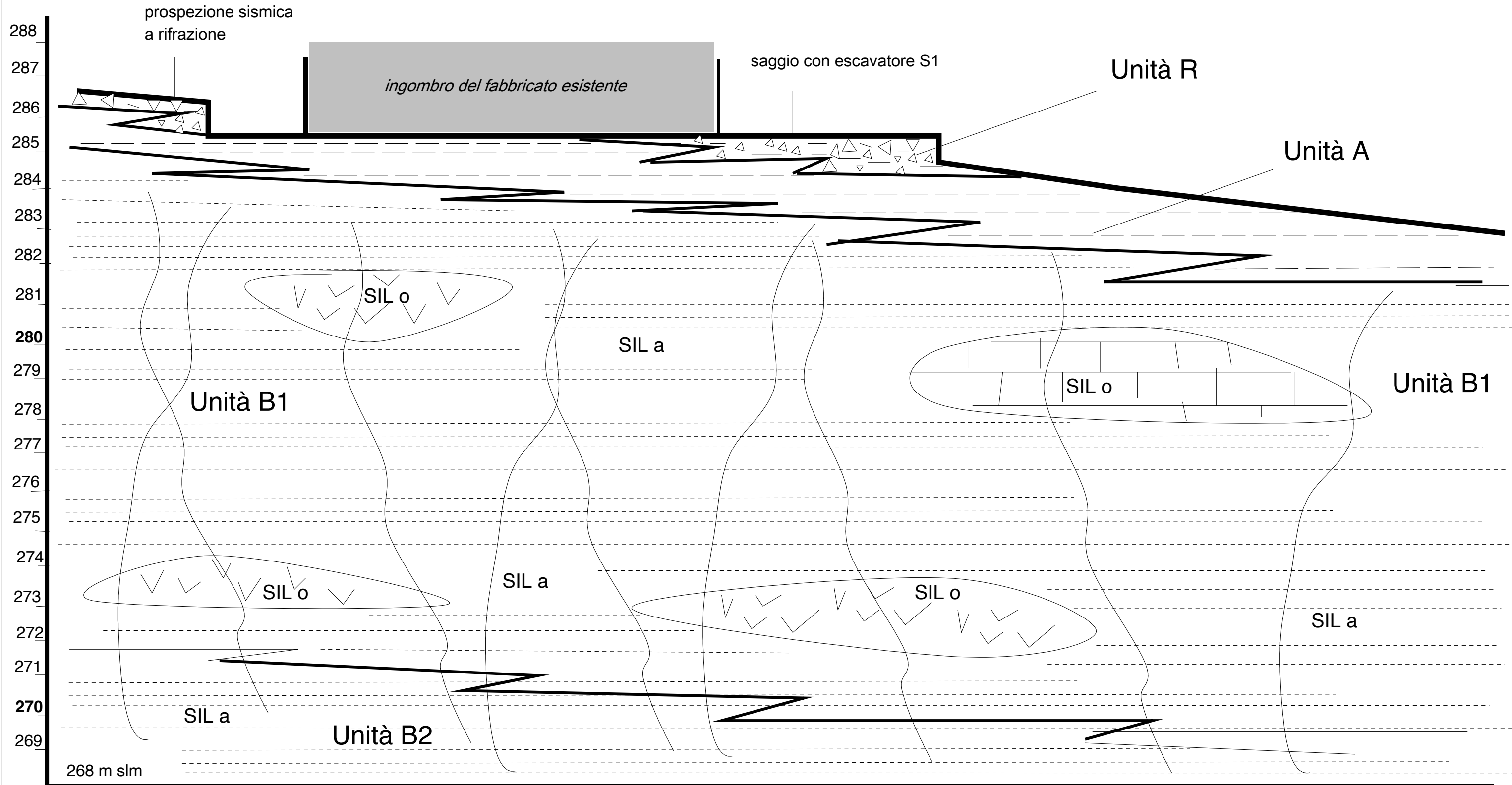
Fig.5. Risultati dell'esame geologico-geotecnico del saggio di scavo con escavatore "S2".





Nord

Sud



Unità R

terreno a granulometria eterometrica di riporto con clasti di roccia e di laterizio

Unità A

sabbia media (60% in volume) con limo (40% in volume) di colore ocra screziato grigio molto addensata (Pocket P. maggiore di 4 MPa) alternata a argilla debolmente limosa di colore avana screziato grigio dalla consistenza compatta (P.P.: 2,5;2,0;2,5;3,0 MPa) con inglobati rari clasti spigolosi di roccia calcarea. Deposito colluviale. Orizzonte geotecnico con velocità delle onde sismiche SH inferiore a 300 m/s.

Unità B1

argilliti prevalenti con intercalazioni di strati calcarei a granulometria fine (Formazione di Sillano, membro stratificato "SILa") con lenti di masse ofilitiche (gabbri e basalti) per frana sottomarina (membro caotico "SILo"). Ammasso roccioso di tipo stratificato-fratturato e alterato (substrato geolocio-geotecnico con velocità delle onde SH compresa tra 300m/s e 700m/s, Cretaceo sup-Paleocene).

Unità B2

argilliti prevalenti con intercalazioni di strati calcarei a granulometria fine (Formazione di Sillano, membro stratificato "SILa") con lenti di masse ofilitiche (gabbri e basalti) per frana sottomarina (membro caotico "SILo"). Ammasso roccioso di tipo stratificato-fratturato e inalterato (substrato geolocio-geotecnico e sismico con velocità delle onde SH superire a 700 m/s, Cetaceo sup-Paleocene).

Fig.6. Sezione geologica del sottosuolo di progetto, scala 1:100.



## RAPPORTO N° 20220126

Committente	Sig.ra Giuditta Guarducci
Tipo di indagine	Indagine sismica a rifrazione
Cantiere	Via di Malcantone e Vignone - Figline di Prato
Data Campagna	19 gennaio 2022
Data emissione rapporto	26 gennaio 2022



## Redazione

Dott. Simone Sartini

## Verifica

Dott. Simone Sartini

Dott. Alessandro Bianchi

  
So.Ge.t. srl  
So.Ge.t. srl

## Sommario

1	Scopo dell'indagine.....	1
2	Il metodo della sismica a rifrazione.....	2
	2.1 Principi teorici del metodo.....	2
	2.2 Inversione dei dati sismici a rifrazione .....	4
	2.3 Modalità di acquisizione .....	6
	2.3.3 Parametri di acquisizione e strumentazione .....	6
	2.4 Elaborazione dei dati .....	6
3	Analisi dei risultati e considerazioni interpretative .....	8
	3.1 Definizione della categoria di suolo sismico.....	10

## Indice delle figure

Fig. 1:	<i>Ubicazione del profilo sismico</i>
Fig. 2:	<i>Schema illustrante la propagazione delle onde sismiche</i>
Fig. 3:	<i>Geometria di acquisizione</i>
Fig. 4:	<i>Dromocrone</i>
Fig. 5:	<i>Tomografie sismiche ed indicazione dei sismostrati</i>

## Allegati

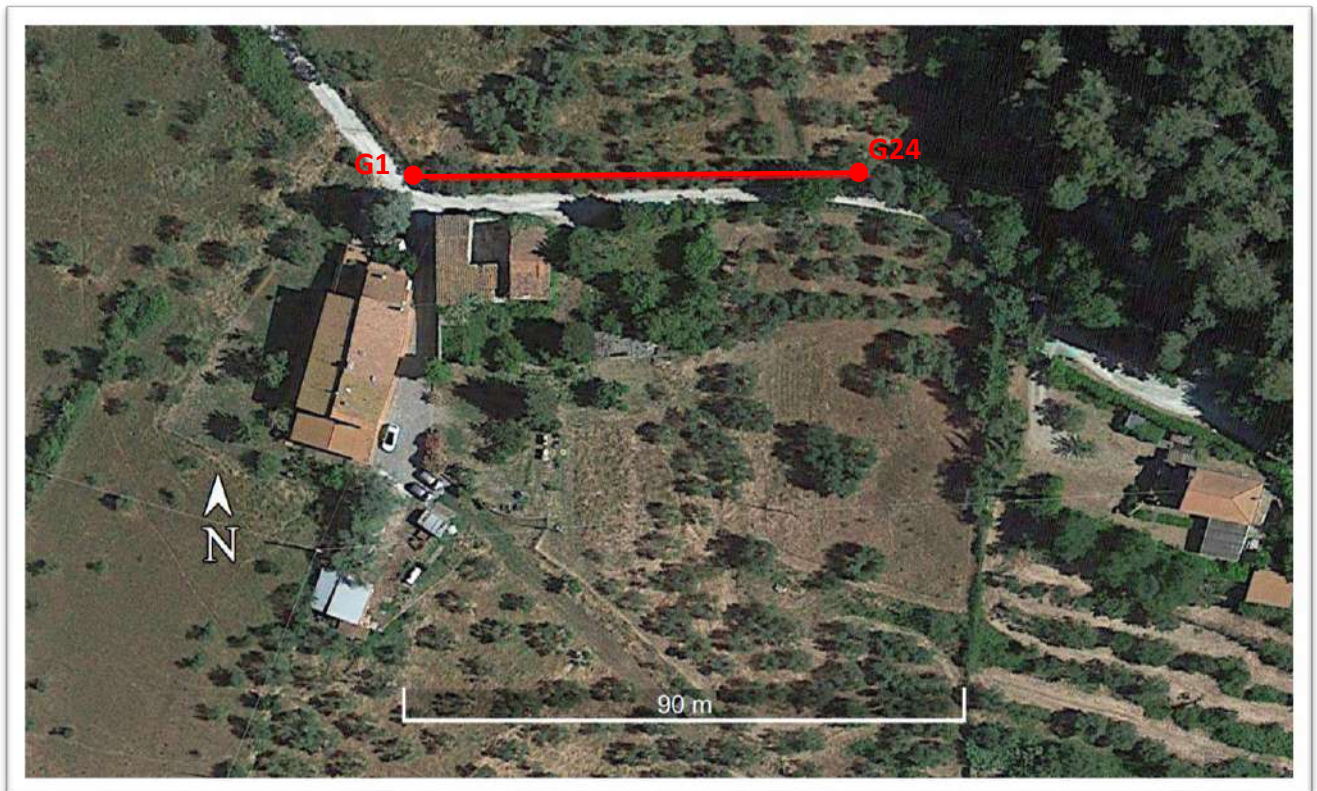
Tavola 1:	<i>Disposizione planimetrica della stesa sismica - Scala 1:800</i>
Tavola 2:	<i>Tomografia sismica Sp 1 - Onde P ed SH - Scala 1:250</i>



## 1. Scopo dell'indagine

Su richiesta della Committenza è stata progettata un'indagine geofisica per la caratterizzazione sismostratigrafica dei terreni su cui si imposta un edificio per civile abitazione posto in Via di Malcantone e Vignone, nel comune di Prato (PO). Nello specifico, in data 19/01/2022 è stata condotta una prova sismica a rifrazione lungo un profilo sismico tomografico (Figura 1) sfruttando la propagazione delle onde P e delle onde SH nel sottosuolo.

Nel presente documento si intende illustrare e commentare i risultati a cui si è pervenuti, dopo aver fornito una breve illustrazione del metodo e della strumentazione adoperati.



*Figura 1 - Ubicazione del profilo sismico.*

## 2. Il metodo della sismica a rifrazione

### 2.1 Principi del metodo

La sismica a rifrazione è un metodo di indagine geofisica attiva che si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo (*first break*) delle onde sismiche di tipo P o S.

Partendo dalla misura di questi è possibile, attraverso un processo di inversione, calcolare la velocità e lo spessore degli orizzonti in cui si propagano le onde elastiche e, quindi, ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo.

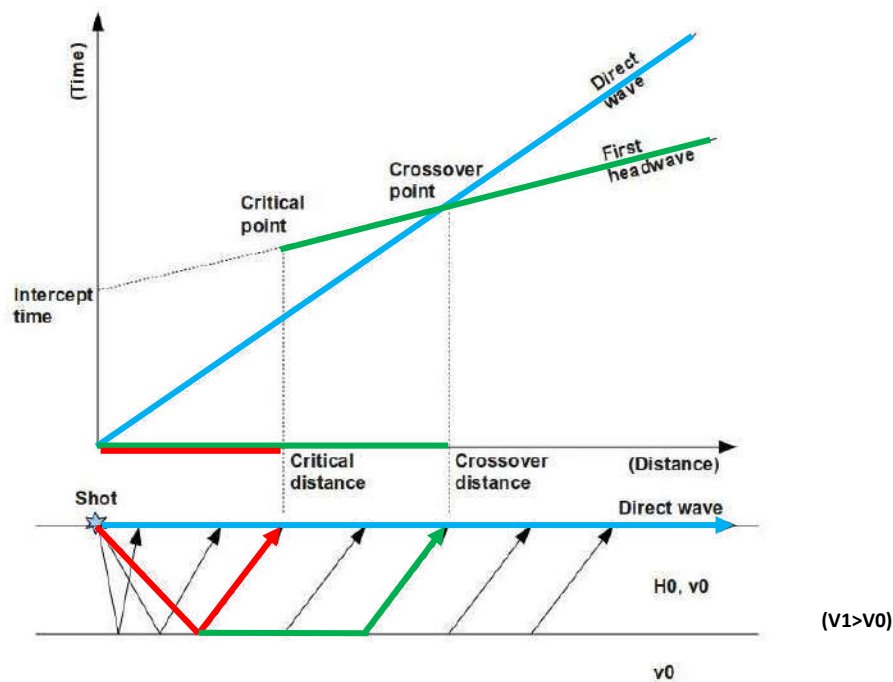
Fissato un sistema di riferimento spazio-temporale, in cui sono note le posizioni della sorgente, dei geofoni, e noto è anche l'istante di energizzazione (*tempo zero*), il tempo di primo arrivo sarà quello necessario affinché l'onda sismica prodotta venga rilevata da un sensore posto ad una certa distanza (*offset*) dal punto di energizzazione stesso.

In un esperimento di sismica a rifrazione, i tempi di primo arrivo sono attribuibili generalmente a onde dirette o rifratte criticamente.

Come illustrato in Figura 2, le onde dirette sono quelle che si propagano direttamente dalla sorgente ai geofoni, senza scendere in profondità; le onde rifratte invece sono quelle che, dopo essere penetrate in profondità nel sottosuolo, incontrano una superficie separante due strati caratterizzati da diverse velocità di propagazione (superficie di discontinuità), e vengono trasmesse nel mezzo sottostante. In particolare, quando questo ha velocità maggiore di quello sovrastante e quando viene raggiunta l'incidenza critica dei raggi sismici sulla discontinuità, si generano onde rifratte criticamente le quali si propagano parallelamente al rifratte per venire poi nuovamente trasmesse verso la superficie.

Queste onde tendono a propagarsi principalmente con la velocità caratteristica del mezzo sottostante, mentre le onde dirette si propagano con la velocità caratteristica dello strato superficiale: oltre una certa distanza (*distanza di crossover*) le onde rifratte criticamente sorpasseranno quelle dirette, arrivando così per prime ai geofoni.

Gli impulsi rifratti saranno quindi rilevati in superficie per offset maggiori o uguali alla distanza critica (distanza oltre la quale si generano le onde rifratte criticamente) e, mentre per offset piccoli i primi arrivi saranno quelli diretti, per distanze superiori al cosiddetto punto di sorpasso (*crossover*), le onde rifratte impiegheranno tempi inferiori per raggiungere i ricevitori.



**Figura 2** - Schema rappresentante la propagazione di un'onda diretta (linea azzurra) e delle onde rifratte criticamente (linee rosse e verdi), con le relative dromocrone nel grafico tempo-distanza.

Analizzando i dati ricavati da tale tipo di indagine, è possibile pervenire ad un modello bidimensionale di sottosuolo tramite un apposito programma di elaborazione tomografica. La metodologia più semplice consiste nella costruzione di un grafico tempo-distanza in cui sono riportati in ascisse gli offset, in ordinata i tempi di arrivo dei primi impulsi per ciascun geofono, e l'origine degli assi corrisponde al punto di energizzazione (Shot). In questo modo si ottengono curve tempo-distanza (dromocrone) il cui andamento dipende dalle caratteristiche fisiche del sottosuolo.

Le sezioni d'indagine vengono suddivise per passi successivi in celle quadrate o rettangolari, (di dimensioni variabili in dipendenza delle spaziature adottate tra i sensori e del passo tra i diversi punti di scoppio), e per ciascuna di esse, secondo un procedimento iterativo di convergenza, si calcola il tempo necessario all'impulso sismico per attraversarle.

Dalle dromocrone dei primi arrivi (curve che rappresentano la variazione del tempo di percorso in funzione della distanza sorgente - ricevitore) è possibile risalire al modello di velocità sismica del sottosuolo, fino alla base del rifrattore più profondo individuato (poiché i raggi sismici che scendono a profondità superiori non ritornano in superficie nei punti in cui sono collocati i geofoni).

Questa procedura rende possibile la ricostruzione di un modello di velocità sismiche del mezzo nella sezione di interesse. Poiché le velocità di propagazione delle onde di compressione P e di taglio S sono proporzionali a diversi fattori, tra i quali la densità, la composizione del materiale, lo stato tensionale della

formazione e l'eventuale grado di fratturazione, è possibile dedurre da queste la distribuzione dei materiali presenti nel sottosuolo.

In campo applicativo, tale metodologia trova impiego nell'individuazione dei limiti litologici superficiali, nella determinazione delle superfici di scorrimento delle frane e nella valutazione del grado di fratturazione degli ammassi rocciosi. Inversioni di velocità con la profondità e sensibili variazioni laterali di velocità, costituiscono invece condizioni ambientali che ne limitano l'efficacia.

Il potere risolutivo della tecnica tomografica è legato essenzialmente a:

- numero e distribuzione delle misure nella sezione indagata;
- lunghezza d'onda della perturbazione sismica, la quale a sua volta dipende dalla velocità e dalla frequenza principale di oscillazione delle onde sismiche;
- orientamento e distribuzione delle eventuali discontinuità e della stratificazione del sottosuolo;
- lunghezza dello stendimento in superficie.

## 2.2 Inversione dei dati sismici a rifrazione

Il metodo di interpretazione utilizzato si basa su un modello iniziale ottenuto mediante un algoritmo che processa i tempi di primo arrivo applicando i metodi dei "Fronti d'onda" (Brückl, 1987 e Jones and Jovanovich, 1985) e del *Plus-minus* (Hagedoorn, 1959), che usano la regressione del campo dei tempi di primo arrivo (Brückl, 1987). Tale metodologia può essere considerata un'ottimizzazione dell'algoritmo del GRM (*Generalized reciprocal method*, Palmer, 1980), in grado di risolvere l'immagine di rifrattori con andamenti topografici molto accidentati. Il software utilizzato per condurre l'interpretazione sfruttando questo metodo è *Rayfract*<sup>™</sup>, sviluppato da Intelligent Resources Inc. (Canada). Questo utilizza un codice di calcolo per la modellazione tomografica che realizza, nell'algoritmo d'inversione, un "raytracing" con raggi curvilinei, e un metodo di calcolo ai minimi quadrati attraverso la tecnica di *Delta t-v* (Gebrande and Miller, 1985).

In generale, il tempo di percorrenza di un'onda sismica lungo un percorso  $S$  attraverso un mezzo bidimensionale (2D) può essere scritto come:

$$t = \int_S u[r(x, y)]$$

dove  $u(r)$  è il campo delle lentezze (l'inverso delle velocità) ed  $r$  è il vettore posizione. Discretizzando il campo di lentezze  $u(r)$  con  $m$  celle equidimensionali, ognuna caratterizzata da una lentezza costante  $u_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ), la dromocrona  $i$ -esima delle  $n$  disponibili può essere scritta come:

$$t_i = \sum_{k=1}^m l_{ik} \cdot u_k$$



dove  $l_{ik}$  rappresenta la porzione dell' $i$ -esima dromocrona nella cella  $k$ -esima. Considerando tutte le dromocrone disponibili si ottiene il seguente sistema:

$$\mathbf{t} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{u}$$

dove,  $\mathbf{t}$  è il vettore dei dati sperimentali (tempi di primo arrivo letti sui sismogrammi),  $\mathbf{M}$  è la matrice rettangolare contenente le porzioni dei percorsi nelle varie celle ed  $\mathbf{u}$  è il vettore delle lentezze (incognite del problema). Il problema inverso da risolvere è pertanto:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{M}}^{-1} \cdot \mathbf{t}$$

dove  $\tilde{\mathbf{M}}^{-1}$  è la matrice inversa generalizzata. Poiché i percorsi sismici dipendono dalle lentezze, la matrice  $\mathbf{M}$  dipende anche dalle lentezze e quindi il problema inverso è un problema non-lineare che deve essere risolto iterativamente partendo da una soluzione iniziale (modello di partenza). L'equazione da considerare è pertanto la seguente:

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{t}$$

dove  $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t} - \mathbf{t}(\mathbf{u}_0)$  è la differenza tra i tempi sperimentali e i tempi calcolati per il modello di lentezze iniziale  $\mathbf{u}_0$ ;  $\Delta \mathbf{u}$  è la perturbazione del modello iniziale; e  $\mathbf{J}$  è la matrice jacobiana contenente le derivate parziali delle dromocrone rispetto alle lentezze nelle celle  $\frac{\partial t_i}{\partial u_k}$ .

Poiché il problema è parzialmente sovradeterminato (per alcune celle si hanno molti percorsi) e parzialmente sottodeterminato (per alcune celle non è disponibile nessun percorso) esso è stato risolto con la tecnica dei minimi quadrati smorzati, cioè è stata minimizzata la seguente funzione errore:

$$\varphi = \|\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{t}\|^2 + \lambda \|\mathbf{L}_2 \mathbf{u}\|^2$$

dove  $\lambda$  è il fattore di smorzamento e la matrice  $\mathbf{L}_2$  è una matrice derivata seconda (operatore laplaciano) che forza la soluzione verso una soluzione la più regolare possibile (smoothest solution).

L'affinamento della soluzione supportata con il metodo Delta t-v avviene attraverso un ulteriore processo finale tomografico implementato da G.T. Schuster et alii, (Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory, 1993, Geophysics, Volume 58, Issue 9, pp. 1314-1323) e Watanabe (Seismic travelttime tomography using Fresnel volume approach, Expanded Abstracts of 69th SEG Annual Meeting, SPRO12.5, 1999) denominato procedimento tomografico WET (Wavepath Eikonal Travelttime).

Nonostante esista sempre un grado di incertezza nel processo interpretativo l'immagine, essendo quantitativa, se adeguatamente associata ad uno studio geologico dell'area, fornisce un notevole contributo alla conoscenza geologica e idrogeologica della zona. Infatti, a differenza delle indagini geognostiche (penetrometrie, sondaggi, ecc.) che forniscono una conoscenza puntuale della stratigrafia, una tomografia sismica, permette una ricostruzione spaziale continua degli strati litologici.

Per non incorrere in errori interpretativi talvolta anche notevoli, è sempre consigliabile adottare diverse metodologie di indagine (studio geologico, indagine geognostica, indagine geofisica, ecc.), così da avere più

informazioni, di origine diversa, da interpretare e di conseguenza un minor margine di errore dato dall'interpretazione stessa.

## 2.3 Modalità di acquisizione

Per poter eseguire un'elaborazione tomografica, è necessario effettuare diverse energizzazioni lungo il profilo sismico e la geometria dello stendimento deve essere il più lineare possibile, con una distanza intergeofonica costante (sensori equispaziati).

In particolare, l'intervallo tra i geofoni è inversamente proporzionale al grado di risoluzione desiderato mentre la lunghezza dello stendimento è legata alla profondità di indagine che si vuole raggiungere. Generalmente si utilizzano un minimo di n. 24 geofoni con interspazio compreso tra 1 e 10 m.

### 2.3.3 Parametri di acquisizione e strumentazione

Ai fini dell'acquisizione, per il profilo Sp 1 sono stati adottati i seguenti parametri:

- Numero di geofoni = 24
- Distanza intergeofonica = 3.0 m
- Numero di shot = 11 (2 esterni + 1 centrale + 8 intermedi) (Figura 3)
- Distanza degli shot esterni (da G1 e G24) = 3.0 m
- Lunghezza totale del profilo sismico = 75.0 m

Per la generazione delle onde P è stata utilizzata una mazza da 8 Kg incidente verticalmente su una piastra in alluminio; mentre per la generazione delle onde SH è stata utilizzata una trave in alluminio accoppiata al terreno ed energizzata lateralmente mediante una mazza da 8 Kg.

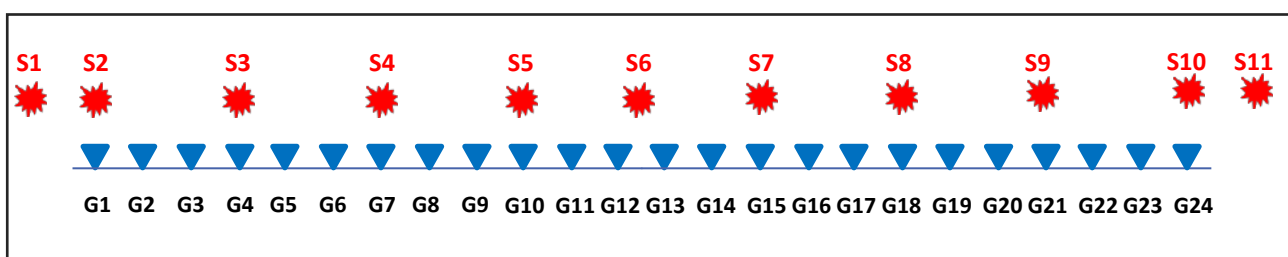


Figura 3 - Geometria di acquisizione impiegata per il profilo Sp 1.

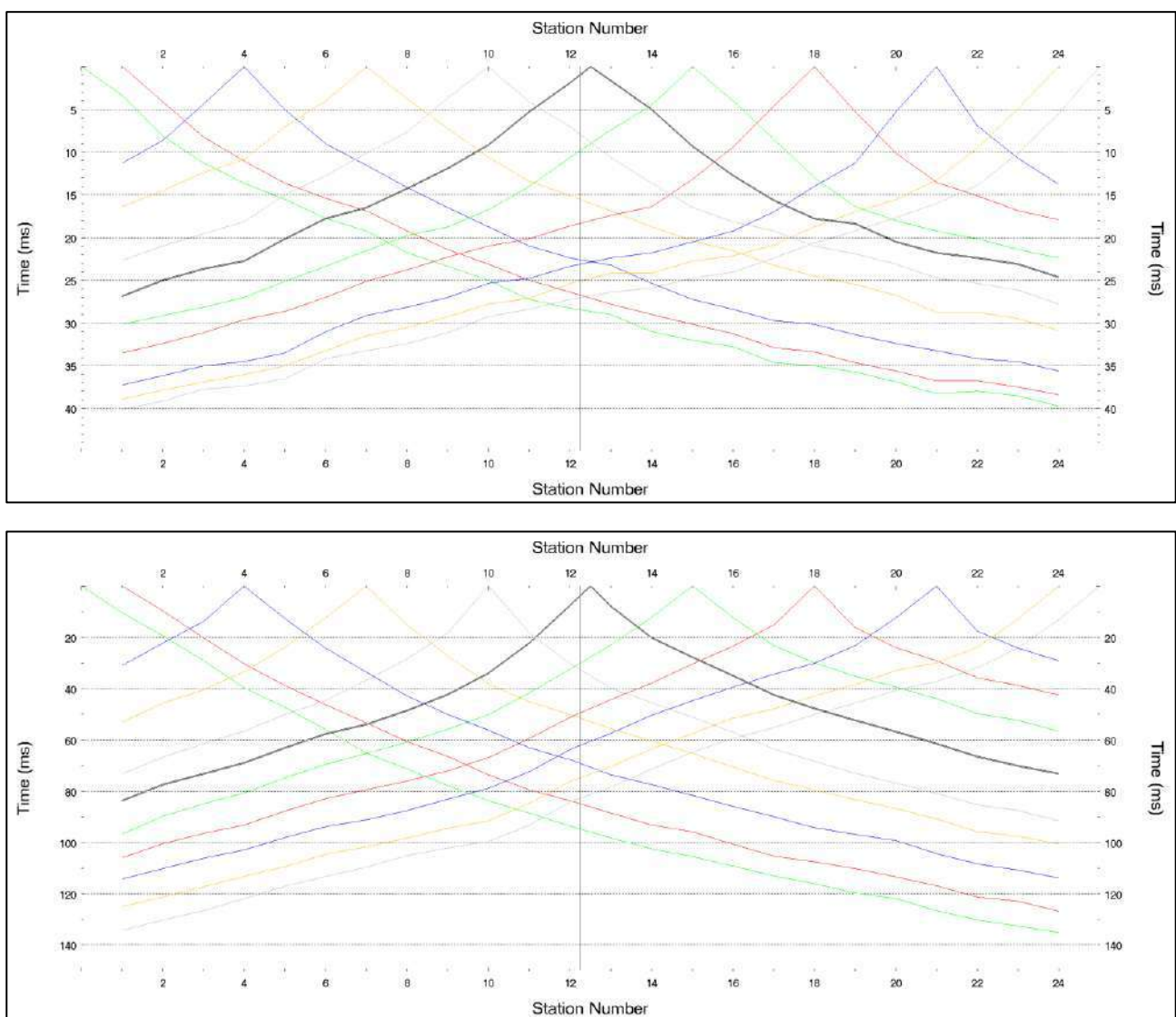
## 2.4 Elaborazione dei dati

I dati acquisiti sono stati elaborati ed interpretati tramite l'utilizzo del software *Rayfract®*, che permette di ottenere un modello di velocità del sottosuolo applicando un metodo sismico-tomografico.

Sinteticamente, la procedura di elaborazione consiste in due operazioni fondamentali:

- 1) Picking dei primi arrivi, atto ad individuare e selezionare i primi arrivi del segnale sismico registrato, attraverso cui il software potrà generare le dromocrone (Figura 4);
- 2) Inversione tomografica tramite la procedura illustrata nel paragrafo 2.2 del presente documento.

Il risultato dell'inversione consiste in una sezione verticale con andamento delle velocità delle onde P e/o SH nel sottosuolo, rappresentate sia tramite isolinee con stessa velocità che tramite colori.



**Figura 4 - Profilo Sp 1: dromocrone per le onde P (in alto) e per le onde SH (in basso).**

### 3. Analisi dei risultati e considerazioni interpretative

I risultati della prova sismica a rifrazione, oggetto del presente documento, sono riportati nelle tavole allegate. Nello specifico, in Tav. 1 è riportata la planimetria dell'area di indagine con l'ubicazione del profilo sismico tomografico Sp 1, acquisito sia in onde P che in onde SH; nella Tav. 2 sono mostrate le tomografie risultanti dalla elaborazione e inversione dei dati sismici acquisiti.

Analizzando i risultati si possono fare le seguenti considerazioni:

- 1) La profondità di indagine massima raggiunta con la geometria di acquisizione adoperata è di circa 21 m per la tomografia in onde P e di circa 17 m per la tomografia in onde SH; il bedrock sismico (terreni o rocce caratterizzate da una velocità delle onde di taglio  $V_s$  maggiore o uguale a 800 m/s) è stato intercettato a circa 14.50 m di profondità (al centro dello stendimento).
- 2) Le velocità con cui le onde si propagano nei terreni costituenti il sito in oggetto aumentano gradualmente con la profondità senza evidenti discontinuità laterali; le velocità delle onde P risultano essere comprese tra 600 m/s e 3300 m/s, mentre quelle delle onde S tra 200 m/s e 850 m/s).
- 3) Possono essere riconosciuti tre sismostrati principali:
  - Un primo sismostrato superficiale con velocità delle onde P inferiori a 1200 m/s e velocità di taglio inferiori a 400 m/s, interpretabile come materiale più allentato di copertura; questo sismostrato presenta uno spessore che varia da 2 m (verso il geofono G24) a 3.5 metri circa (verso il G1).
  - Il secondo sismostrato risulta essere caratterizzato da valori di velocità intermedi ( $1200 < V_p < 1800-2000$  e  $400 < V_s < 600$  m/s); anche questo sismostrato mostra uno spessore variabile, da 2/3 m circa a 7.5 m circa ed è verosimilmente riconducibile all'ammasso roccioso superficiale, fratturato ed alterato;
  - L'ultimo sismostrato, con velocità delle onde P superiori a 1800-2000 m/s e velocità delle onde S superiori a 600 m/s, marca un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del substrato roccioso.

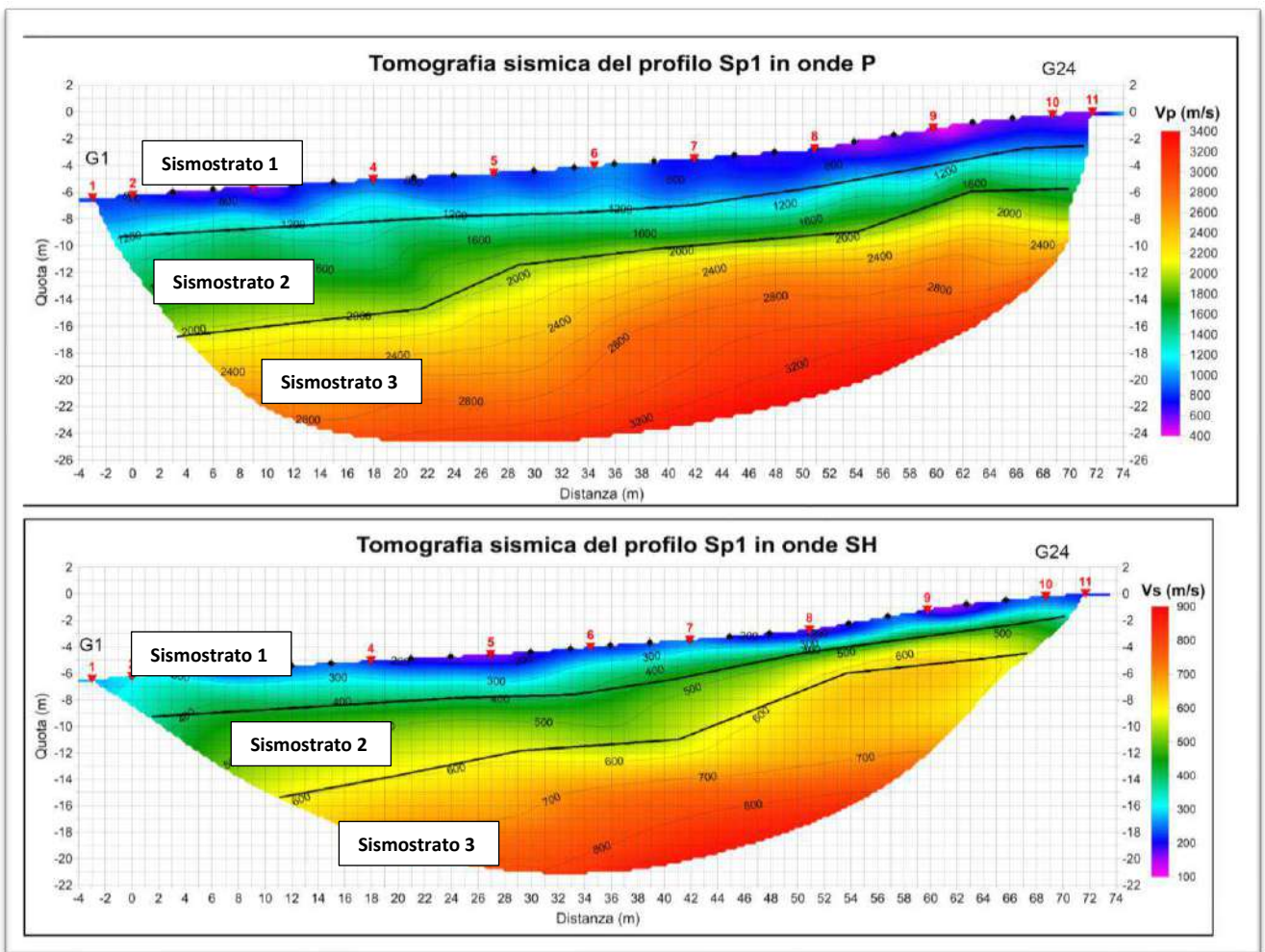


Figura 5 - Tomografie sismiche ed indicazione dei sismostrati

### 3.1 Definizione della categoria di suolo sismico

In ottemperanza a quanto definito dalla vigente normativa “Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018”, la classificazione di suolo sismico relativo al sito oggetto di studio, è stata ottenuta sulla base delle condizioni stratigrafiche e del valore di velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall’espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

- $h_i$ :** spessore dell’*i*-esimo strato
- $V_{s,i}$ :** velocità delle onde di taglio nell’*i*-esimo strato
- $N$ :** numero di strati
- $H$ :** profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  superiore o uguale a 800 m/s

Nei depositi con profondità  $H$  del substrato inferiore a 30 m (come nel caso in oggetto), la velocità equivalente delle onde di taglio ( $V_{s,eq}$ ) è ottenuta ponendo  $H$  uguale allo spessore dei terreni soprastanti il bedrock sismico.

Nel caso specifico, il calcolo della  $V_s$  equivalente è stato eseguito in corrispondenza della metà del profilo sismico (progressiva  $X=37.5$  m) a partire dal p.c. e da -1 m di profondità con  $H$  rispettivamente uguale a 14.55 m e 13.55 (profondità del bedrock sismico alla progressiva in corrispondenza della quale è stato eseguito il calcolo). I risultati sono riportati nella tabella successiva mentre nella Tabella 2 è riportata la classificazione dei suoli di fondazione.

Progressiva (m)	Piano di fondazione	H (m)	$V_s$ equivalente (m/s)	Categoria
37.5	0 m da p.c.	14.55	<b>492</b>	<b>B</b>
	-1 m da p.c.	13.55	<b>537</b>	<b>B</b>

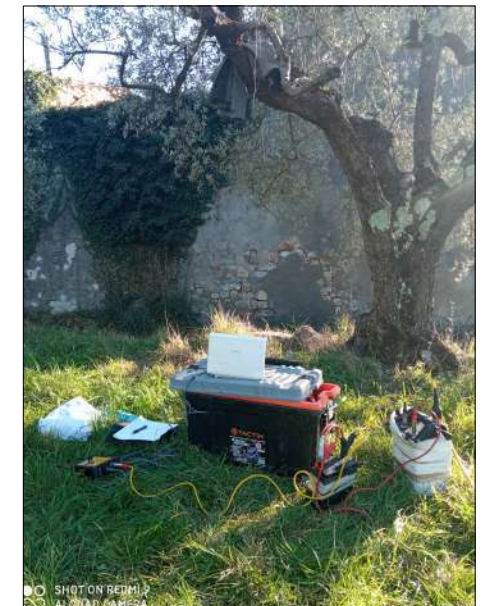
**Tabella 1** - Valori della  $V_s$  equivalente per diverse verticali lungo il profilo sismico.



Categoria	Caratteristiche di sottosuolo
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelli definiti per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

**Tabella 2 - Classificazione dei suoli di fondazione.**





**So.Ge.T.** s.r.l. di Sartini S., Bianchi A.  
via per S. Alessio 1733/C, 55100 Lucca

P.I./ C.F. 02115540466 e.mail: info@soget.biz  
web: www.soget.biz - Tel e Fax +39 0583 343380

**Cliente:**  
Sig.ra Giuditta Guarducci

**Cantiere:**  
Via di Malcantone e Vignone – Figline di Prato

**Oggetto:**  
Indagine sismica a rifrazione in onde P ed SH

**Contenuto:**  
Disposizione planimetrica del profilo sismico

**Acquisizione:**  
D. Tomova, I. Cavirani, A. Corso

**Approvazione:**  
S. Sartini, A. Bianchi

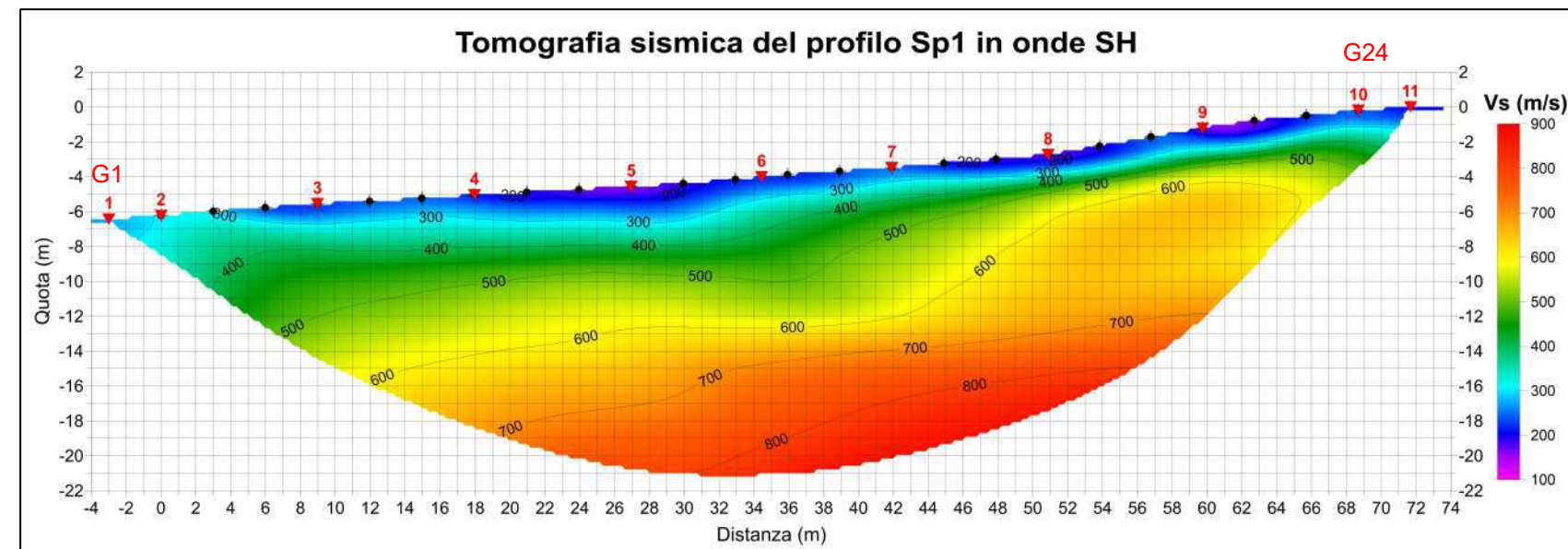
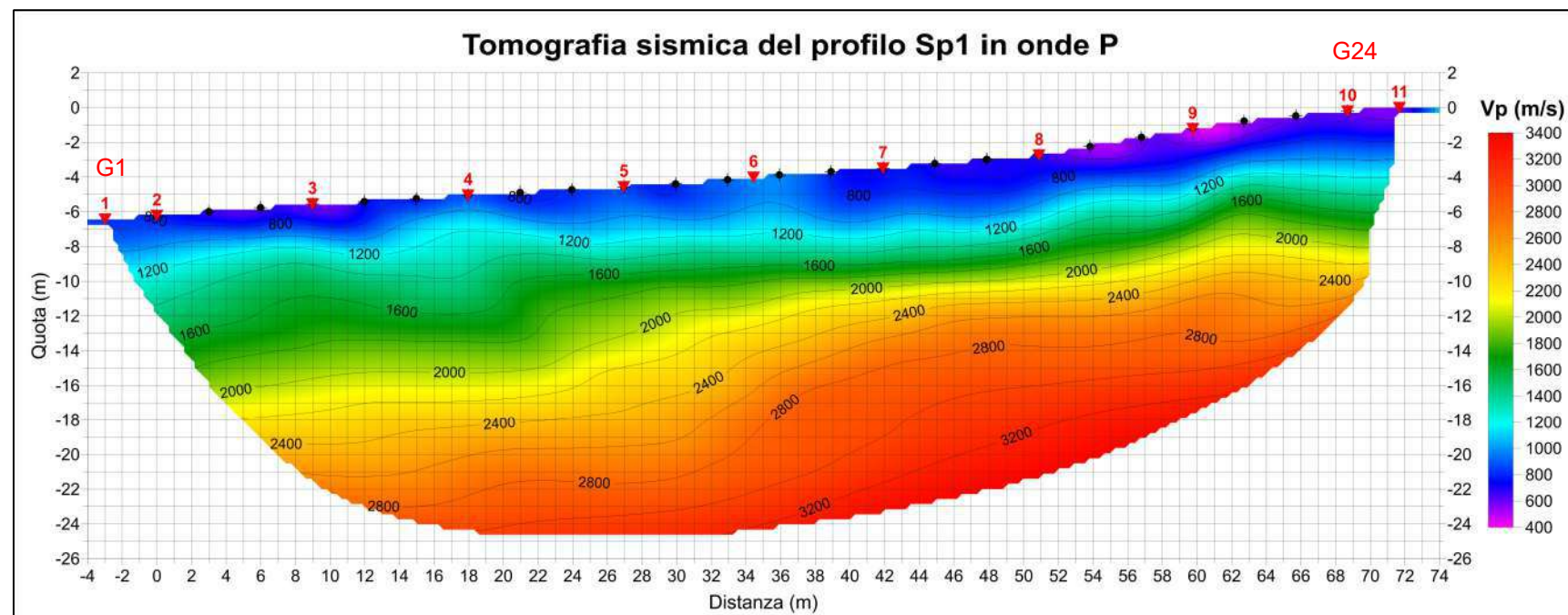
**Scala 1:1000 - Formato A3**

**Elaborazione:**  
D. Tomova

**Revisione: 00**

Tav. 1





**So.Ge.T.** s.r.l. di Sartini S., Bianchi A.  
via per S. Alessio 1733/C, 55100 Lucca

P.I./ C.F. 02115540466 e.mail: info@soget.biz  
web: www.soget.biz - Tel e Fax +39 0583 343380

**Cliente:**

Sig.ra Giuditta Guarducci

**Cantiere:**

Via di Malcantone e Vignone – Figline di Prato

**Oggetto:**

Indagine sismica a rifrazione in onde P ed SH

**Contenuto:**

Tomografia Sismica Sp 1 - Onde P ed SH

**Acquisizione:**

D. Tomova, I. Cavirani, A. Corso

**Approvazione:**

S. Sartini, A. Bianchi

Scala 1:400 - Formato A3

**Elaborazione:**

D. Tomova

**Revisione:** 00

Tav. 2

Firmato da:

**di luca marco**

codice fiscale DLCMRC63T23D612G

num.serie: 65154012518525660619592666169910414786

emesso da: ArubaPEC S.p.A. NG CA 3

valido dal 22/01/2021 al 23/01/2024

**Azzini Francesco**

codice fiscale ZZNFNC59A21G999V

num.serie: 130868110396024029107422209001834932996

emesso da: ArubaPEC S.p.A. NG CA 3

valido dal 26/01/2021 al 27/01/2024

**cuttano cristian**

codice fiscale CTTCST75D14G999L

num.serie: 161658039852010225585268112423264221534

emesso da: ArubaPEC S.p.A. NG CA 3

valido dal 22/02/2021 al 23/02/2026