

PROVINCIA DI TREVISO

MIGLIORAMENTO SISMICO DEL MAGAZZINO PROTEZIONE CIVILE "EX MOSTRA VINI"

PROGETTO DEFINITIVO-ESECUTIVO

Allegato		Relazione geotecnica			
B					
Sigla 2-122_MAG		file ESE_all B_Rel Geo	data 15.12.2021	redatto GNZ	verificato GNZ
REV	DATA	DESCRIZIONE			
01	06.05.2022				
Ing. Ugo GANZ STUDIO DI INGEGNERIA PIEVE DI SOLIGO - Via G. Schiratti n. 49/1 tel. 0438-841998 fax 0438-837343 e-mail info@studioganz.com					



REGIONE DEL VENETO

Provincia di Treviso



Comune di Santa Lucia di Piave



Indagine geologica con elementi di geotecnica a supporto dell'intervento per il
"MIGLIORAMENTO SISMICO DEL MAGAZZINO PROTEZIONE CIVILE - EX MOSTRA VINI",
situato presso la zona fiera in via Mareno, nel Comune di Santa Lucia di Piave

CIG: Z89343327D

RELAZIONE GEOLOGICA con elementi di geotecnica

(D.M. 17 gennaio 2018)

Committente: **Comune di Santa Lucia di Piave**




Dr. Geol. Matteo Collareda

Costabissara

La legge sui diritti d'autore (22/04/41 n° 633) vieta la riproduzione ed utilizzazione anche parziale di questo documento, senza la preventiva autorizzazione degli autori.

1. PREMESSE

Su incarico del **Comune di Santa Lucia di Piave** è stata redatta la presente relazione geologica con elementi di geotecnica a corredo del progetto per il “MIGLIORAMENTO SISMICO DEL MAGAZZINO PROTEZIONE CIVILE - EX MOSTRA VINI”, in via Mareno nel Comune di Santa Lucia di Piave (TV). Di seguito si mostra l'area oggetto di studio riportata su estratto di ortofoto.



Estratto di ortofoto a colori

Dal punto di vista generale, la presente relazione geologica si propone di valutare le possibili interazioni tra le azioni di progetto e l'ambiente geologico, ed in particolare di:

- verificare la situazione geologica, geomorfologica e idrogeologica generale dell'area;
- analizzare le problematiche geologico-tecniche del sito in esame;
- ricostruire l'assetto stratigrafico del sottosuolo;
- valutare la risposta sismica di sito;
- determinare le caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione;
- riconoscere le proprietà del sistema idrogeologico locale;
- verificare la compatibilità e sostenibilità degli interventi di progetto in relazione alla dinamica delle componenti del territorio di cui ai punti precedenti;
- fornire i parametri tecnici necessari per la corretta scelta e dimensionamento delle opere nonché per una corretta progettazione antisismica come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17 - 01 - 2018*).

A tal fine è stata eseguita una campagna d'indagine sperimentale in sito che ha richiesto l'esecuzione delle seguenti prove:

- **n° 2 Prove Penetrometriche Dinamiche superpesanti (DPSH)**, spinte fino alla profondità massima di 5,2 m dal piano campagna locale, per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica del sottosuolo;

- n°1 registrazione di rumore sismico ambientale a stazione singola H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) per l'individuazione delle frequenze di risonanza del terreno al fine di eseguire una corretta progettazione sismica delle strutture;
- n°1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor - onde di superficie) sviluppata in un array lineare con n°14 geofoni a 4,5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo (onde S) e per l'assegnazione della Categoria del sottosuolo di fondazione (V_s,eq) come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni* - D.M. 17/01/2018);
- n°1 prospezione sismica a rifrazione con inversione tomografica per individuare i maggiori contrasti di rigidità presenti nel sottosuolo, tramite la misura delle onde di volume (onde P).

Considerata la necessità di procedere al previsto aggiornamento delle «Nuove Norme tecniche per le costruzioni» di cui al citato decreto ministeriale 14 gennaio 2008, il 20 febbraio 2018 entra definitivamente in vigore il **Decreto del Ministero delle Infrastrutture 17 gennaio 2018** (supplemento ordinario n. 8 Gazzetta ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018) recante "**Aggiornamento delle nuove norme tecniche per le costruzioni**".

Tale norma rappresenta l'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni D.M 14/01/2008, di cui alla legge 5 novembre 1971, n. 1086, alla legge 2 febbraio 1974, n. 64, al decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380, ed al decreto-legge 28 maggio 2004, n. 136, convertito, con modificazioni, dalla legge 27 luglio 2004, n. 186, allegato al presente decreto. **Le presenti norme sostituiscono quelle approvate con il decreto ministeriale 14 gennaio 2008.**

Rimane invariato il concetto di Stato Limite, ovvero la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata e prevede, per la definizione del grado di sicurezza, un approccio di tipo semiprobabilistico, o di primo livello, adottando i cosiddetti coefficienti parziali di sicurezza (CP). Salvo alcuni casi particolari, il concetto di tensioni ammissibili, previsto nel D.M. 11.03.1988, non è più adottabile. Il presente elaborato è stato svolto in ottemperanza al **D.M. 17 Gennaio 2018 "Norme tecniche per le costruzioni"**.

Dal punto di vista operativo, l'impostazione metodologica adottata per il presente studio è stata articolata come di seguito esposto:

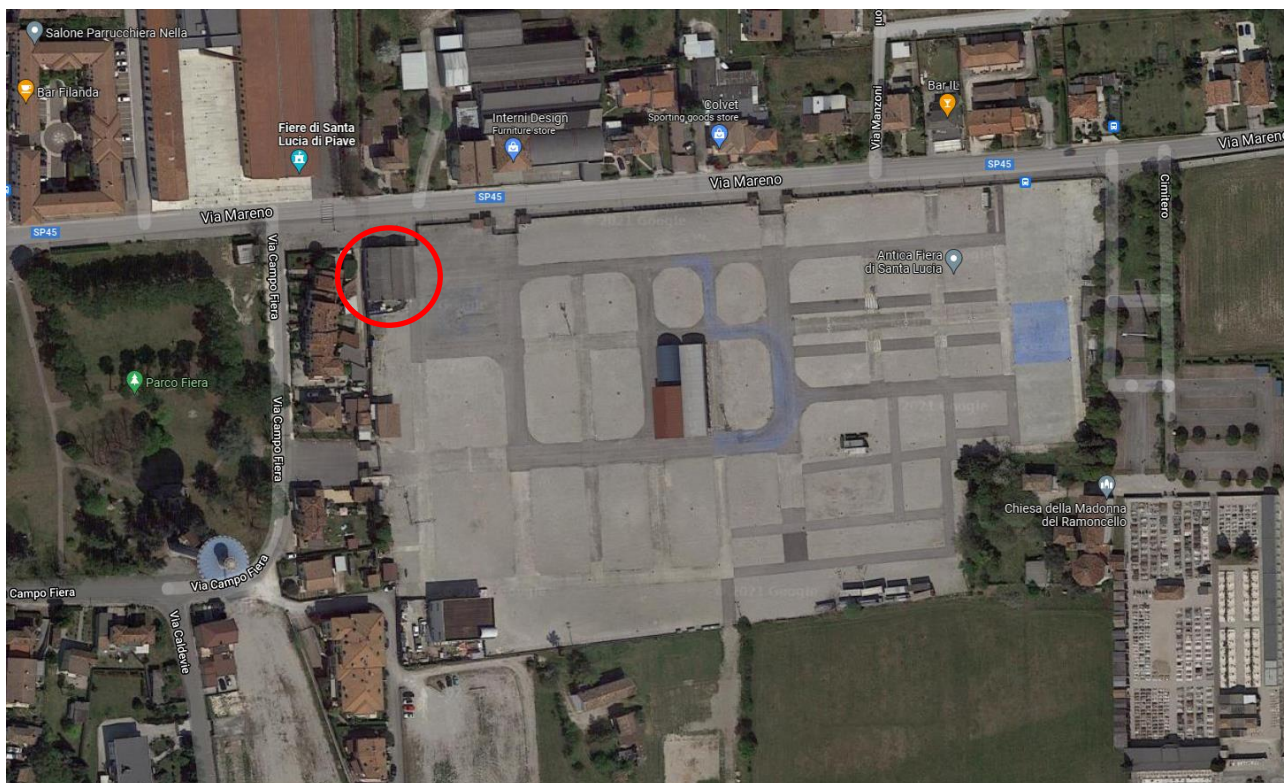
- acquisizione ed esame critico degli elaborati progettuali preliminari;
- rilievo geomorfologico, geologico ed idrogeologico speditivo dell'area;
- campagna d'indagine geognostica in sito;
- elaborazione e interpretazione dei dati sperimentali;
- ricostruzione del modello geologico-tecnico e sismico locale;
- valutazione della capacità portante del terreno.

Le ipotesi e le valutazioni tecniche formulate nel presente elaborato devono essere intese come inquadramento preliminare per il dimensionamento e la valutazione della fattibilità delle opere in progetto. Per la stesura della presente relazione tecnica, oltre a riferimenti d'archivio e bibliografici, sono stati utilizzati i dati sperimentali e le osservazioni derivanti dai rilevamenti e dalle prove in sito eseguite il giorno 8 dicembre 2021.

2. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA

2.1 Ubicazione e caratteri geomorfologici principali

L'area oggetto di studio è localizzata nella porzione centrale del territorio Comunale all'interno dell'area dedicata alla fiera. Il centro storico si colloca a circa 400 m in direzione nord-ovest mentre la quota media dei terreni, in corrispondenza della zona in studio, è di circa 55 m sul livello medio mare. L'area si presenta sostanzialmente pianeggiante e priva di significanti dislivelli altimetrici.



Estratto di Ortofoto con sezione topografica

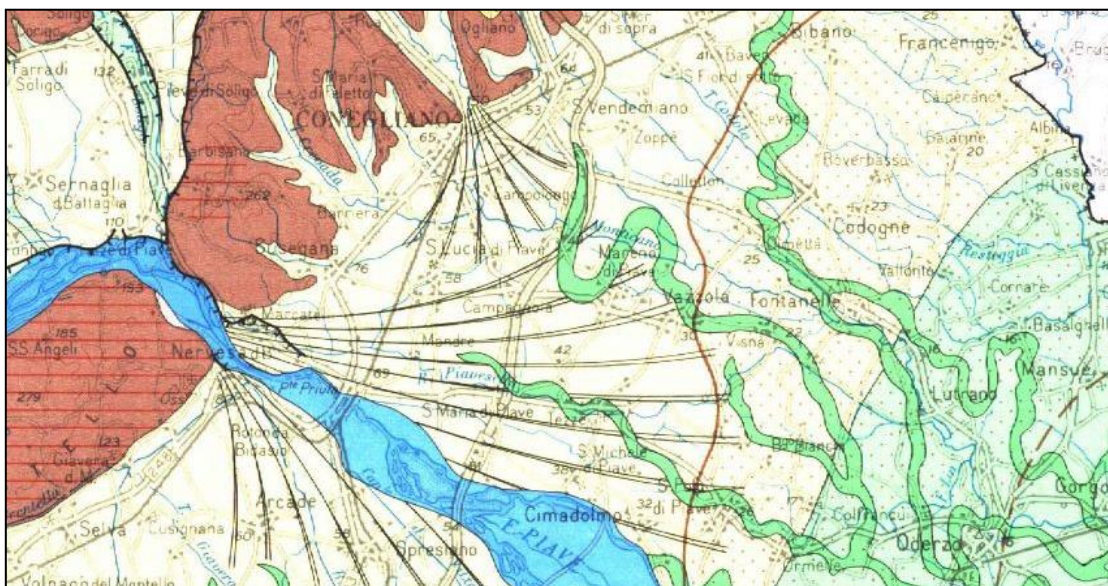
2.2 Inquadramento geologico generale

Per l'inquadramento geologico dell'area si è fatto riferimento alle considerazioni riportate nel P.A.T.I. comunale, ad alcune pubblicazioni consultate e alle osservazioni condotte durante i sopralluoghi effettuati.

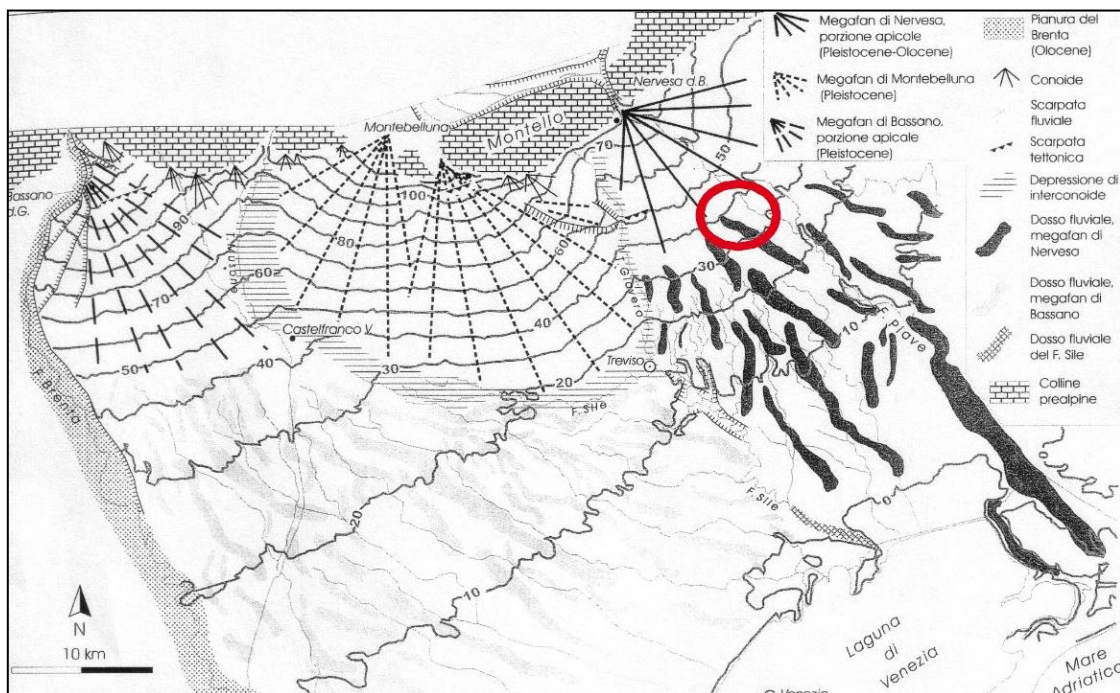
Dal punto di vista **geomorfologico**, il Comune di Santa Lucia di Piave si sviluppa nell'Alta Pianura Trevigiana formata, in età glaciale e postglaciale, dal deposito delle alluvioni grossolane apportate dal Fiume Piave che rappresenta l'attuale elemento idrografico di maggiore importanza assieme al Torrente Crevada che confluisce nel Fiume Monticano in località *Tre Acque*. Entrambi scorrono in direzione Ovest - Est rispettivamente nel settore meridionale e settentrionale del territorio comunale. Al Fiume Piave sono collegate direttamente altre forme morfologiche come i tratti di scarpata di erosione fluviale attiva e, indirettamente, diversi paleoalvei peraltro privi di rilievo morfologico.

Le quote altimetriche variano dai 65 metri sul livello del mare nella porzione più occidentale del territorio, ai 45 metri sul livello del mare nella parte più orientale degradano, quindi, in direzione da Ovest verso Est con una pendenza che si mantiene uniforme intorno al 3 ‰. L'intero territorio si presenta, di fatto, sostanzialmente pianeggiante.

A scala regionale, l'area comunale ricade nell'unità dei "Depositi fluvio-glaciali e alluvionali antichi e recenti" lambito, nella zona meridionale, dai "Depositi mobili dell'alveo attuale del Fiume Piave". Inoltre, si segnala la presenza di due grandi paleo alvei e di due conoidi fluvio-glaciali pedemontane. Nelle figure seguenti è possibile notare come il territorio in oggetto si posiziona all'interno del *megafan* (grande conoide) di Nervesa e come il suo settore centro - orientale sia interessato dalla presenza dei dossi fluviali legati al medesimo *megafan*.



Carta delle Unità Geomorfologiche - Estratto da: Regione del Veneto - Carta delle Unità Geomorfologiche



Fattori genetici della pianura veneta orientale - Estratto da ARPAV "Carta dei suoli del Veneto - anno 2005"

Il sottosuolo del territorio in esame è costituito, come precedentemente accennato, dalle grandi conoidi alluvionali di natura ghiaioso - sabbiosa, depositate nel passato dai corsi d'acqua che sboccavano dalle vallate prealpine.

Durante la loro formazione, le conoidi si sono più volte incrociate, sovrapposte ed anastomizzate, a causa del mutare frequente dei regimi idrici del corso delle acque. La maggior parte dei depositi presenti nel territorio, costituiti prevalentemente da ghiaie e ciottoli più o meno sabbiosi, sono stati depositati dal Fiume Piave in età glaciale e postglaciale.

In particolare, la formazione del territorio è legata a quanto verificatosi nell'ultima glaciazione e nei tempi successivi: nel corso dell'espansione e della fase di massima intensità dell'ultima glaciazione (anaglaciale

Würmiano) una spessa coltre di detriti grossolani venne distribuita a ventaglio sulla pianura, formando una grande conoide con vertici a Caerano, Biadene, Nervesa ed altri minori.

Questi vertici erano legati alle varie fronti del ghiacciaio plavense, le quali determinavano grandi correnti fluvioglaciali che trasportavano verso sud i materiali morenici raccolti. Dopo aver conseguito la massima espansione ed aver sostato lungamente sulle posizioni raggiunte, il ghiacciaio cominciò a ritirarsi (cataglaciaie) e le varie correnti pian piano si ridussero. Mantenne una notevole importanza quella in uscita da Nervesa che determinò la formazione di una seconda conoide interconnessa ed in parte sovrapposta alla prima, con vertice a Nervesa e con limite occidentale in corrispondenza del Torrente Giavera e limite orientale in corrispondenza del Fiume Monticano.

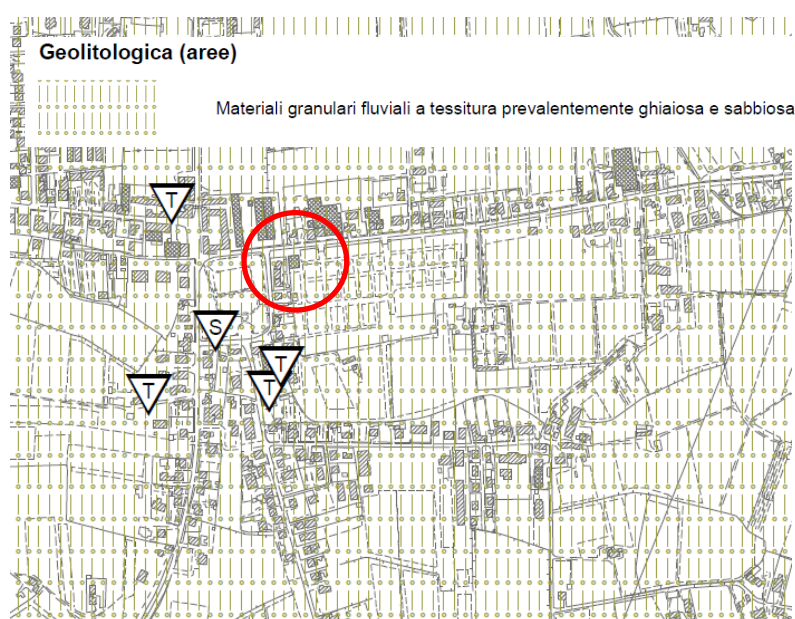
Su quest'ultima conoide in tempi postglaciali (10.000 anni fa circa - oggi) il Fiume Piave ha divagato, incidendo e ridepositando sulle vecchie alluvioni. Le singole correnti più veloci hanno lasciato lunghe strisce ghiaiose che ancora oggi si osservano. Alla fine della glaciazione e nel postglaciale, acquisirono importanza i processi deposizionali legati al giungere periodico delle acque di esondazione.

Qui la tranquilla espansione ed il sostare delle acque di piena favorì il deposito di spessori, anche rilevanti, di materiali a granulometria fine: sabbie, limi ed argille. Il tutto terminò con l'intervento dell'uomo che, arginando il Piave (a partire dal 1.200), pose fine all'accumulo di nuove alluvioni sull'Alta Pianura.

Come indicato nel P.A.T.I. del comune di Santa Lucia di Piave, il territorio viene suddiviso, dal punto di vista **litologico**, in tre fasce longitudinali grossomodo parallele:

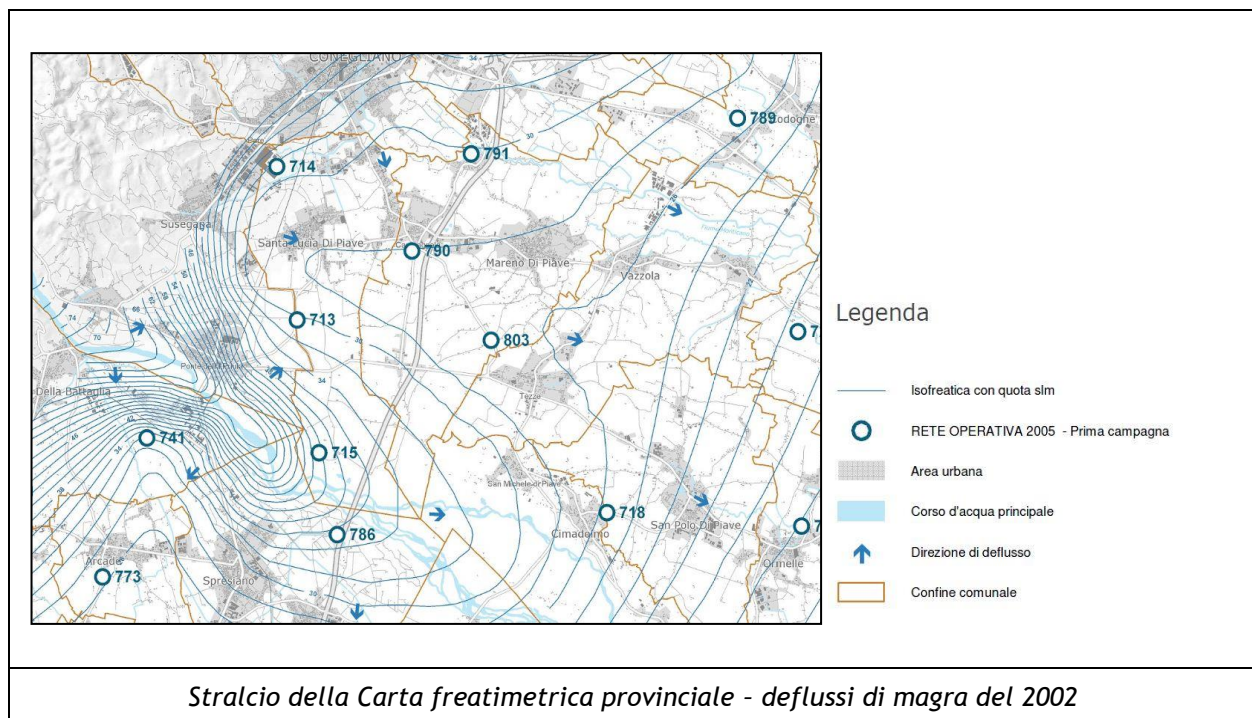
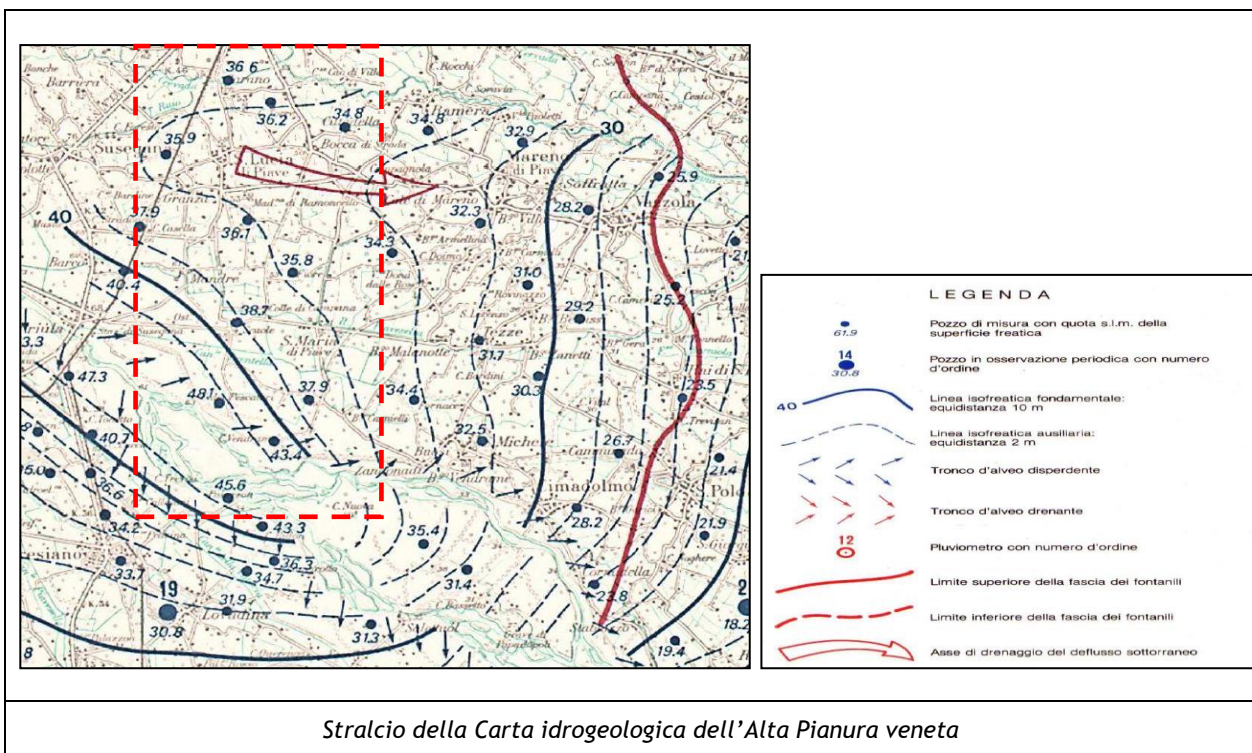
- la fascia settentrionale, interessata dal corso del Torrente Crevada e dal fiume Monticano, corrisponde alla zona di deposizione di materiali fini sedimentatisi nella depressione di interconoide. In questa fascia il primo sottosuolo risulta interessato essenzialmente dalla presenza di limi e argille (**L-ALL-05**);
- la fascia centrale occupa circa i tre quarti dell'estensione complessiva del territorio. Essa è definita dalla presenza, nel sottosuolo, di materiali granulari fluviali antichi a tessitura prevalentemente ghiaiosa e sabbiosa, legati alla presenza del *megafan* di Nervesa. Ai margini meridionali di questa fascia aumenta la presenza di materiale più fine (sabbie e sabbie - limose) che, seppure legato al medesimo *megafan*, segna il passaggio verso la bassa pianura (**L-ALL-01**);
- la fascia più meridionale è associata all'alveo attuale e recente del Fiume Piave, influenzato dalla mobilità del letto del fiume e dalle esondazioni recenti. Essa è costituita da materiali sciolti a varia granulometria (**L-ALL-04**).

In particolare, la zona in studio ricade in **L-ALL-01**, come evidenziato nell'immagine seguente:



Carta Litologica del PATI

Dal punto di vista **idrogeologico**, risulta importante sottolineare che l'intero territorio comunale si posiziona all'interno della zona di Alta Pianura, compresa tra il piede dei rilievi montuosi ed il limite superiore della fascia delle risorgive che grossomodo coincide con l'inizio della zona nel cui sottosuolo sono presenti importanti falde acquifere in pressione. Il materasso ghiaioso dell'Alta Pianura contiene il cosiddetto acquifero freatico indifferenziato che alimenta e regola, dal punto di vista idraulico, tutto il sistema multifalदे in pressione presente più a Sud. L'alimentazione della falda è legata essenzialmente alle dispersioni dal Piave; elementi secondari sono gli apporti meteorici, l'irrigazione a scorrimento e le perdite dai canali di irrigazione non impermeabilizzati. Le oscillazioni della falda risultano importanti e dell'ordine di diversi metri mentre le principali direzioni di deflusso della falda freatica, le quota indicative del livello di falda ed il suo gradiente, sono illustrati nella figura seguente che riporta uno stralcio della carta del Dr. Dal Prà riferita a misure eseguite nel novembre 1975. Una più recente definizione dell'assetto idrogeologico del territorio deriva dalla "Carta freatimetrica provinciale" relativa a rilievi eseguiti nel 2002.



L'andamento delle isofreatiche permette di riconoscere, oltre alla direzione preferenziale di scorrimento, i principali assi di alimentazione e drenaggio del flusso sotterraneo. La direzione di deflusso rileva una marcata variazione sia di direzione che di gradiente a causa dell'influsso esercitato dal complesso e irregolare assetto strutturale (presenza di conoidi e paleoalvei) e dai processi di dispersione in falda del Fiume Piave. Infatti, se a livello provinciale la direzione di deflusso si sviluppa da Nord - Ovest verso Sud - Est, nell'area in oggetto le linee di deflusso freatico vengono deformate fino al limite superiore della fascia delle risorgive e in vicinanza del Fiume Piave.

Secondo la Carta Idrogeologica del PATI, l'area in esame presenta una profondità della falda di circa 25-30 m dal p.c. locale

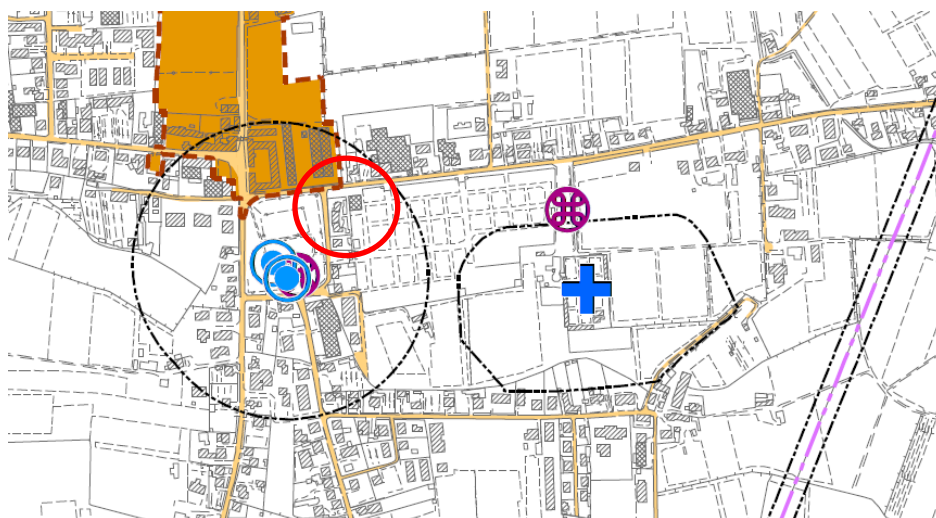


Carta Idrogeologica del PATI

2.3 Analisi dei Vincoli

Carta dei Vincoli

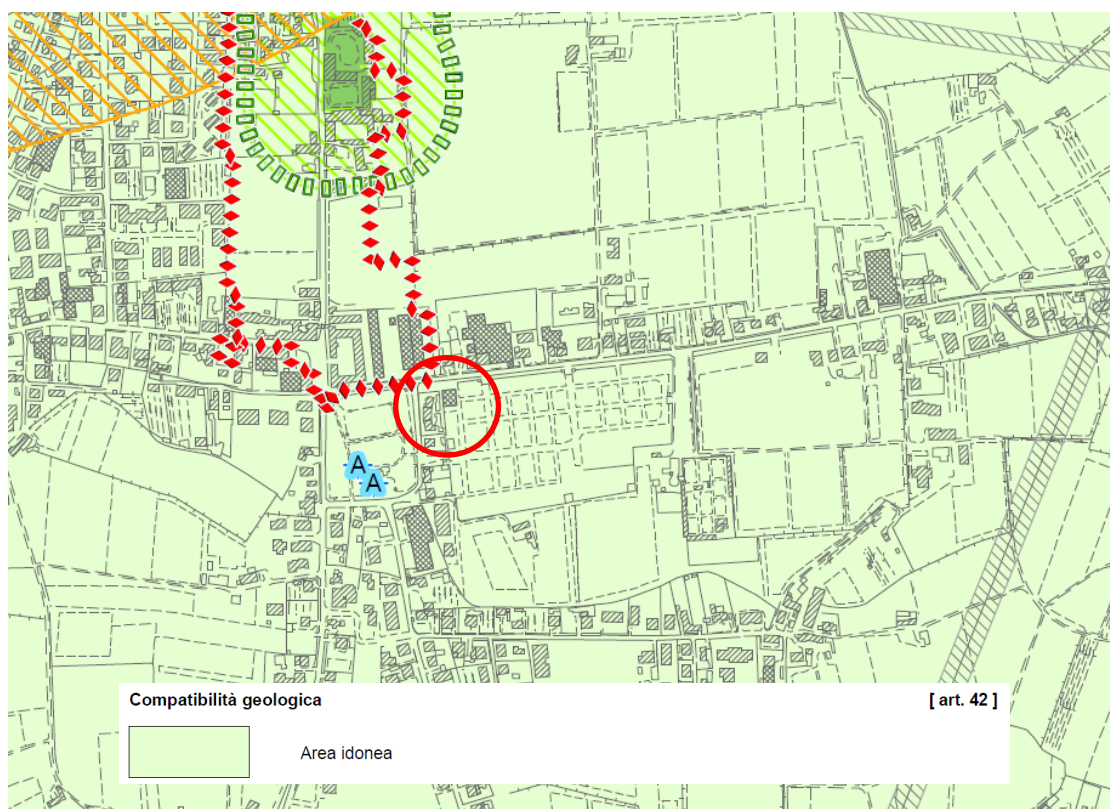
Secondo quanto indicato nella Carta dei Vincoli vigente nel Comune di Santa Lucia di Piave e riportata in estratto a seguire, il sito oggetto presenta il vincolo da fascia di rispetto per pozzo idropotabile, normato dall'articolo 33 delle N.T.A.



Pozzi di prelievo per uso idropotabile, idrotermale e idroproduttivo / Fasce di rispetto [art. 33]

Carta delle Fragilità

L'area oggetto di studio è definita come **Area idonea** (normata all'Art. 242 delle N.T.A.).



3. PROVE IN SITO

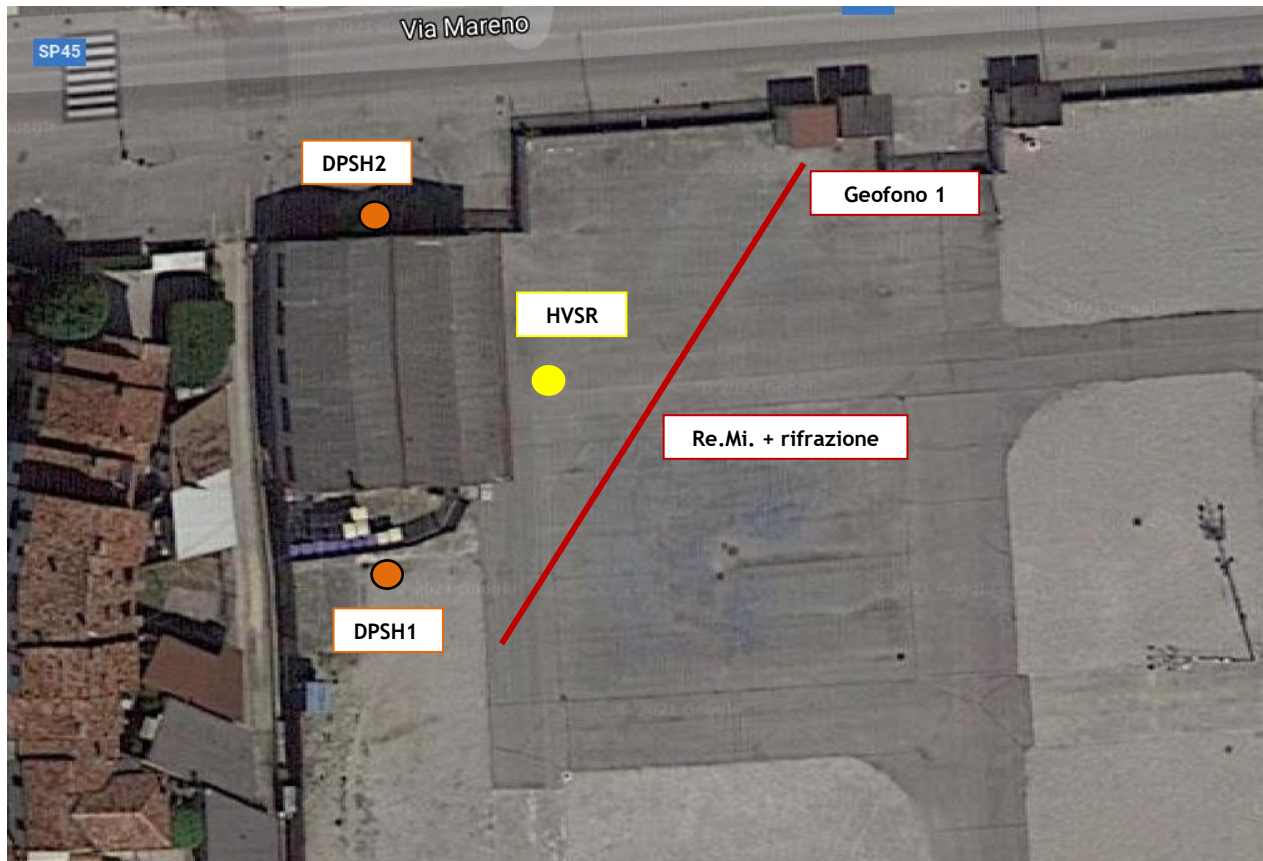
3.1 Premesse

Al fine di ottenere la caratterizzazione del sottosuolo interessato dai futuri interventi sono state eseguite indagini geognostiche e geofisiche in sito. Vista la situazione geologica e morfologica locale evidenziata dal rilievo preliminare di campagna e considerata la tipologia dell'intervento in oggetto, le prove sperimentali sono state condotte principalmente per riconoscere la natura dei terreni di fondazione e rilevare le caratteristiche geotecniche, idrogeologiche e sismiche degli stessi.

Più precisamente presso il sito in studio sono state effettuate le seguenti indagini sperimentali:

- **n° 2 Prove Penetrometriche Dinamiche superpesanti (DPSH)**, spinte fino alla profondità massima di 5,2 m dal piano campagna locale, per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica del sottosuolo;
- **n°1 registrazione di rumore sismico ambientale a stazione singola H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)** per l'individuazione delle frequenze di risonanza del terreno al fine di eseguire una corretta progettazione sismica delle strutture;
- **n°1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor - onde di superficie)** sviluppata in un *array* lineare con n° 16 geofoni a 4,5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo (onde S) e per l'assegnazione della Categoria del sottosuolo di fondazione (V_s,eq) come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17/01/2018*);
- **n°1 prospezione sismica a rifrazione con inversione tomografica** per individuare i maggiori contrasti di rigidità presenti nel sottosuolo, tramite la misura delle onde di volume (onde P).

Le prove di campagna sono state ubicate all'interno dell'area oggetto del futuro intervento, tenendo in considerazione le condizioni logistiche e di accessibilità del sito. Le ubicazioni sono riportate nella figura sottostante, mentre a seguire si riportano le foto di ciascuna prova eseguita.



Ubicazione prove in sito



Indagine Penetrometrica - DPSH1



Indagine Penetrometrica - DPSH2



Sismica Re.Mi. + Rifrazione



Sismica HVSR

3.2 Descrizione della strumentazione utilizzata

Strumentazione penetrometrica - DPSH (Penetrometro Dinamico Super Pesante)

Il test penetrometrico dinamico consiste nell'infiggere verticalmente nel terreno una punta conica metallica, tramite la battitura da altezza prefissata di un maglio di peso standard; durante la percussione vengono misurati i colpi necessari alla penetrazione della punta per una lunghezza prefissata. Per quanto riguarda le prove penetrometriche dinamiche è stato usato una sonda del tipo "Penetrometro Superpesante" (DPSH) collocato su cingolati, che ha il maglio di massa 63,5 kg e viene misurato il numero di colpi necessario all'infissione ogni 20 cm. La strumentazione utilizzata è ampiamente standardizzata ed i risultati sono facilmente correlabili alla prova SPT (*Standard Penetration Test*), eseguita in foro di sondaggio e similare per modalità, da cui è possibile ricavare i parametri geotecnici necessari a caratterizzare i terreni di natura prevalentemente granulare e subordinatamente coesivi. Anche in questo caso, come per tutta l'attrezzatura geognostica utilizzata dagli scriventi, le specifiche tecniche delle strumentazioni e le modalità esecutive sono codificate da precise norme internazionali, unitamente alle modalità di interpretazione dei dati quantitativi (rif: *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - AGI 1977*).

Attraverso l'energia specifica per colpo, nelle prove DPSH è possibile inoltre calcolare la *Resistenza Dinamica* alla penetrazione di punta (R_{pd} in kg/cm^2), che è funzione del numero di colpi N ; a tal scopo si utilizza la correlazione nota come "*Formula degli Olandesi*".

Indagine sismica di tipo passivo (H.V.S.R.)

La tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio V_s** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la $V_{s,eq}$ e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni del 17 gennaio 2018*;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

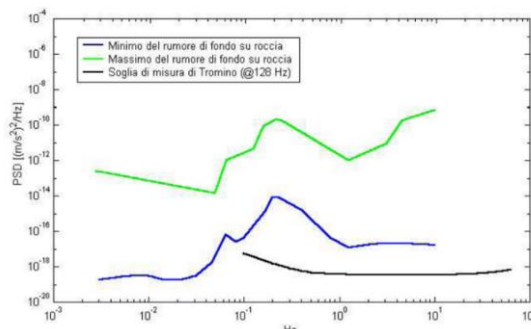
Le basi teoriche della tecnica H.V.S.R. si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
3. dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, H.V.S.R. che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica. Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Moho S.p.a. modello "Tromino ENG Y - PLUS" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra-leggeri e ultra-compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno due terne velocimetriche con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella figura seguente si riporta la curva di rumore di "Tromino" a confronto con i modelli standard di Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto. Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (H.V.S.R.) basati sulla simulazione del campo d'onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli secondo la teoria descritta in AKI (1964) e Ben-Menahem e Singh (1981). Operativamente si costruisce un modello teorico H.V.S.R. avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita. Successivamente, tramite uno specifico algoritmo, si cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale; in questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde V_s . Per eseguire la procedura sopra descritta in maniera univoca è necessario conoscere la profondità di un riflettore acustico individuabile nello spettro sismico registrato.



Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità. Questo comportamento viene definito **dispersione in frequenza** ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico - matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come metodo passivo in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi promossi da questo metodo sono molteplici: è molto veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma soprattutto permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati.

La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da prendere in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale - rumore. Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, nel caso Re.Mi. rappresenta la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è, in questo caso, la necessità di soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione sarà analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi.

Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx . Quest'ultima agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza. Supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa. Se la frequenza è più bassa aumenta la profondità d'indagine.

La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r) che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$).

Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x - t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo, attraverso lo spettro, di localizzare la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale. La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz in modo da ottenere un elevato dettaglio del segnale. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è [Grilla v.9.7 release 2021](#).

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n°14 geofoni verticali a 4.5 Hz uniti in un *array* lineare totalmente digitale (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB e di un tripode per le misure su pavimentazione. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. La spaziatura utilizzata tra i geofoni è stata di 3 m quindi la lunghezza complessiva del profilo è risultata essere di 39 m. Non sono presenti sostanziali variazioni di quota e quindi il sito può essere considerato orizzontale.

Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde V_s è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [2.1]$$

V_s = valore di velocità delle onde di taglio [m/s];

H = profondità alla quale si desidera stimare V_s [m] (30 m in caso di V_{s30});

h_i = spessore dello strato i - esimo [m];

v_i = velocità delle onde V_s all'interno dello strato i - esimo [m/s].



In via puramente indicativa, al fine di correlare le velocità delle onde di taglio ad un tipo di suolo, si riportano i valori tabulati da Borchardt (1992; 1994) assieme a quelli ottenuti sperimentalmente in diversi ambienti sedimentari da altri autori (Budny, 1984; Ibs von Seht e Wohlenberg, 1999; Delgado et al., 2000 a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

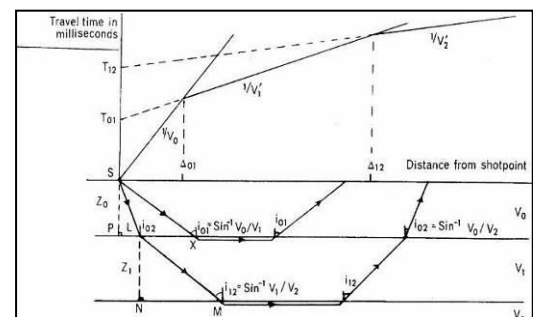
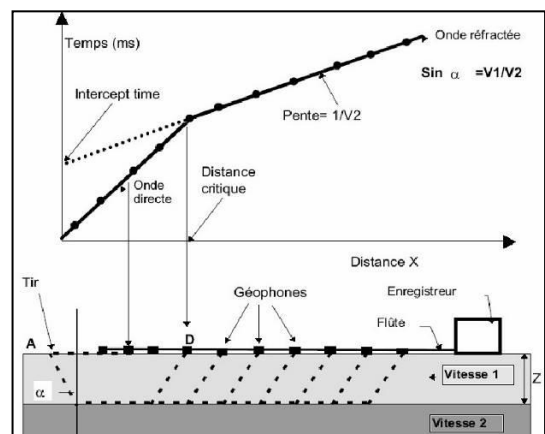
TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate)	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sottofalda, argille da tenere a molto tenere)	100	150	200

Indagine sismica a rifrazione con inversione tomografica

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura del tempo richiesto perché una perturbazione di origine elastica si trasmetta dalla sorgente ai geofoni percorrendo gli strati superficiali, a bassa velocità, e la superficie di separazione di due mezzi elastici differenti, a velocità più levata.

La prospezione sismica a rifrazione è particolarmente indicata per ottenere rapide informazioni strutturali nel caso di strutture a grandi dimensioni, che siano costituite almeno da uno strato rifrangente ad alta velocità, giacente sotto una serie stratigrafica avente velocità più bassa. Se in un sistema di assi cartesiani si riportano i tempi di arrivo delle onde sismiche in funzione della loro distanza dal punto di scoppio, si ottiene una famiglia di curve “tempi - distanze” che dipendono dalle caratteristiche geologiche locali. Tali curve sono dette “dromocrone”. Nella figura riportata a fianco, sono rappresentate le dromocrone riguardanti le onde dirette, riflesse e rifratte, più la dromocrona degli impulsi diretti nell’areato. Nel punto angolare D corrispondente al geofono G0, arriveranno contemporaneamente le onde dirette e le onde rifratte. Per i geofoni posti ad una distanza minore di G0, il primo arrivo sarà rappresentato da un’onda diretta. Da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una distanza corrispondente a G0. Oltre il punto angolare D i primi arrivi sono sempre rappresentati dalle onde rifratte.

Si possono costruire dromocrone anche nel caso di “n” strati, purché le velocità aumentino sempre con la profondità; ogni punto angolare indicherà il passaggio da uno strato al successivo, e le velocità saranno indicate dalla pendenza dei rispettivi rami di dromocrone. Se gli strati sono



poco potenti (come di solito avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva (figura seguente). I principali limiti della sismica a rifrazione risiedono nell'impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l'energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta, tale situazione è nota come "orizzonte muto". Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile.

La stesa sismica è stata eseguita utilizzando le onde di compressione P (Vp) con le caratteristiche riportate in tabella:

Misura	N° geofoni	Interdistanza dei geofoni [m]	Lunghezza [m]	N° shot
RIF	14	3 m	39 m	5

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo a 16 + n canali modello "SoilSpy Rosina" con registrazione degli eventi in forma digitale. I sensori sono costituiti da una catena di 26 geofoni a componente verticale con frequenza propria di vibrazione di 4,5 Hz. L'energizzazione delle onde di compressione P è avvenuta utilizzando una mazza da 5 Kg.

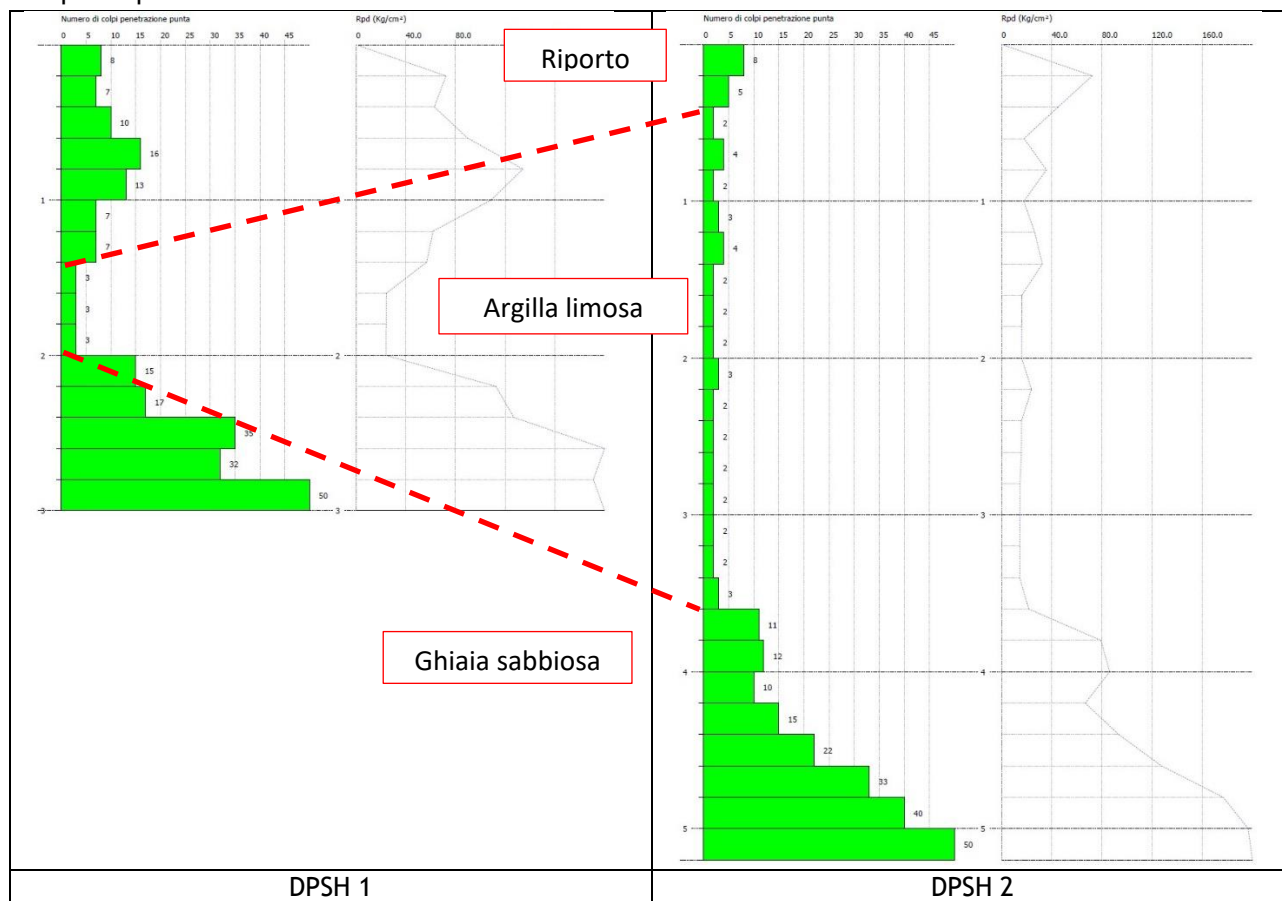
Sono stati effettuati n° 5 *shot* in modo da ottenere una quantità di dati sufficienti per ottenere dei modelli sismici del sottosuolo attendibili. Per l'interpretazione dei dati si è utilizzato un programma di elaborazione della sismica di superficie con la tecnica tomografica.

La tomografia sismica è una tecnica dettagliata di esplorazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo (in questo caso si tratta di terreno); questo si basa sul primo arrivo delle perturbazioni sismiche, cioè del tempo necessario per compiere distanze prestabilite fra sorgente e ricevitore. La prospezione sismica con elaborazione tomografica, con il suo estremo dettaglio, permette di mettere in risalto fenomeni di anisotropia anche in presenza di un orizzonte apparentemente omogeneo.

Per l'elaborazione si è utilizzato il Software Rayfract, prodotto dalla Intelligent Resource inc., che effettua l'inversione di dati sismici attraverso due fasi distinte. Nella prima fase l'inversione avviene con il metodo Delta T-V (Gebrande and Miller 1985), che si basa sulla ricostruzione di velocità per ogni CMP (common midpoint). Questo metodo permette di ottenere un modello del campo di velocità indagato immettendo solo dati geometrici, topografici e primi arrivi. Il software permette quindi di effettuare un controllo sul modello proveniente dall'inversione tramite l'algoritmo di "forward modelling", che permette di ricostruire le dromocrone relative al nuovo modello consentendo, ad esempio, di evidenziare zone con scadente modellizzazione, errori di picking, ecc. La fase successiva consiste nel perfezionamento del modello ottenuto tramite il Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing (Schuster 1993 - Geophysics - September 1993 - Volume 58, Issue 9, pp. 1341 - 1323; Watanabe - SEG meeting 1999), che rappresenta una vera e propria inversione tomografica tramite il tracciato di raggi e la ricostruzione del fronte d'onda generato tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell'equazione Eikonal. Tale inversione non presenta le limitazioni evidenziate nel metodo Delta T-V, e permette di ottenere un modello di velocità altamente affidabile.

4. MODELLO GEOLOGICO LOCALE

La stratigrafia del terreno di fondazione del lotto in esame è stata ottenuta in maniera indiretta attraverso l'interpretazione delle prove penetrometriche eseguite, nonché dalle informazioni bibliografiche esistenti. Dalle prove eseguite si evidenzia, fino alla massima profondità indagata, un **sottosuolo moderatamente omogeneo** anche se sono state riscontrate delle differenze relativamente al materiale fine argilloso limoso posto a copertura del materiale ghiaioso. Si mettono a confronto i diagrammi stratigrafici registrati dalle due prove penetrometriche condotte:



Il modello geologico locale è di seguito schematizzato:

Modello geologico locale

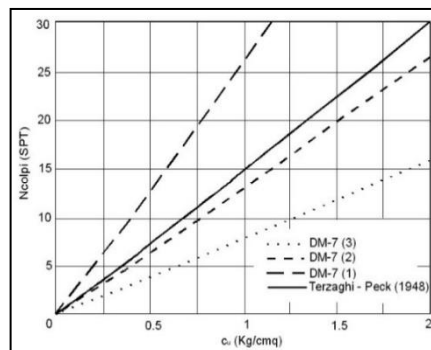
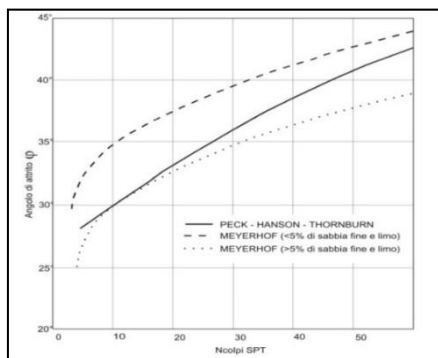
Falda: non presente

Unità Litotecnica	Profondità [m da p.c.]	Litologia correlata
A	da 0,0 m a 0,2-1,2 m	Materiale di riporto
B	da 0,2-1,2 m a 2,0-3,6 m	Argilla limosa
C	da 2,0-3,6 m a ... (5,2 m max. profondità raggiunta dalla DPSH2)	Ghiaia sabbiosa

Si segnala che, in corrispondenza delle prove eseguite non è stata rinvenuta **presenza di acqua** all'interno del foro di sondaggio.

5. MODELLO GEOTECNICO LOCALE

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione sono stati utilizzati i risultati delle prove penetrometriche DPSH realizzate. Relativamente ai terreni caratterizzati da natura prevalentemente granulare e coesiva, per la determinazione dell'angolo di attrito Φ e C_u dalle prove penetrometriche, sono stati utilizzati metodi riconducibili a vari autori, come indicato nelle figure sottostanti.



Si precisa che i valori dei parametri geotecnici riportati nelle tabelle sottostanti rappresentano una media ponderata di quanto desunto dalle prove in sito e possono essere considerati rappresentativi degli orizzonti stratigrafici individuati nella loro globalità, anche in considerazione della naturale disomogeneità del sottosuolo. Il valore di progetto X_d (C_{ud} e Φ_d nei vari stati limite) sarà quello da utilizzare nelle verifiche di portanza dei terreni e sarà ricavato a partire da un valore caratteristico X_k al quale verrà applicato un fattore riduttivo γ_M (F_s parziale) tabellato nelle Norme Tecniche.

Il modello geologico tecnico locale è di seguito descritto:

Modello geotecnico locale

Falda: non presente

Unità Litotecnica	Profondità [m da p.c.]	Litologia correlata	C_u (k) [kN/m ²]	Φ (k) [°]	γ_{NAT} (k) [kN/m ³]
A	da 0,0 m a 0,2-1,2 m	Materiale di riporto	-	-	-
B	da 0,2-1,2 m a 2,0-3,6 m	Argilla limosa	25-30		18
C	da 2,0-3,6 m a ... (5,2 m max. profondità raggiunta dalla DPSH2)	Ghiaia sabbiosa		≈ 35	20

Le prove DPSH hanno restituito un modello geotecnico definito da terreni granulari di riporto superficiali (spessore indicativo di 0,2-1,2 m) seguiti da terreni coesivi argilloso-limosi dalla **proprietà geotecniche scadenti** ($C_u \approx 25-30$ kN/m²). Lo spessore dei materiali coesivi varia da 0,60 cm, in corrispondenza della prova DPSH n.1, a 2,60 m nella misura DPSH n.2. Ad una profondità variabile tra 2,0 m e 3,6 m dal p.c. locale si riscontra la presenza di un terreno ghiaioso sabbioso dalle ottime proprietà geotecniche ($\Phi \approx 35^\circ$).

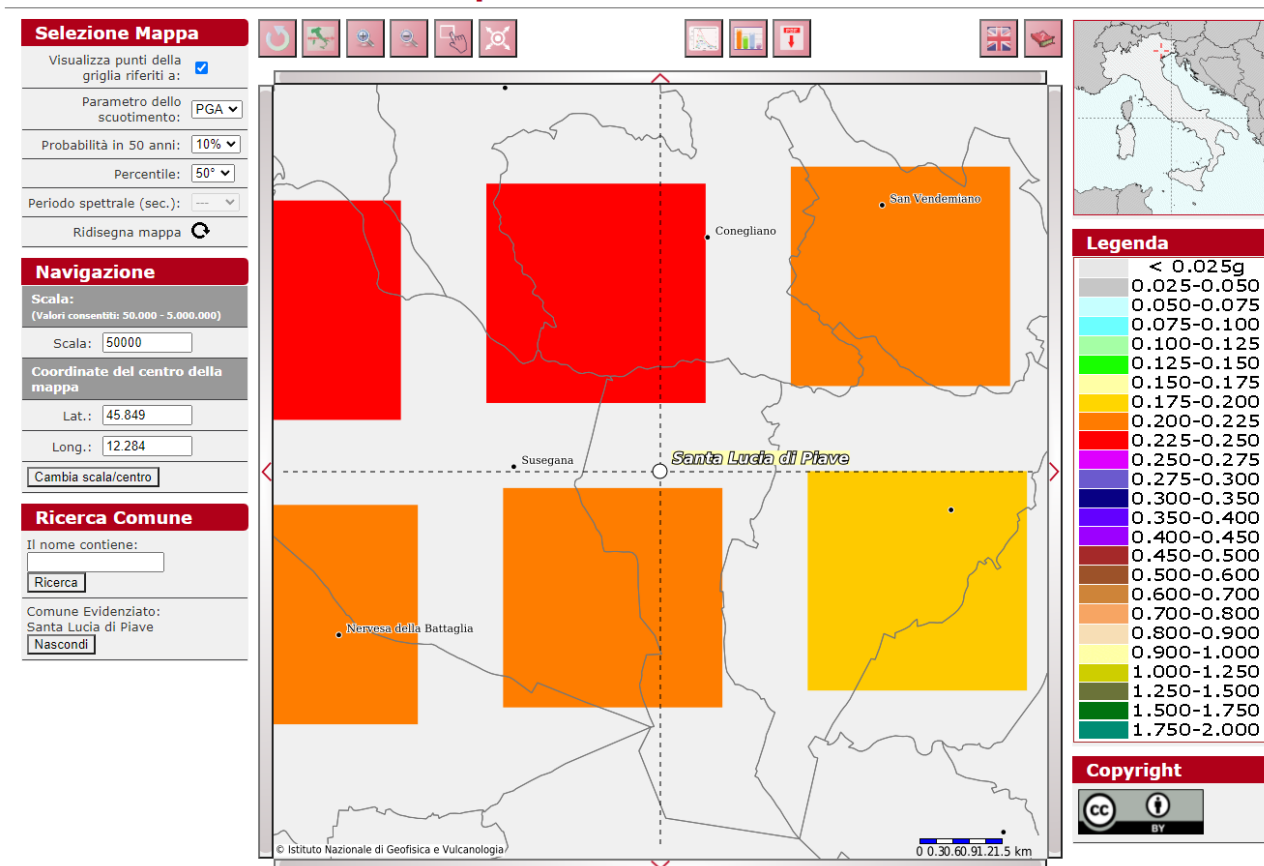
Dai tabulati delle prove penetrometriche allegati fuori testo, è possibile ricavare i parametri di resistenza puntuali, esattamente in corrispondenza delle verticali indagate. Da ciò consegue che l'assunzione di valori di resistenza differenti, minori o maggiori, da utilizzare nei calcoli geotecnici sarà subordinata alle ipotesi progettuali specifiche.

6. CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA

Secondo l'O.P.C.M. 3519 del 28 Aprile 2006, la cui applicazione è stata definita dalla Regione Veneto con D.G.R.V. n° 71 del 22 Gennaio 2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 17 Gennaio 2018, l'area in esame è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra **0,200g e 0,250g**.



Modello di pericolosità sismica MPS04-S1



Per quanto riguarda la pericolosità di base del sito di intervento, in riferimento ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ($T_r = 475$ anni), il calcolo eseguito con il programma "Spettri di risposta - ver. 1.0.3" del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici mediante interpolazione per superficie rigata (cfr. figura seguente), individua la pericolosità sismica del sito di intervento con un valore di a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s pari a **0,214**.

I valori di accelerazione a_g ed i parametri sismici da utilizzare nei calcoli dovranno essere successivamente stabiliti sulla base della "Strategia di Progettazione" che sarà adottata dal Sig. Progettista, una volta assegnate alle opere in esame la Vita nominale, la Classe d'uso ed il Periodo di riferimento (cfr. D.M. 17 Gennaio 2018).

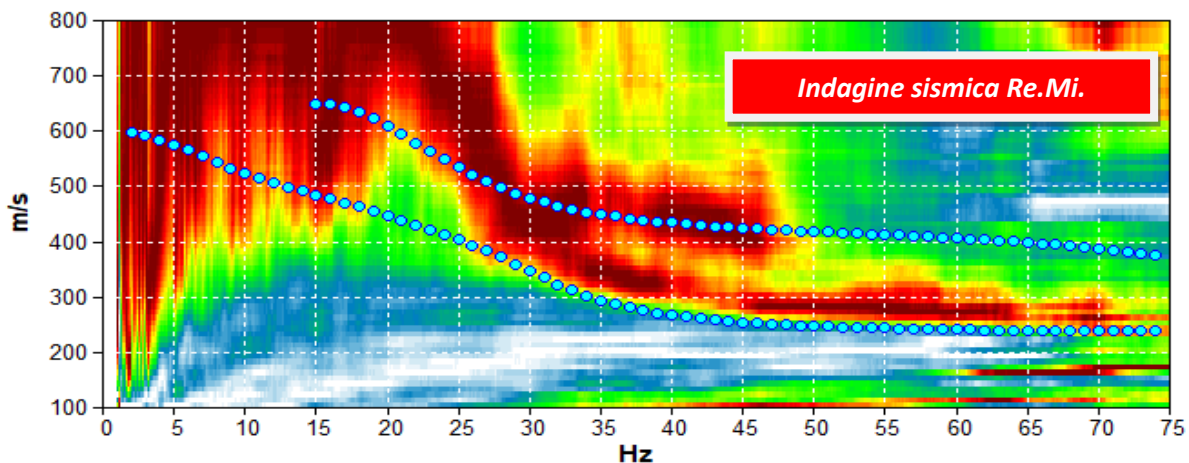
Categoria topografica e coefficiente di amplificazione topografica ST

L'area in esame è modellizzabile nella **Categoria T1** (superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ - cfr. Tabella 3.2. IV del par. 3.2.2 delle NTC); il coefficiente di amplificazione topografica ST si può quindi assumere pari ad 1 come indicato nella Tabella 3.2.VI del paragrafo 3.2.3.2.1 delle NTC.

Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate

Indagine sismica passiva in array (Re.Mi.) con inversione congiunta

L'attendibilità del modello sismo-stratigrafico desunto è da considerarsi elevata poiché la coerenza del segnale è buona e lo spettro di velocità è ben definito nel modo fondamentale per quasi tutte le frequenze campionate. Il programma di elaborazione utilizzato permette di considerare non solo il modo fondamentale ma, una volta individuati, anche i modi superiori per vincolare con maggior attendibilità la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo.

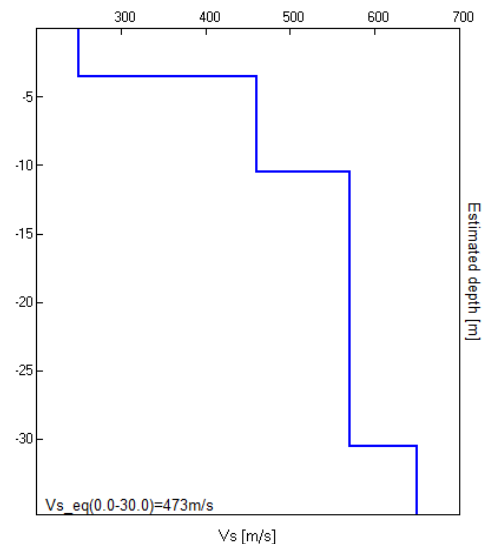


Spettro di velocità: il modo fondamentale è presente in quasi tutte le frequenze campionate. Compaiono i modi superiori alle basse frequenze. Il segnale si presenta con una buona coerenza. In blu le curve sintetiche create da una modellizzazione diretta delle onde S.

La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale poco addensato fino a circa 3,5 m dal p.c. locale caratterizzato da una Vs di circa 250 m/s mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato con Vs di circa 460 m/s.

A 10 m e a 30 m dal p.c. locale si registra un aumento di rigidità del sottosuolo, rispettivamente, a circa 570 m/s e 650 m/s.

Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (modello sismo - stratigrafico interpretativo):



Indagine sismica Re.Mi.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	250	3,5	0,0 - 3,5
II SISMOSTRATO	460	7	3,5 - ≈10
III SISMOSTRATO	570	20	≈10 - ≈30
IV SISMOSTRATO	650	Semisp.	≈30 - Semisp.

Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)

Nel caso specifico del sito in esame si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta HVSR, con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

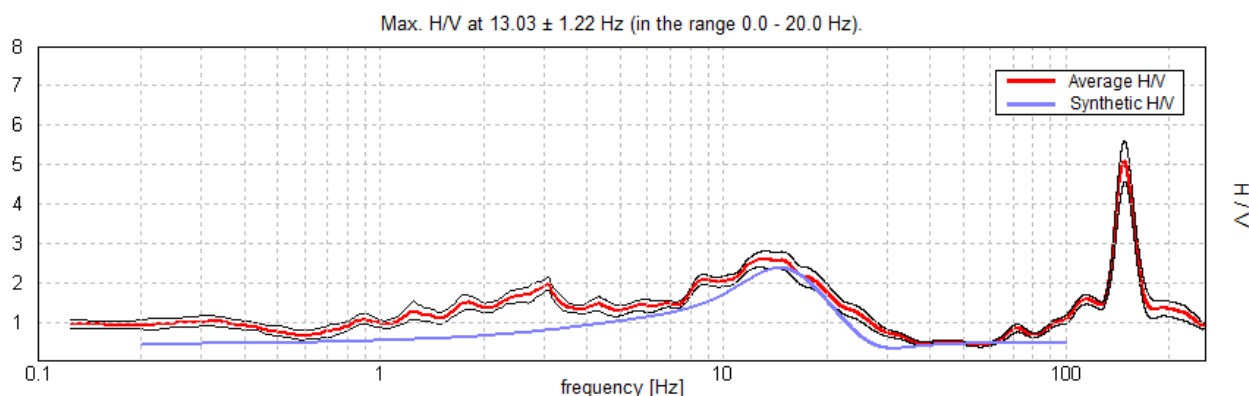
La frequenza fondamentale di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ($H/V \approx 2,5$) nell'intervallo di interesse ingegneristico-strutturale (0,0 - 20,0 Hz), è di circa 13 Hz.

Frequenza fondamentale di risonanza

13,03 $\pm$ 1,22 Hz

È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione naturale del terreno poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.



Rapporto spettrale H/V misurato. In rosso è indicato l'HV medio mentre in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Nella tabella seguente, s'illustra la qualità del segnale acquisito in base al progetto [SESAME](#) (Linee guida 2005). Per l'affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri mentre per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi. Si osserva quindi che il picco a 13,03 Hz soddisfa tutti i criteri e può pertanto essere assunto come frequenza fondamentale di risonanza del sito.

Picco H/V a 13.03 $\pm$ 1.22 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz)

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	13.03 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	2190.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 110	OK	

Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.257 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.875 Hz	OK	
$A_0 > 2$	4.58 > 2	OK	
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0297 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$1.07151 < 0.11406$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.201 < 1.58$	OK	

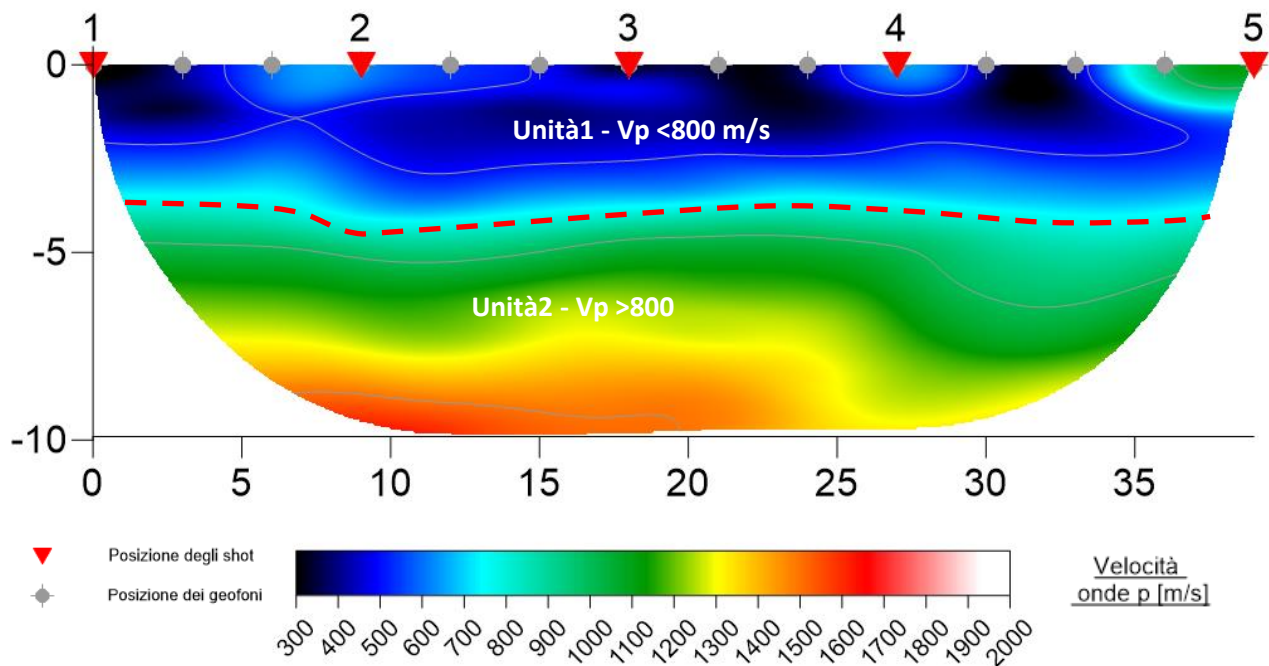
Indagine sismica a rifrazione con inversione tomografica

L'obiettivo primario delle indagini sismiche è la ricostruzione sismo - stratigrafica di sito mediante la stima del gradiente geo-sismico.

Nell'immagine seguente viene riportata la sezione ottenuta dall'indagine sismica a rifrazione con inversione tomografica eseguita e precedentemente illustrata. L'andamento del sottosuolo viene rappresentato attraverso una scala cromatica di colori che parte dal blu ed incrementa verso il rosso.

Lo spessore delle unità geosismiche può essere stimato attraverso la scala metrica posta sulle ordinate del grafico. I dati sismici sono stati acquisiti nelle aree in prossimità dei punti critici di progetto in funzione della morfologia del terreno e degli spazi disponibili.

Tomografia sismica: RIF



L'indagine sismica RIF ha restituito un errore di inversione < 3% ed ha raggiunto la profondità massima di investigazione di circa 10 m in prossimità del centro della stesa. La sezione ottenuta dall'inversione tomografica mostra un modello geo-sismico del sottosuolo peculiare, all'interno del quale si individuano due unità geo-sismiche. La prima unità è caratterizzata da V_p comprese tra 300 m/s e 800 m/s che potrebbero essere correlabili con il materiale coesivo arilloso-limoso. A partire da circa 4 m di profondità da p.c. locale, si assiste ad un brusco aumento del gradiente geo-sismico, che coincide con il passaggio alla seconda unità geo-sismica più profonda e caratterizzata da $V_p > 800$ m/s (ghiaie sabbiose).

Categoria di sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17 gennaio 2018

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento.

Per definire le Categorie, il D.M. 17 gennaio 2018 prevede il calcolo del parametro $V_{s,eq}$, ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_s dei terreni posti al di sopra del substrato di riferimento ($V_{s,30}$ per depositi con profondità del substrato superiore a 30 m). La profondità del substrato è riferita al piano di posa delle fondazioni superficiali, alla testa dei pali per fondazioni indirette, al piano di imposta delle fondazioni per muri di sostegno di terrapieni o alla testa delle opere di sostegno di terreni naturali.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, 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.</i>
C	<i>Depositi 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.</i>
D	<i>Depositi 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.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Dall'assetto sismo-stratigrafico desunto dalle indagini sismiche effettuate, è possibile constatare la presenza del *bedrock* geofisico (substrato di riferimento) a profondità superiori a 30 m dal p.c. locale.

Pertanto, come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17/01/2018*), si è calcolata la velocità media di propagazione delle onde di taglio fino a circa 30 m dal piano di posa delle fondazioni ($V_{s,30}$), a partire da varie profondità dal piano campagna:

Profondità piano di posa delle fondazioni	$V_{s,30}$
0 m dal p.c.	$V_s (0 - 30) \approx 473 \text{ m/s}$
1 m dal p.c.	$V_s (1 - 31) \approx 491 \text{ m/s}$

Dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal presente studio e dalle indicazioni normative si prevede l'inserimento del sito d'indagine nella **Categoria di Sottosuolo denominata B**, così definita:

Categoria B - *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti*, 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.

7. CAPACITÀ PORTANTE AGLI STATI LIMITE ULTIMI

Per orientare il Sig. Progettista nel dimensionamento della struttura, sulla base delle sue indicazioni, si è quindi eseguito il calcolo delle resistenze in **condizioni statiche**. Il piano campagna è stato considerato orizzontale, così come il piano di posa delle fondazioni che in sede di calcolo è stato posto a 0,5 m dal p.c. locale, all'interno del materiale naturale. Per determinare la capacità portante, sono state scelte le formule generali di *Brinch - Hansen*, utilizzando i parametri geotecnici riferiti al *modello geotecnico* desunto dalle prove *DPSH* realizzate e, in particolare, quelli dello **strato argilloso - limoso meno portante**.

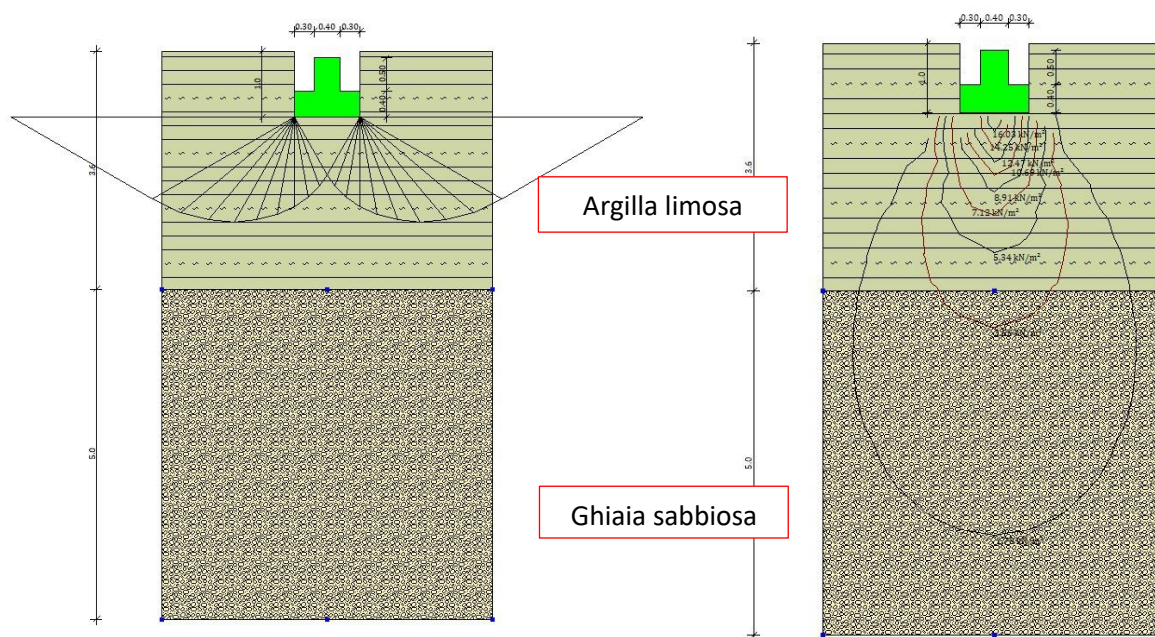
Si è inoltre ipotizzando un sistema di fondazioni nastriforme; l'analisi è stata condotta applicando esclusivamente l'Approccio 2, in quanto più significativo.

Approccio 2 (A1+M1+R3)

Per quanto riguarda l'Approccio 2 la verifica prevede l'utilizzo dei parametri di resistenza del terreno M1 (cfr. NTC, Tab. 6.2.II) pari a 1 per tutti i parametri geotecnici ed è ridotta tramite i coefficienti γ_R del gruppo R3 (cfr. NTC, Tab. 6.4.I).

Con riferimento all'ipotesi progettuale, applicando il fattore riduttivo previsto $\gamma_R = 2,3$, si prevede una riduzione ad un valore di resistenza in **condizioni statiche** di progetto pari a:

$$Q_{3(\text{Approccio2})} \approx 7,0 \text{ t/m}^2 \approx 0,70 \text{ kg/cm}^2$$



Nel caso in cui si dovranno adeguare le fondazioni, per cedimenti dovrà essere preparato il piano di posa delle fondazioni a regola d'arte, prevedendo che il terreno di fondazione non subisca rimaneggiamenti e deterioramenti. Il piano di posa degli elementi strutturali di fondazione dovrà essere impostato all'interno del terreno naturale (eliminando quindi eventuale materiale di riporto / demolizione superficiale) ed essere regolarizzato e protetto con conglomerato magro, per avvantaggiare una diffusione del carico su di un'area più ampia di terreno.

Infine, i valori di cedimento dovranno essere valutati una volta noti i carichi di progetto effettivi e la loro distribuzione spaziale. Data la natura fine dei terreni dell'Unità Litotecnica B e le scarse proprietà geotecniche, non si esclude il possibile verificarsi di cedimenti anche differenziali che dovranno necessariamente essere presi in considerazione nella fase progettuale definitiva.

Resta di stretta competenza del Sig. Progettista la scelta definitiva ed esecutiva della tipologia e del dimensionamento dell'opera, che sarà subordinata all'individuazione dei parametri progettuali definitivi.

Le ns. verifiche vanno intese come un approccio ragionato alla valutazione dell'interazione struttura-terreno su cui il Sig. Progettista potrà eseguire le proprie verifiche e scelte progettuali, anche alla luce dei dati emersi dall'indagine. Tutte le verifiche agli SLE e agli SLU prescritte dalle NTC 2018 dovranno essere effettuate dal Sig. Progettista e riportate in una specifica relazione geotecnica sulle fondazioni utilizzando le azioni che derivano dalla progettazione strutturale.




Dr. Geol. Matteo Collareda

ALLEGATI

-  Report e diagrammi delle prove penetrometriche effettuate

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente: Comune di Santa Lucia di Piave Cantiere: Magazzino Protezione Civile Località: ex MOSTRA VINI	
--	--

Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH TG 63-200 PAGANI

Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente	63 Kg
Altezza di caduta libera	0.75 m
Peso sistema di battuta	0.63 Kg
Diametro punta conica	50.73 mm
Area di base punta	20.21 cm ²
Lunghezza delle aste	1.5 m
Peso aste a metro	6 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	1.20 m
Avanzamento punta	0.20 m
Numero colpi per punta	N(20)
Coeff. Correlazione	1.047
Rivestimento/fanghi	No
Angolo di apertura punta	60 °

PROVA ...DPSH 1

Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI
 Prova eseguita in data 08/12/2021
 Profondità prova 3.00 mt
 Falda non rilevata
 Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm²)	Res. dinamica (Kg/cm²)	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²)	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²)
0.20	8	0.855	72.31	84.61	3.62	4.23
0.40	7	0.851	62.99	74.04	3.15	3.70
0.60	10	0.847	89.59	105.77	4.48	5.29
0.80	16	0.793	134.25	169.23	6.71	8.46
1.00	13	0.790	108.59	137.50	5.43	6.87
1.20	7	0.836	61.91	74.04	3.10	3.70
1.40	7	0.833	56.77	68.16	2.84	3.41
1.60	3	0.830	24.23	29.21	1.21	1.46
1.80	3	0.826	24.14	29.21	1.21	1.46
2.00	3	0.823	24.05	29.21	1.20	1.46
2.20	15	0.770	112.49	146.06	5.62	7.30
2.40	17	0.767	126.99	165.54	6.35	8.28
2.60	35	0.664	226.39	340.82	11.32	17.04
2.80	32	0.661	190.95	288.70	9.55	14.43
3.00	50	0.609	274.57	451.09	13.73	22.55

Prof. Strato (m)	NPDM	Rd (Kg/cm²)	Tipo	Clay Fraction (%)	Peso unità di volume (t/m³)	Peso unità di volume saturo (t/m³)	Tensione efficace (Kg/cm²)	Coeff. di correlaz. con Nspt	NSPT	Descrizione
1.4	9.71	101.91	Incoerente - coesivo	0	1.97	2.17	0.14	1.05	10.17	riporto
2	3	29.21	Coesivo	0	1.64	1.86	0.33	1.05	3.14	argilla limosa
3	29.8	278.44	Incoerente	0	1.71	2.06	0.46	1.05	31.2	ghiaia sabbiosa

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA DPSH 1

Strato	Prof. (m)	NSPT	Tipo	Peso unità di volume (t/m³)	Peso unità di volume saturo (t/m³)	Angolo di resistenza al taglio (°)	Coesione non drenata (Kg/cm²)	Modulo Edometrico (Kg/cm²)	Modulo Elastico (Kg/cm²)	Modulo Poisson	Modulo di taglio G (Kg/cm²)
Strato (1) riporto	0.00-1.40	10.17	Coesivo Incoerente	1.97	2.17	29.91	1.00	---	101.70	0.33	575.17
Strato (2) argilla limosa	1.40-2.00	3.14	Coesivo	1.64	1.86	--	0.30	47.10	31.40	--	--
Strato (3) ghiaia sabbiosa	2.00-3.00	31.2	Incoerente	1.71	2.06	35.91	--	91.55	249.60	0.29	1649.75

PROVA ...DPSH 2

Strumento utilizzato...

DPSH TG 63-200 PAGANI

Prova eseguita in data

08/12/2021

Profondità prova

5.20 mt

Falda non rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm²)	Res. dinamica (Kg/cm²)	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²)	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²)
0.20	8	0.855	72.31	84.61	3.62	4.23
0.40	5	0.851	44.99	52.88	2.25	2.64
0.60	2	0.847	17.92	21.15	0.90	1.06
0.80	4	0.843	35.68	42.31	1.78	2.12
1.00	2	0.840	17.76	21.15	0.89	1.06
1.20	3	0.836	26.53	31.73	1.33	1.59
1.40	4	0.833	32.44	38.95	1.62	1.95
1.60	2	0.830	16.16	19.48	0.81	0.97
1.80	2	0.826	16.09	19.48	0.80	0.97
2.00	2	0.823	16.03	19.48	0.80	0.97
2.20	3	0.820	23.96	29.21	1.20	1.46
2.40	2	0.817	15.91	19.48	0.80	0.97
2.60	2	0.814	15.86	19.48	0.79	0.97
2.80	2	0.811	14.64	18.04	0.73	0.90
3.00	2	0.809	14.59	18.04	0.73	0.90
3.20	2	0.806	14.54	18.04	0.73	0.90
3.40	2	0.803	14.50	18.04	0.72	0.90
3.60	3	0.801	21.68	27.07	1.08	1.35
3.80	11	0.798	79.24	99.24	3.96	4.96
4.00	12	0.796	86.18	108.26	4.31	5.41
4.20	10	0.794	71.61	90.22	3.58	4.51
4.40	15	0.741	93.47	126.06	4.67	6.30
4.60	22	0.689	127.43	184.89	6.37	9.24
4.80	33	0.637	176.69	277.34	8.83	13.87
5.00	40	0.585	196.66	336.17	9.83	16.81
5.20	50	0.583	244.98	420.21	12.25	21.01

Prof. Strato (m)	NPDM	Rd (Kg/cm²)	Tipo	Clay Fraction (%)	Peso unità di volume (t/m³)	Peso unità di volume saturo (t/m³)	Tensione efficace (Kg/cm²)	Coeff. di correlaz. con Nspt	NSPT	Descrizione
0.4	6.5	68.75	Incoerente - coesivo	0	1.85	1.89	0.04	1.05	6.81	riporto
3.6	2.44	23.82	Coesivo	0	1.6	1.86	0.33	1.05	2.55	argilla limosa
5.2	24.12	205.3	Incoerente	0	1.65	2.03	0.72	1.05	25.25	ghiaia sabbiosa

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA DPSH 2

Strato	Prof. (m)	NSPT	Tipo	Peso unità di volume (t/m³)	Peso unità di volume saturato (t/m³)	Angol o di resiste nza al taglio (°)	Coesione non drenata (Kg/cm²)	Modulo Edometrico (Kg/cm²)	Modulo Elastico (Kg/cm²)	Modulo Poisson	Modulo di taglio G (Kg/cm²)
Strato (1) riporto	0.00- 0.40	6.81	Coesivo Incoerente	1.85	1.89	28.95	0.67	---	68.10	0.34	394.52
Strato (2) argilla limosa	0.40- 3.60	2.55	Coesivo	1.60	1.86	--	0.25	38.25	25.50	--	--
Strato (3) ghiaia sabbiosa	3.60- 5.20	25.25	Incoerente	1.65	2.03	34.21	--	79.33	202.00	0.3	1352.19

