

- Relazione Geologica: indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito (paragrafo C6.2.1);
- Relazione Geotecnica: indagini, caratterizzazione e modellazione volume significativo del sito (paragrafi C6.2.2 e C6.2.2.5);
- Relazione sulla modellazione sismica concernente la “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione (paragrafo C3.2) e analisi Risposta Sismica Locale.

Indagine geognostica e sismica effettuata a Traversetolo (PR), in via Case Rotte, per la realizzazione di tre nuovi fabbricati in un lotto di proprietà, secondo quanto previsto dal D.M. 17/01/2018.

30.12.2021



Committente

Sig.ra RICCI MARIA PIA

Via Fantini n. 6

43029, Traversetolo (PR)

Dott. Geol. GEMELLI, Thomas

Viale Milano 21, Sassuolo (MO)

iscritto all'Albo dei geologi Em. Rom. Al n° 1009

Cell. 3495786691 – email: thomas.gemelli@tiscali.it



Sommario

Premessa	3
Relazione Geologica: indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito.....	3
<i>Inquadramento geologico, geomorfologico e stratigrafico</i>	9
Relazione sulla modellazione sismica concernente la “ <i>pericolosità sismica di base</i> ” del sito oggetto d’indagine.	13
<i>Aspetti sismici (coordinate sito: Long. 10.36649926 / Latit. 44.64778395)</i>	13
<i>Analisi sismica dei microtremori passivi (Re.Mi.)</i>	16
<i>Misura dei rapporti spettrali HVSR - Horizontal to Vertical Spectral Ratio (ipotesi di nakamura)</i>	20
<i>Risposta Sismica Locale (RSL)</i>	23
<i>Liquefazione e cedimenti post-sismici</i>	27
Relazione Geotecnica: indagini, caratterizzazione e modellazione volume significativo del sito	29
<i>Caratterizzazione Geotecnica</i>	29
<i>Ipotesi di intervento con fondazioni superficiali in funzione dell’area indagata, e parametri geotecnici del substrato di riferimento</i>	30
Conclusioni	34
Allegati.....	38

Premessa

A Traversetolo (PR), in via Case Rotte, la **Sig.ra RICCI MARIA PIA**, ha intenzione di realizzare tre nuovi fabbricati in un lotto di proprietà, per cui hanno incaricato lo scrivente di realizzare uno studio geologico, geotecnico e sismico, per risalire alle caratteristiche intrinseche del volume significativo di terreno, secondo quanto previsto dall'ultimo **DM 17/01/2018** (paragrafo §6.2.1, §6.2.2 e §3.2).

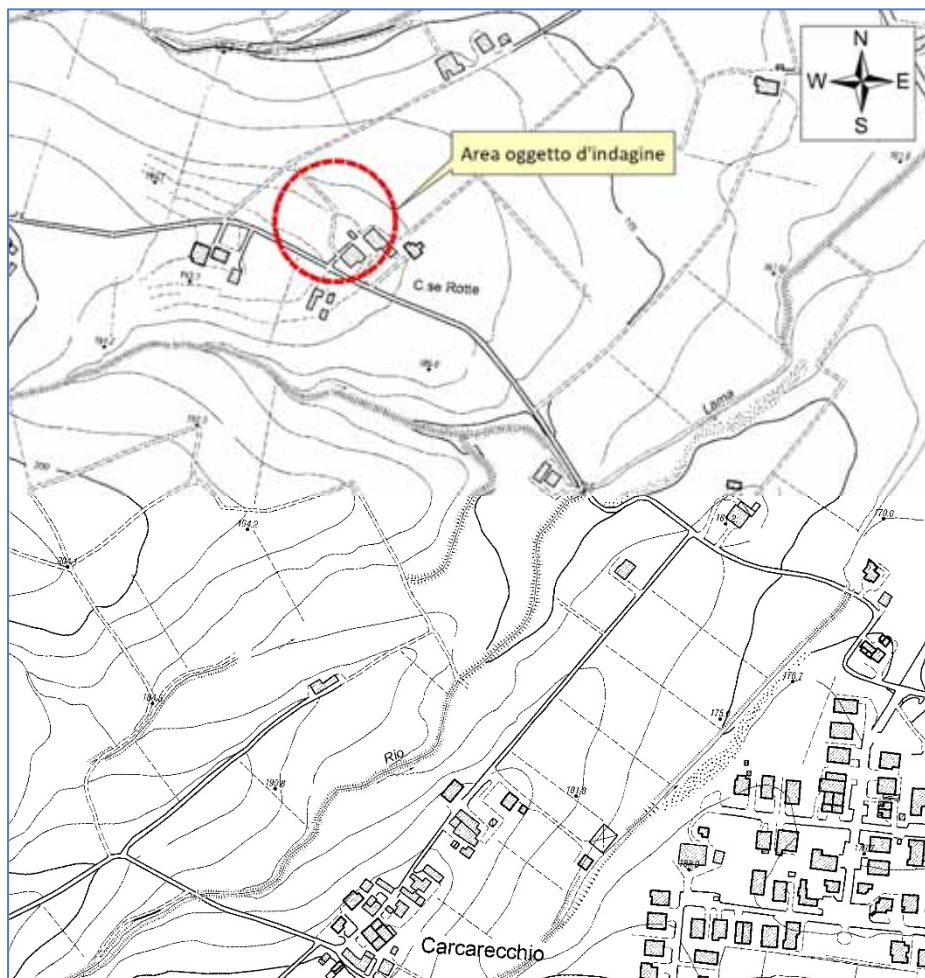


Fig. 1: estratto CTR (Carta Tecnica Regionale, 2013), scala 1:5000, con evidenziata l'area oggetto d'intervento.

Relazione Geologica: indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito

I rilevamenti geognostici e sismici si sono avvalsi delle seguenti metodologie: n°4 penetrometrie dinamiche DPSH (*foto 1, 2 e 3*), n°2 trincee esplorative (*foto 4 e 5*) nell'area di sedime di un fabbricato di progetto, n°1 stendimento sismico ai

microtremori (foto 6) e n°2 registrazioni delle frequenze naturali del terreno (rapporto spettrale H/V, foto 7 e 8), distribuiti nell'area indagata come riportato in fig. 2:

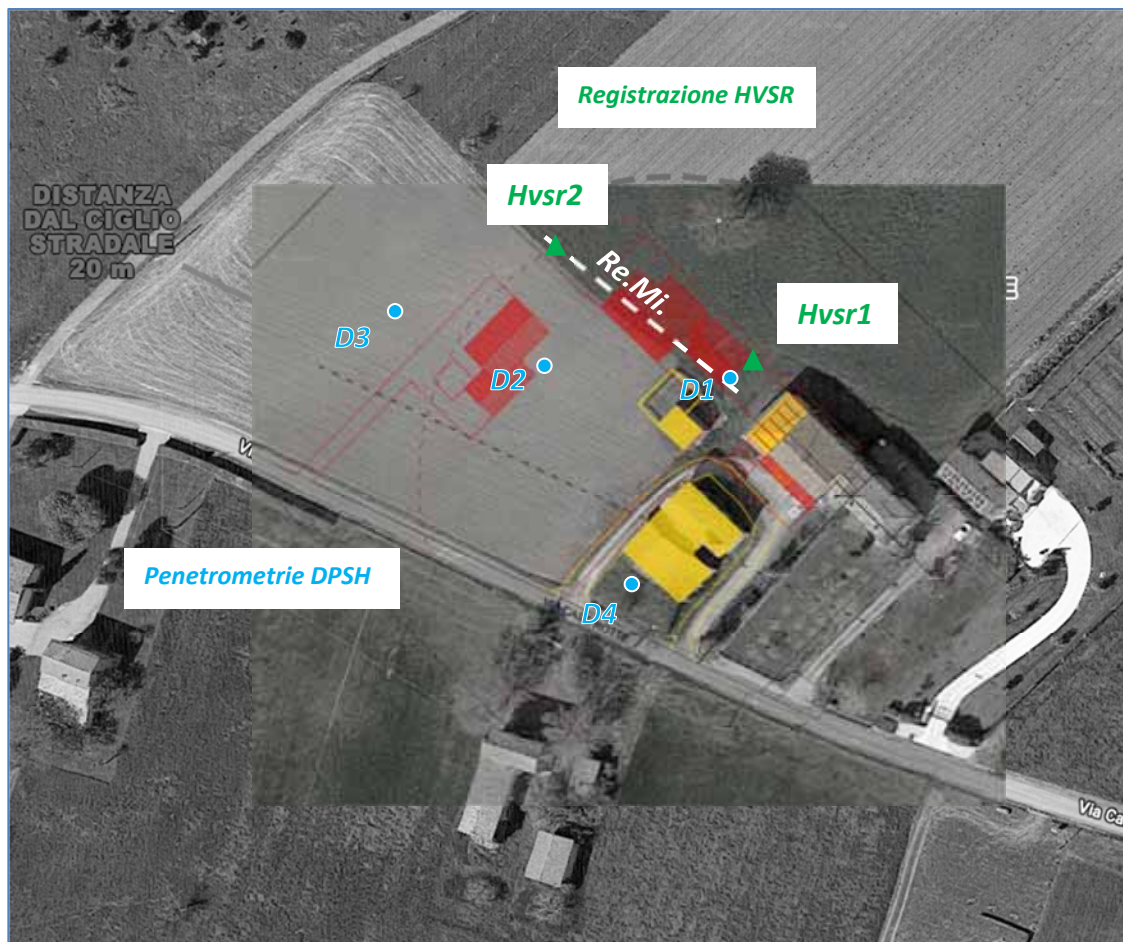


Fig. 2: Ubicazione indagini geognostiche e sismiche realizzate



Foto 1: Realizzazione della prova penetrometrica D1



Foto 2: Realizzazione della prova penetrometrica D2



Foto 3: Realizzazione della prova penetrometrica D3



Foto 4: Saggio esplorativo dei primi 3 metri di terreno (in corrispondenza del sondaggio D1)



Foto 5: saggio esplorativo n°2 realizzato nell'area di sedime di un nuovo fabbricato di progetto

- **sondaggi DPSH:** corredati da un istogramma relativo all'infissione delle aste (tratti da 30 cm), ricostruzione stratigrafica e da una tabella che riassume alcuni parametri geotecnici. (γ : peso di volume [t/m^3]; E_y : modulo di deformazione elastico drenato [kg/cm^2]; ϕ : angolo di attrito interno; D_r : densità relativa [%]; c_u : coesione non drenata [kg/cm^2]; k_o : costante di Winkler; E_{ed} : modulo edometrico [kg/cm^2]; c' : coesione efficace [kg/cm^2]; V_s : onde di taglio; ν : coefficiente di Poisson);
- **stendimento sismico ReMi (microtremors):** Modalità per la determinazione delle V_{s30} con geofoni da 4,5 Hz per la ricezione delle onde a bassa frequenza, o onde Raleigh. Questa tecnica, oltre a essere non invasiva, non richiede forme di energizzazione in quanto sfrutta l'energia dispersa nel sottosuolo. Le onde Rayleigh, che sono il risultato dell'interferenza fra le onde di pressione "P" e quelle di taglio "S", si trasmettono sulla superficie libera e, in un terreno stratificato, subiscono una sorta di dispersione con velocità di propagazione che dipende dalla frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità per cui hanno una maggior velocità di

fase. Il calcolo del profilo delle velocità $\frac{V_{fase}}{frequenza}$ può essere convertito nel profilo $\frac{V_s}{profondità}$. Le onde di superficie così registrate in archi temporali di

32 secondi, con modalità 24 bit e con 5-6 campionamenti per ogni stendimento, che coprono un range di frequenza che varia da 2 a 25 Hz, consentono di ricostruire in modo dettagliato l'andamento delle "Vs" nell'ambito dei primi 100 metri di sottosuolo.



Foto 6: stendimento sismico ai microtremori (Re.Mi.)

- **Prova sismica HVSR:** L'indagine sismica è stata condotta utilizzando un tomografo digitale, contenente tre sensori elettrodinamici ortogonali tra loro (velocimetri), che possono lavorare sul range frequenziale 0,1 – 512 Hz. Tale indagine geofisica si basa sul "metodo di Nakamura", cioè sull'analisi dei valori medi del rapporto di ampiezza fra le componenti spettrali orizzontali e verticali del rumore sismico. In particolare, oggetto di analisi è la cosiddetta "funzione H/V" dei rapporti spettrali medi in funzione della frequenza di vibrazione. Il valore di tale rapporto è direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati che hanno una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocità delle onde e densità del materiale).

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio è stato utilizzato un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (HVSR), basati sulla simulazione del campo di 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 HVSR avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita; successivamente, tramite specifico algoritmo, si adatta la curva teorica a quella sperimentale. In questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde V_s . Nel presente lavoro, quindi, si è utilizzata la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale H/V) con quello effettivamente misurato in superficie. Considerando due strati con differente impedenza acustica, la **frequenza di risonanza (fr)** è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio V_s del primo strato dalla seguente relazione:

$$fr = V_{s1} / 4 h_1$$

(dove: V_{s1} = velocità delle onde S del primo strato; h_1 = spessore primo strato).



Foto 7: registrazione delle frequenze (Hvsr1) naturali del terreno.



Foto 8: registrazione delle frequenze (Hvsr2) naturali del terreno.

Inquadramento geologico, geomorfologico e stratigrafico

La carta geologico-stratigrafica riportata in *allegato* (di cui un estratto in *fig. 3*) evidenzia un quadro geologico ben definito, ossia terreni di origine alluvionale caratterizzati dall'azione dei corsi d'acqua minori (pedemontani) che ha modificato il paesaggio fin dal termine dell'ultima era glaciale.

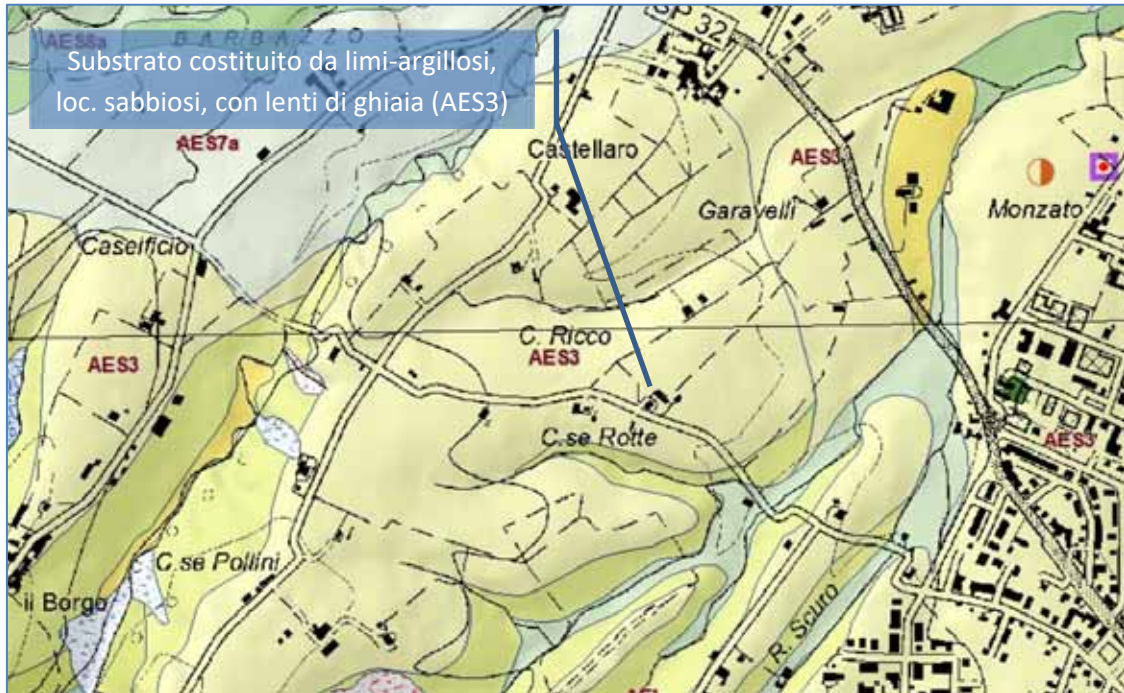


Fig. 3: estratto della carta geologica dell'area indagata, dove si evince la presenza di depositi di origine alluvionale, modellati dall'azione dei corsi d'acqua pedemontani.

Nell'area esaminata si intercalano livelli limo-argillosi e/o argillo-limosa, e orizzonti ghiaia-argillosi (**AES3** – *subsistema di Agazzano*, **AES7a** - *Unità di Niviano e AEI* – *Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore*); nella fattispecie, i livelli incoerenti sono costituiti da ghiaie argillose, mentre la copertura è costituita da limi argillo-sabbiosi, di medio basse caratteristiche geotecniche; nell'area esaminata è stata rilevata una spiccata variazione laterale di facies, ossia i primi metri sono caratterizzati localmente da una matrice sabbiosa predominante in 2 sondaggi (D1 e D4), e praticamente assente negli altri (D2 e D3).

La profondità (in m s.l.m.) del limite basale dei sedimenti quaternari continentali (da Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998 – *fig. 4*), evidenzia un substrato marino

(bedrock sismico) posto ad una profondità prossima ai 60 m dal p.c. (dato indispensabile per lo studio di Risposta Sismica Locale).

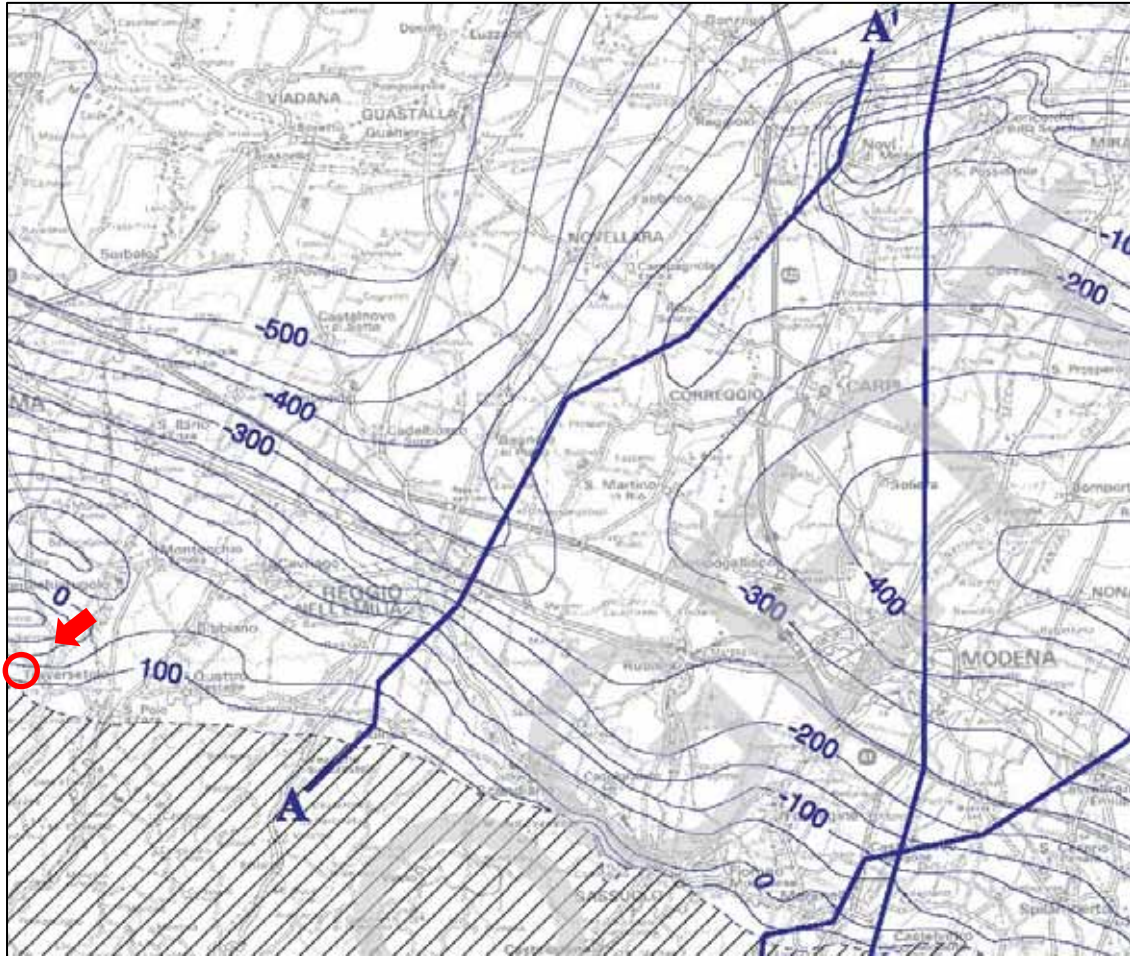


Fig. 4: estratto della carta inerente al limite basale dei sedimenti quaternari continentali della zona di Traversetolo, che attesta la profondità del bedrock sismico ad una profondità di circa 60 m dal p.c.

La ricostruzione stratigrafica di superficie, ricavata dalla restituzione delle prove penetrometriche realizzate nell'area interessata dall'intervento (Sez. NW-SE, sondaggi D1 - D2 - D3, fig. 5), confermano la natura alluvionale della copertura, ossia limi argillo-sabbiosi, poi argille limose fino a incontrare il primo orizzonte di ghiaia (con matrice argillosa sempre presente) e anche la spiccata eteropia laterale della stessa successione, diversa da NW a SE; difatti, oltre a variare nettamente le quote dei contatti stratigrafici, a SE, in prossimità delle verticali D1 e D4 si evidenzia la presenza di limi argillo-sabbiosi di basse qualità geotecniche fino a 3.0 m di profondità.

In corrispondenza dei sondaggi penetrometrici D1 e D4, sono stati realizzati dei saggi esplorativi con escavatore per visionare la natura della successione, soprattutto in prossimità dei fabbricati esistenti (foto 9 e 10).



Foto 9: trincea esplorativa effettuata in corrispondenza della verticale D1, che evidenzia la presenza di limi argillo-sabbiosi fino alla profondità di 2.7 m dal p.c.



Foto 10: particolare del terreno estratto dalla trincea, dove si osserva la matrice sabbiosa abbondante (ricca di calcinelli).

Nei fori di sondaggio (09/10/2020), e nelle trincee esplorative (13/11/2020), **non è stata rilevata** presenza di acqua in falda e il rilevamento di campagna e l'analisi della cartografia esistente non evidenzia alcun fenomeno di detensionamento superficiale in atto (corpi franosi), pertanto il lotto **è stabile**.

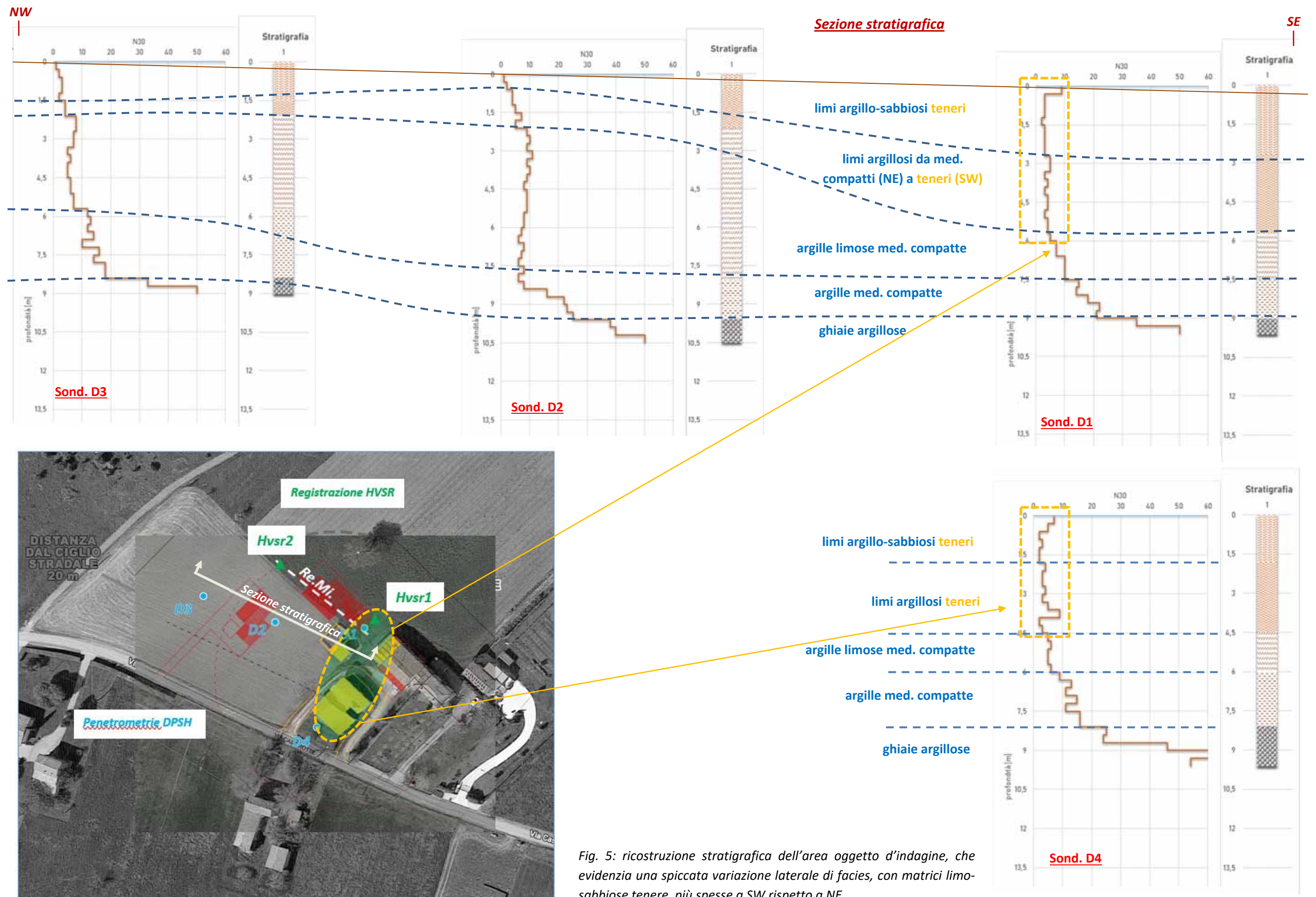


Fig. 5: ricostruzione stratigrafica dell'area oggetto d'indagine, che evidenzia una spiccata variazione laterale di facies, con matrici limo-sabbiose tenere, più spesse a SW rispetto a NE.

Relazione sulla modellazione sismica concernente la “pericolosità sismica di base” del sito oggetto d’indagine.

Aspetti sismici (coordinate sito: Long. 10.36649926 / Latit. 44.64778395)

Per quanto concerne le caratteristiche sismiche del terreno, fondamentali per ricostruire il modello geotecnico locale, il D.M. 17/01/2018, stabilisce che per il calcolo di alcuni parametri caratteristici, tra cui la portata dello stesso (“Q_{LIM.ULT.}”), bisogna individuare prima alcuni parametri spettrali tipici del sito; ivi, la legge stabilisce che l’azione sismica non va più considerata “zona dipendente” bensì “sito dipendente” per cui si definisce il rischio sismico di base del luogo (“ a_g ”: *accelerazione del substrato tettonico*, “ F_o ”: *valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale* e “ T_c ”: *periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale*) dovranno essere determinati utilizzando il reticolo di riferimento di cui alle NTC - Tab.1 dell’allegato “B” del D.M. in questione, dopo avere stabilito la classe d’uso (II)¹, il tempo di ritorno che corrisponde alla salvaguardia della vita (475 anni) e la vita nominale dell’opera (50 anni).

La storia sismica del luogo è reperibile negli annali dell’INGV, più precisamente nel Catalogo dei Terremoti Italiani (CPTI15, ver. 1.5); per quanto concerne il comune di *Traversetolo*, gli eventi registrati sono i seguenti (fig. 6 e 7):

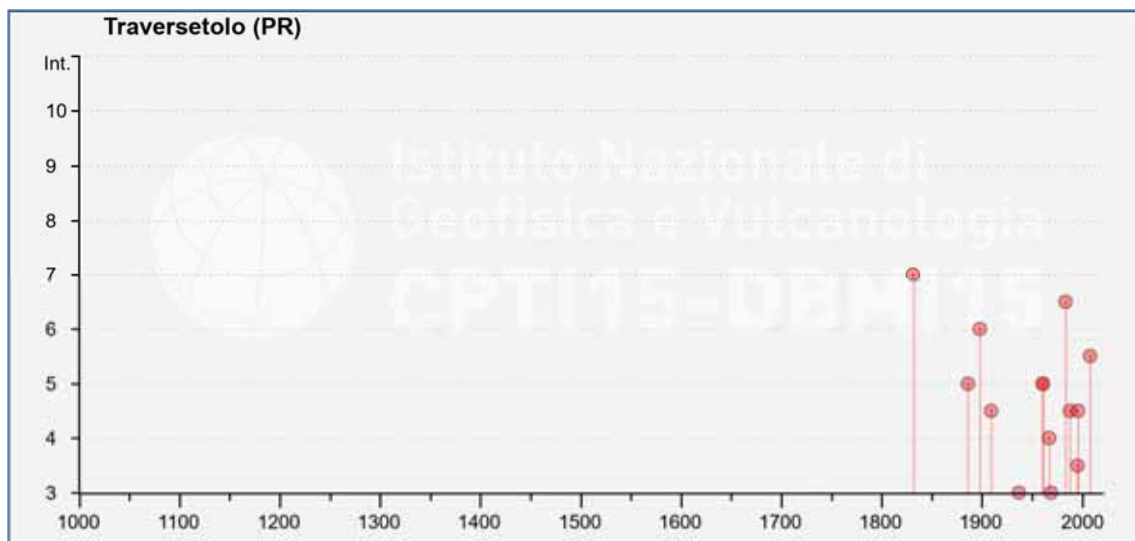


Fig. 6: grafico con i principali terremoti che hanno interessato l’area oggetto d’indagine.

¹ **Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti (classe II).**

Int.	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
7	1832 03 13 03 30	Reggiano	97	7-8	5,51
5	1886 10 15 02 20	Collecchio	44	6	4,7
6	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5,37
NF	1904 11 17 05 02	Pistoiese	204	7	5,1
4-5	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5,36
2	1936 10 18 03 10	Alpago Cansiglio	269	9	6,06
3	1937 09 17 12 19 05.00	Parmense	34	7	4,77
5	1961 08 13 22 34 18.00	Parmense	22	5-6	4,37
5	1961 08 14 01 03 02.00	Parmense	14	5-6	4,47
4	1967 04 03 16 36 18.00	Reggiano	45	5	4,44
3	1969 06 24 13 25 18.00	Parmense	15	5	4,21
6-7	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5,04
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4,43
4-5	1988 03 15 12 03 16.17	Reggiano	160	6	4,57
NF	1989 10 03 09 41 32.85	Appennino parmense	91	4	4,04
3-4	1995 10 10 06 54 21.72	Lunigiana	341	7	4,82
NF	1995 12 31 21 29 47.60	Appennino reggiano	96	4-5	4,51
4-5	1996 10 15 09 55 59.95	Pianura emiliana	135	7	5,38
NF	1996 10 26 04 56 54.10	Pianura emiliana	63	5-6	3,94
NF	1996 12 16 09 09 53.08	Pianura emiliana	115	5-6	4,06
NF	1998 02 21 02 21 13.30	Pianura emiliana	104	5	3,93
NF	2000 06 18 07 42 07.68	Pianura emiliana	304	5-6	4,4
NF	2002 06 08 20 13 07.10	Frignano	115	4	4,23
NF	2002 06 18 22 23 38.10	Frignano	186	4	4,3
NF	2002 06 19 22 11 15.57	Frignano	52	3	4,03
NF	2002 11 13 10 48 03.19	Franciacorta	768	5	4,21
5-6	2008 12 23 15 24 21.77	Parmense	291	6-7	5,36

Fig. 7: dettagli degli eventi sismici che hanno interessato il comune di Traversetolo (PR)

La forbice entro la quale si trova l'accelerazione attesa può essere determinata utilizzando i dati accelerometrici che riguardano il substrato rigido estrapolabili dalla mappa della pericolosità sismica dell'INGV a cui si riferisce la *fig. 8* e il grafico relativo alla disaggregazione.

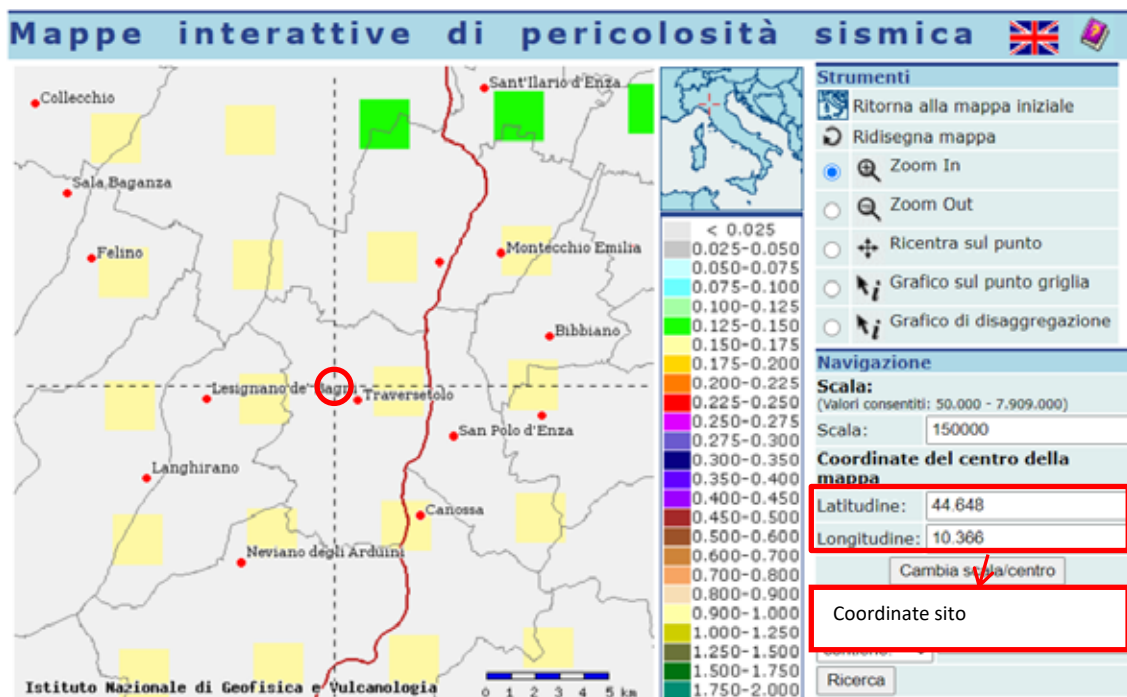


Fig. 8: mappa di pericolosità sismica dell'area indagata (da INGV).

Dalla mappa dell'INGV (fig. 10) risulta che l' $a(g)$ del substrato rigido varia da 0.150 a 0.175.

PR	Torrile	0.100
PR	Traversetolo	0.157
PR	Trecasali	0.108

Tab.1: estratta dalla Regione Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, a disposizione 21/5/2015, della micronizzazione dei comuni. La tab. 1 mette in evidenza un valore di $a(g)$ substrato di riferimento per il comune di Traversetolo, pari a 0.157, ossia un valore compreso nella "forbice" indicata dall'INGV.

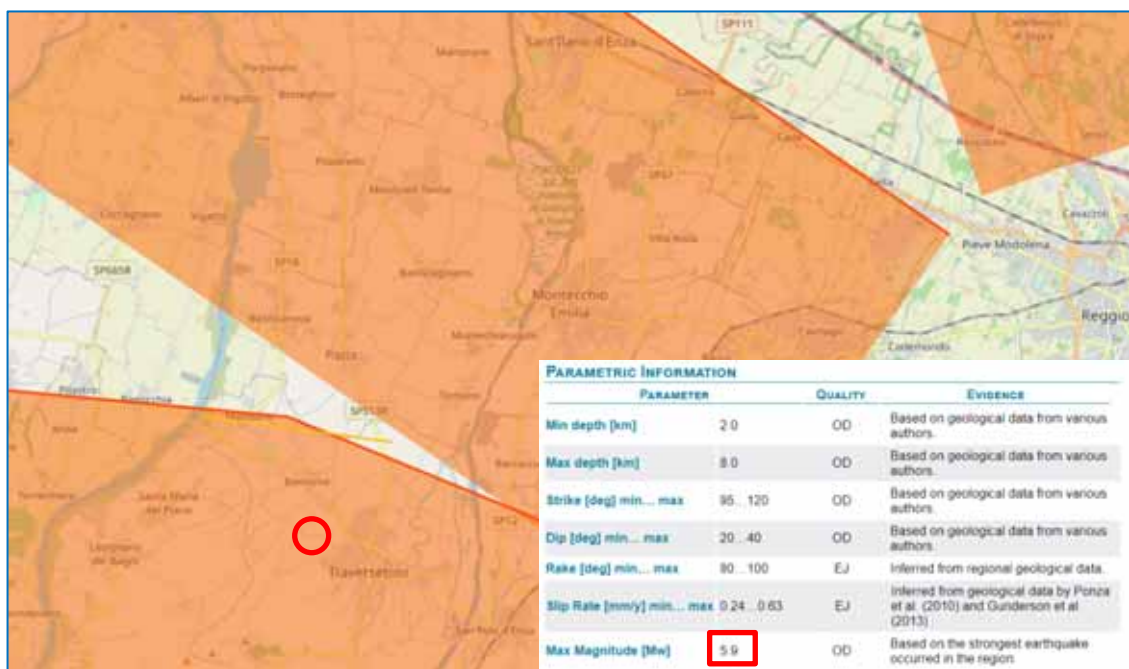


Fig. 9: massima magnitudo attesa secondo la carta Sismogenetica d'Italia (Burrato, 2015)

Per quanto riguarda la magnitudo attesa, il comune di Traversetolo si trova in prossimità dalla sorgente sismogenetica² ITCS046 (Langhirano-Sassuolo), la cui magnitudo $M = 5.9$ (DISS, Burrato P., 2015 – fig. 9).

² Le zone sismogenetiche sono porzioni della crosta o del mantello terrestre da cui possono originarsi i terremoti. Strutture s. sono le strutture geologiche attive a livello regionale da cui si originano i sismi più violenti. La maggior parte dei terremoti avviene nella crosta terrestre. La strumentazione sismologica e i metodi di analisi dei dati, sempre più avanzati, consentono di localizzare con precisione gli ipocentri dei terremoti e di osservare che essi, fatta eccezione per le zone di subduzione, raramente sono più profondi di 15-20 km. Questa distribuzione degli ipocentri, osservata per grandi e piccoli terremoti e per la microsismicità (terremoti con magnitudo inferiore a 2,5), permette di identificare uno strato s. definibile come una zona preferenziale, entro la litosfera, per la nucleazione di terremoti. Il livello inferiore di questo strato è definito dalla profondità massima dei terremoti che vi si verificano e corrisponde, dal punto di vista reologico, alla transizione tra un regime deformativo fragile, in cui la roccia si rompe quando è

La classificazione viene effettuata in base ai valori della velocità equivalente di propagazione V_{S30} delle onde di taglio nei primi 30 m sotto il piano di posa della fondazione la cui misura diretta, come definito nelle NTC, è fortemente raccomandata.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori. Il rilevamento delle velocità “ V_s ” può essere fatto in diversi modi.

Fra i più utilizzati a livello geofisico sono le DOWN-HOLE, SASW, MASW e la Re.Mi. Nel caso specifico, è stata effettuata una registrazione delle basse frequenze HVSR (H/V), per avere un’indicazione sulla profondità del substrato in posto, e due registrazioni dei microtremori (Re.Mi.) naturali del terreno.

Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all’interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo.

Analisi sismica dei microtremori passivi (Re.Mi.)

Le sorgenti sismiche consistono in “rumori ambientali”, o microtremori, costantemente generati da disturbi naturali o artificiali. A causa del sistema di acquisizione dei dati e delle sorgenti necessarie a generare i microtremori, questo metodo è più veloce e soprattutto economicamente conveniente rispetto alle indagini

soggetta a sforzi superiori alla sua resistenza, e un regime duttile, in cui il rilascio di deformazione è pressoché continuo e asismico. Per la maggior parte dei materiali che si ritiene costituiscano una porzione significativa della crosta terrestre, considerando profili realistici di temperatura, la resistenza aumenta fino a una profondità di circa 15 km, per poi decrescere rapidamente. Lo spessore dello strato s ha importanti conseguenze sulla dimensione dei terremoti poiché corrisponde alla larghezza massima della faglia che si rende disponibile per la rottura; infatti, mentre la lunghezza di una faglia può superare i 1000 km, la sua larghezza ha un limite massimo dato dallo spessore litosferico che ha caratteristiche reologiche tali da rompersi in maniera fragile. I terremoti che rompono l’intera zona s vengono classificati come grandi; quelli che rompono una parte della zona s come piccoli. Sulla superficie terrestre le principali strutture s si trovano in corrispondenza dei margini di placca; tuttavia in alcune regioni la sismicità è concentrata lontano da essi ed è per questo definita intraplacca.

sismiche in foro e agli altri metodi sismici superficiali utilizzati per il calcolo del profilo delle onde di taglio come il SASW e il MASW che, al contrario, trovano difficoltà di applicazione nei centri urbani e/o comunque richiedono grandi fonti energetiche.

È poi da aggiungere che, usando per la registrazione molti canali, impiegando sismogrammi verticali e usando la tecnica di trasformazione p-f (lentezza-frequenza), questo metodo può arrivare ad analizzare la dispersione delle onde di Rayleigh dove altre tecniche e trovano difficoltà.

A seconda delle proprietà del materiale costituente il substrato, il software Re.Mi. può determinare le velocità di onde di taglio fino ad un massimo di 100 metri di profondità; è quindi molto utile per determinare velocemente l'andamento della velocità media delle onde di taglio nei primi trenta metri di profondità (V_{s30}) e quindi la categoria del suolo di fondazione in base a quanto riportato in prima istanza nel DPCM 3274 del 20 marzo 2003³ e nei successivi DM 2008 e DM 2018.

Come detto, la teoria si basa sullo studio delle onde superficiali di Rayleigh e sulla creazione di una trasformata lentezza-frequenza del campo d'onda. Questa trasformata è particolarmente efficace nel permettere l'individuazione delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh.

La combinazione dei comuni equipaggiamenti di sismica a rifrazione, la semplice modalità di registrazione (senza sorgenti), una tecnica di processo dei dati basata sulla

³ **A** Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.

B Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} , compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt} > 50$ o coesione non drenata > 250 kPa).

C Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{spt} < 50$, $70 < cu < 250$ kPa).

D Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti caratterizzati da valori di $V_{s30} < 180$ m/s ($N_{spt} < 15$, $cu < 70$ kPa).

E Profili di terreno costituiti da strati superficiali non litoidi (granulari o coesivi), con valori di V_{s30} simili a quelli delle classi C o D e spessore compreso fra 5 e 20 m, giacenti su un substrato più rigido con $V_{s30} > 800$ m/s.

trasformazione del campo di onde e uno strumento di modellazione interattiva della dispersione delle velocità di fase delle onde di Rayleigh fanno sì che la tecnica dei microtrempi possa essere sfruttata in qualsiasi situazione.

Il programma effettua una trasformazione del campo di onde e crea un diagramma bidimensionale frequenza-lentezza; ciò è particolarmente efficace nel permettere un'accurata determinazione di punti delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh a dispetto della presenza di onde che si propagano lungo l'allineamento ad alte velocità apparenti, onde di corpo, onde d'aria e disturbi incoerenti.



Foto 11: Sismografo PASI GEA24

La procedura di acquisizione di dati consiste in 10 o più registrazioni di rumori sismici (nella fattispecie, in questa indagine, sono state effettuate 12 registrazioni) di durata pari a 32 secondi, usando sismografo a rifrazione e geofoni convenzionali P-wave. La trasformazione del campo di onde della registrazione del rumore rivela la curva di dispersione dell'onda di taglio.

Sulla curva di dispersione dell'onda di taglio vengono poi selezionati i punti (picking) necessari alla determinazione del profilo di velocità dell'onda di taglio nel substrato.

Il sismografo utilizzato è un PASI GEA24 (foto. 11) e le modalità di registrazione è 32 bit, mentre i geofoni sono caratterizzati da una frequenza di 4.5 Hz, con un tempo di registrazione è stato di 32 sec. Il software impiegato è **Geopsy**, ver. 2.10.1; come si evince dalla *figura 10*, il valore delle **Vs** ricavato dalla prova REMI è di **455 m/s**, pertanto il sito si trova in **classe "B"**.

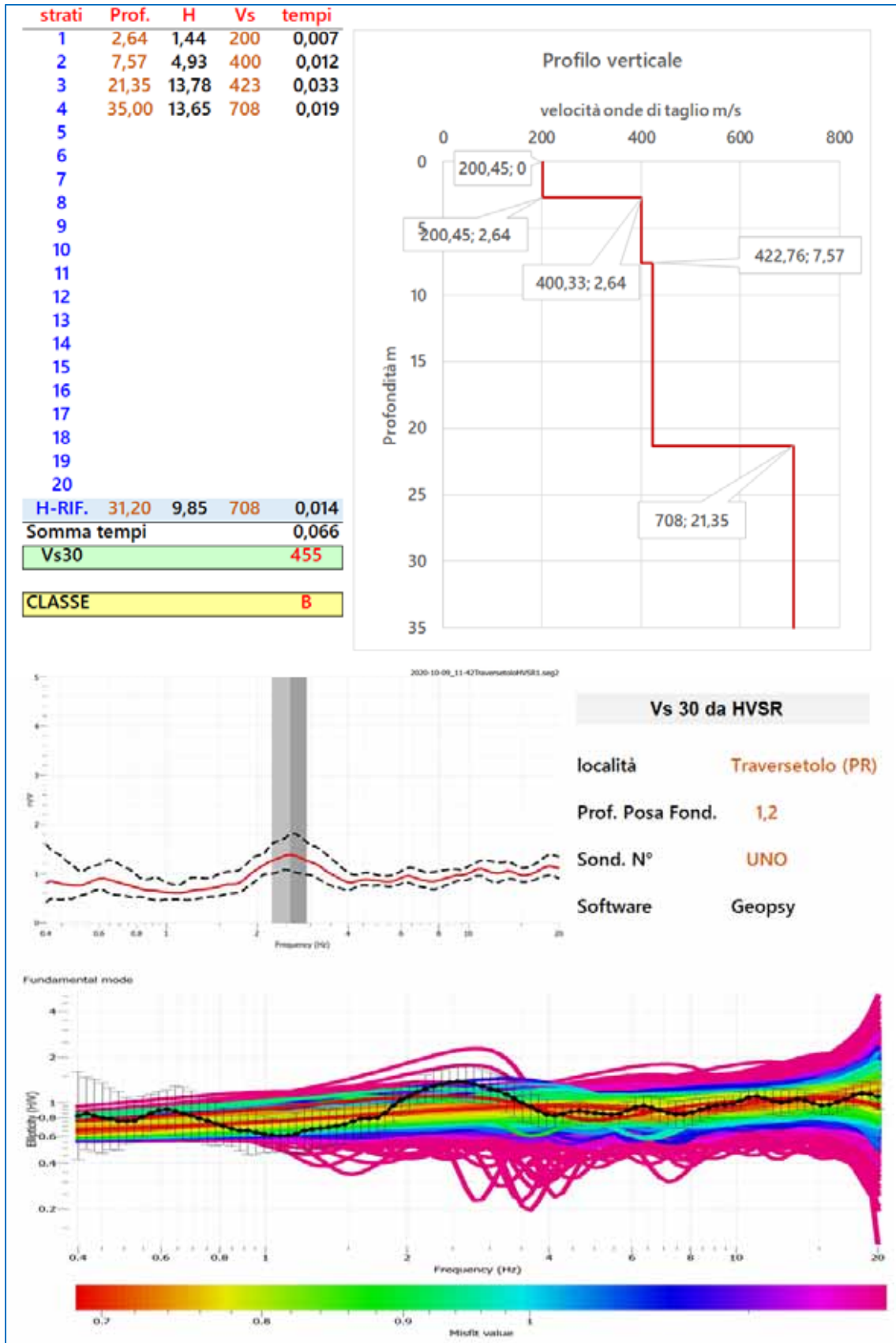
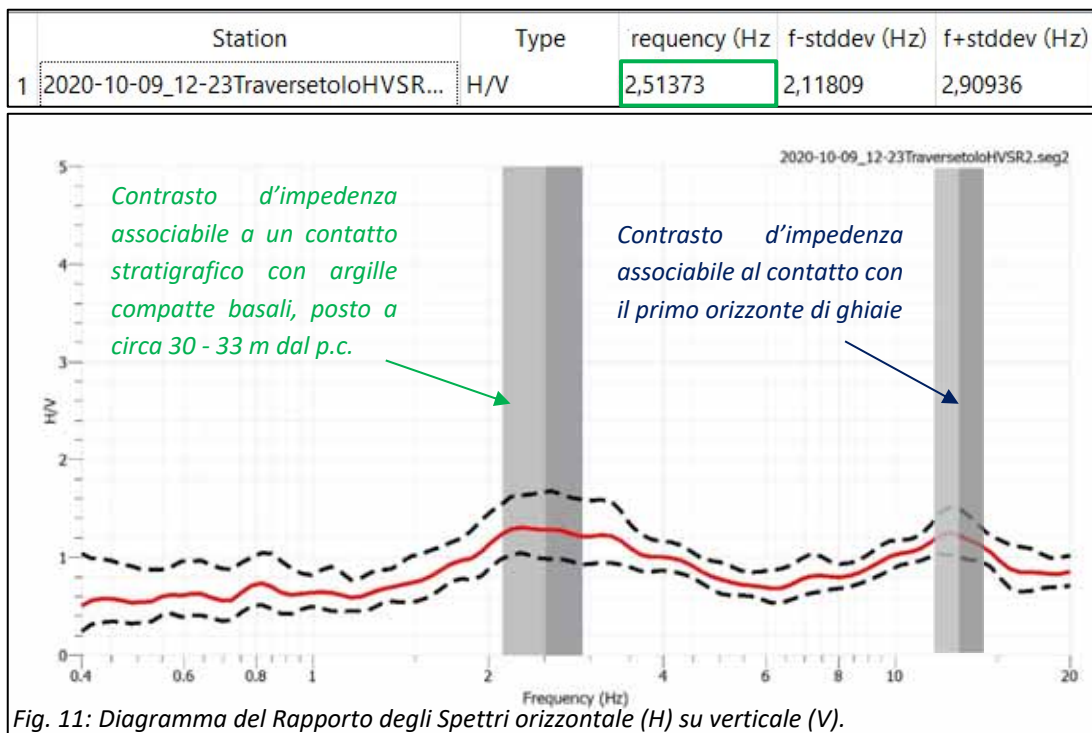


Fig. 10: caratterizzazione sismica del sito, che evidenzia un valore di $V_s = 455$ m/s

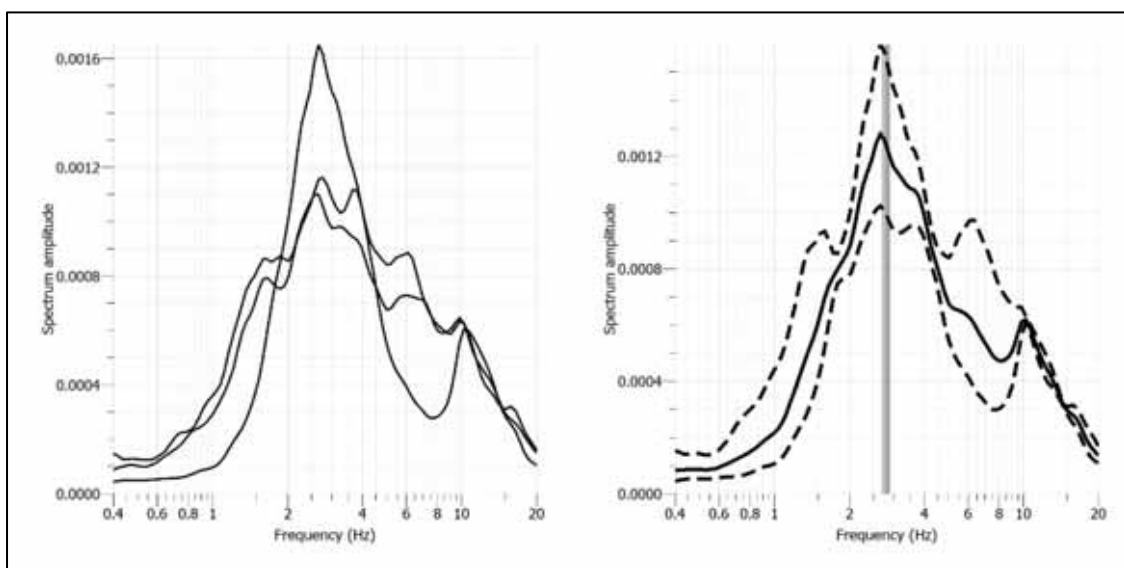
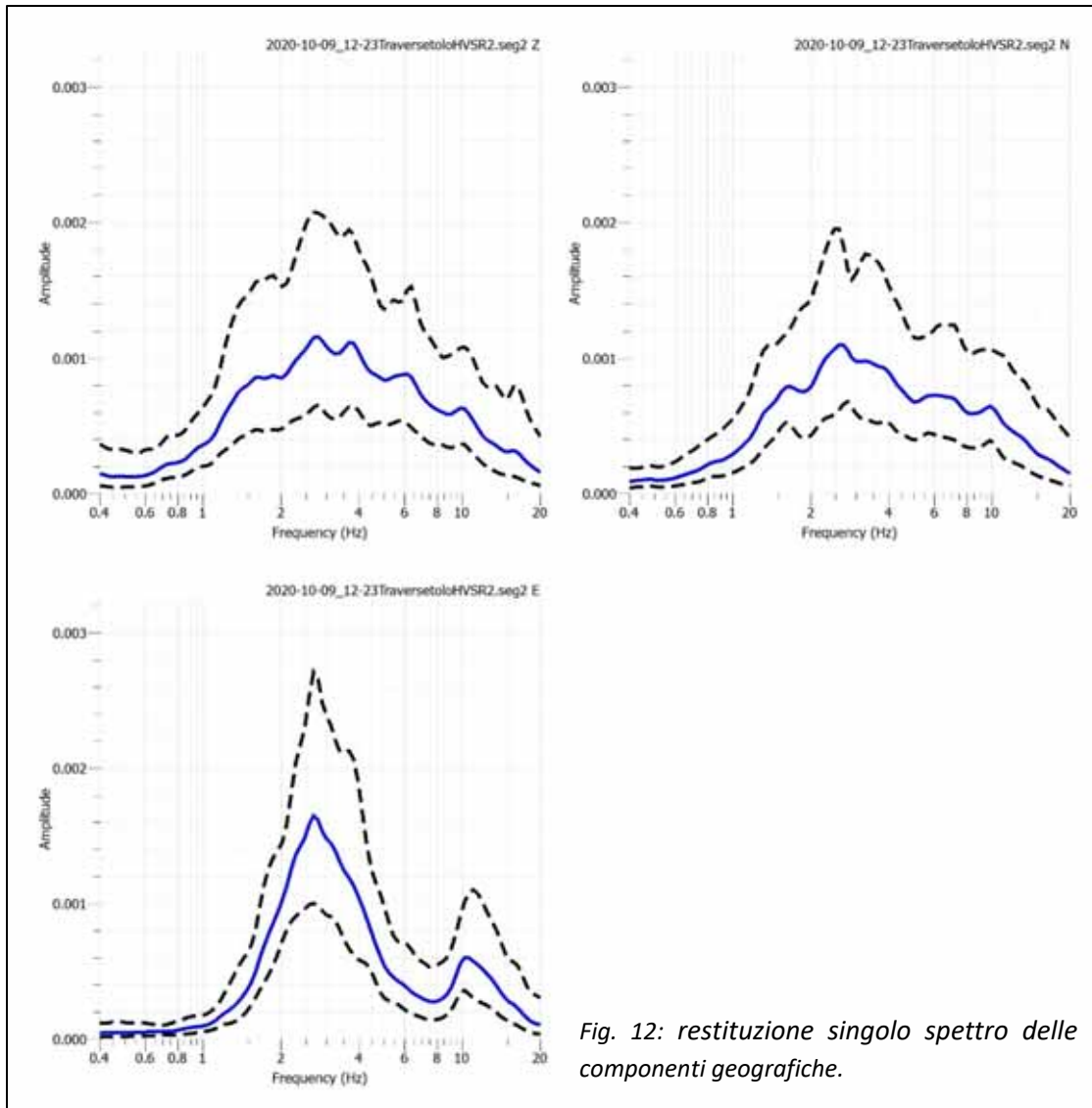
Misura dei rapporti spettrali HVSR - Horizontal to Vertical Spectral Ratio (ipotesi di nakamura)

Per l'elaborazione dei dati sismici è stato utilizzato il software **“Geopsy”**. Il progetto **“Geopsy”** distribuisce tutti i software sviluppati nell'ambito di un pacchetto chiamato **“Sesarray”**. Esso contiene diversi strumenti si occupano di tutti gli aspetti del trattamento di vibrazioni ambientali per la caratterizzazione del suolo. Le principali applicazioni contenute all'interno di **“Sesarray”** sono **“Geopsy”** e **“Dinver”**.

L'interpretazione dei dati misurati ha consentito di valutare la frequenza caratteristica del sito che, nel caso esaminato, risulta contraddistinta da una discontinuità sismica ben marcata, individuata in entrambi i punti di registrazione (Hvsr1 e Hvsr2, vedi *fig. 2*) associabile a un contatto stratigrafico con argille compatte marine, posto tra 30 – 33 m ($f_1 = 2.5 \text{ Hz}$ - *fig. 11*); ne viene individuato anche uno minore, indicativo del passaggio superficiale con il primo livello di ghiaia ($f_1 = 13.2 \text{ Hz}$).



In *fig. 12* vengono riportate le 3 componenti dello spettro (Vertical, North and East) e il grafico relativo alla loro somma (*fig. 13*), mentre in *fig. 14* si riporta la continuità del segnale rispetto ai punti cardinali, infine, in *fig. 15* i criteri per determinare la qualità della registrazione Hvsr (Criteri di Sesame).



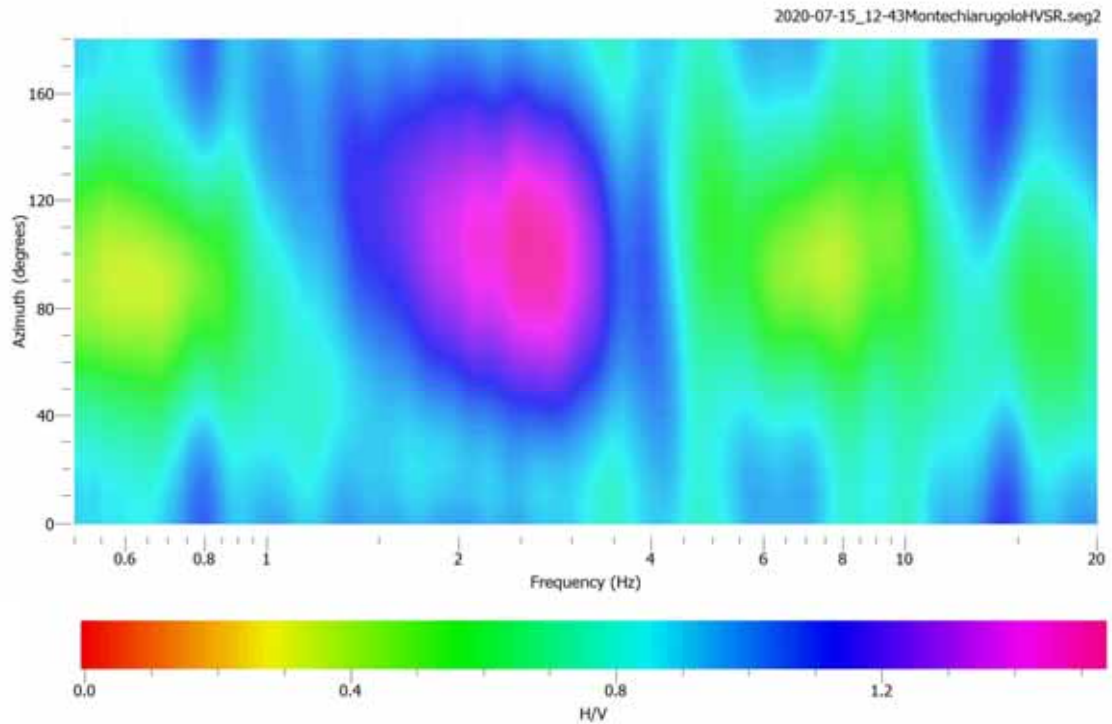


Fig. 14: continuità del segnale rispetto ai punti cardinali.

CRITERI SESAME [European Research project,2004]

fo		2,28		
Ao		1,31		
	Valore	Rif	Esito	criteri
fo>10/Lw	2,28	0,21	OK	criteri per una curva H/V affidabile
nc(fo)>200	535,80	200,00	OK	
$\sigma A(f) \leq 2$ per $0,5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ oppure $\sigma A(f) \leq 3$ per $0,5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$	superato	10,00	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro				
f(-)=fo/4	0,57			criteri per un picco H/V chiaro
f(+)=f0*4	9,12			
Ao(f-)	0,56			
Ao(f+)	0,68			
Ao/Ah/v(f-)>2	2,34	2,00	OK	
Ao/Ah/v(f+)>2	1,92	2,00	NO	
Ao>2	1,31	2,00	NO	
fpicco[AH/V(f)±sA(f)]=fo±5%	0,00	2,39	OK	
	2,19	2,17	OK	
dev.sta.	1,00			
range di frequenza	0,00			
$\sigma(f_0)$		0,57		
$\sigma f < s(f_0)$			NO	
$\Theta(f_0)$		3,00		
$\sigma A(f_0)$	1,06			
$\sigma A(f_0) < \Theta(f_0)$			OK	

Fig. 15: quadro complessivo dei criteri Sesame per la qualità di registrazione prova Hvsr.

Risposta Sismica Locale (RSL)

Tenendo presente le ultime indicazioni riportate nel DM 17/01/2018 in merito alle procedure da seguire per un approfondimento del problema sismico, si procede operando con gli accelerogrammi del sito (messi a disposizione dalla Regione Emilia Romagna) con il codice di calcolo EERA, che per quanto riguarda l'area in oggetto si prende in considerazione il comune di Traversetolo (PR), per cui sono disponibili i dati relativi ai seguenti accelerogrammi: 000046xa_034042Traversetolo.xy; 000126xa_034042Traversetolo.xy; 000354xa_034042Traversetolo.xy.

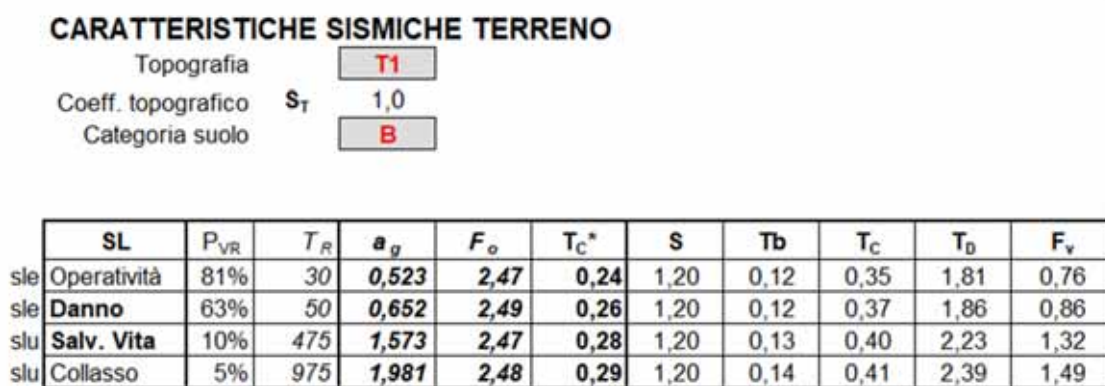


Fig. 16: quadro sismico d'entrata, in funzione della classificazione sismica analizzata nel paragrafo precedente e dagli spettri ministeriali

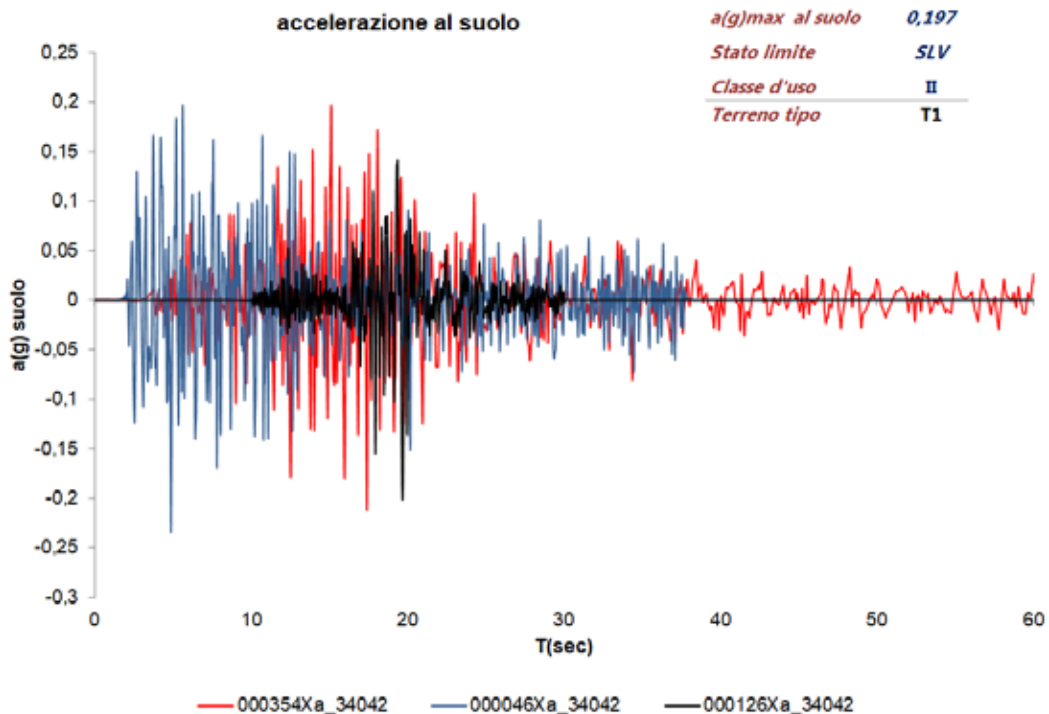


Fig. 17: accelerazione sismica ($a_g = 0.197$), desunta dallo studio di RSL locale

Inserendo i dati dei tre accelerogrammi nel codice di calcolo EERA, si ottengono gli spettri di accelerazione al suolo riportati in *fig. 18*; mentre il coefficiente di amplificazione spettrale (F_0), mediando il valore ricavato dai 3 accelerogrammi risulta (*fig. 19*):

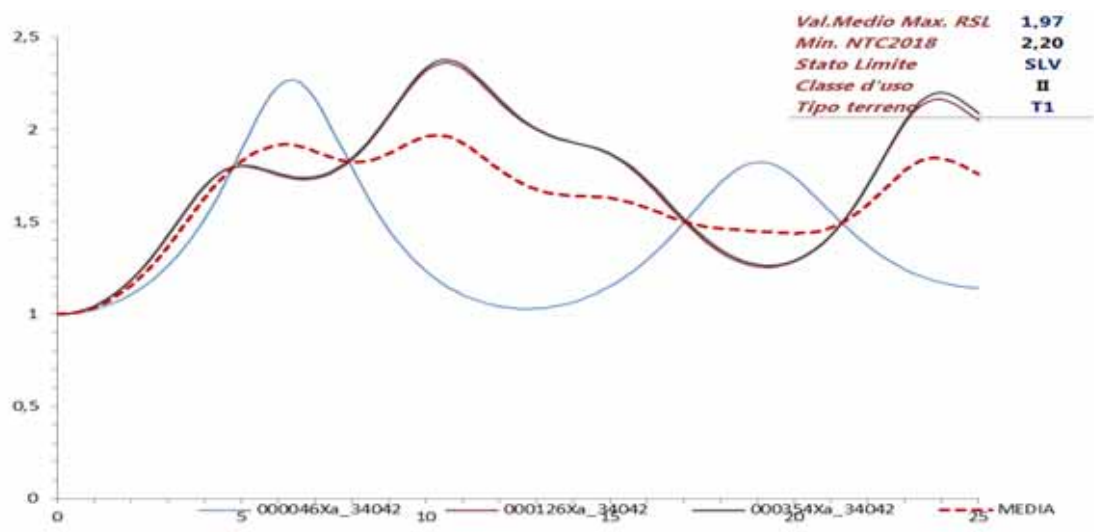


Fig. 18: coefficiente di amplificazione spettrale.

I Valori caratteristici dello spettro sono:

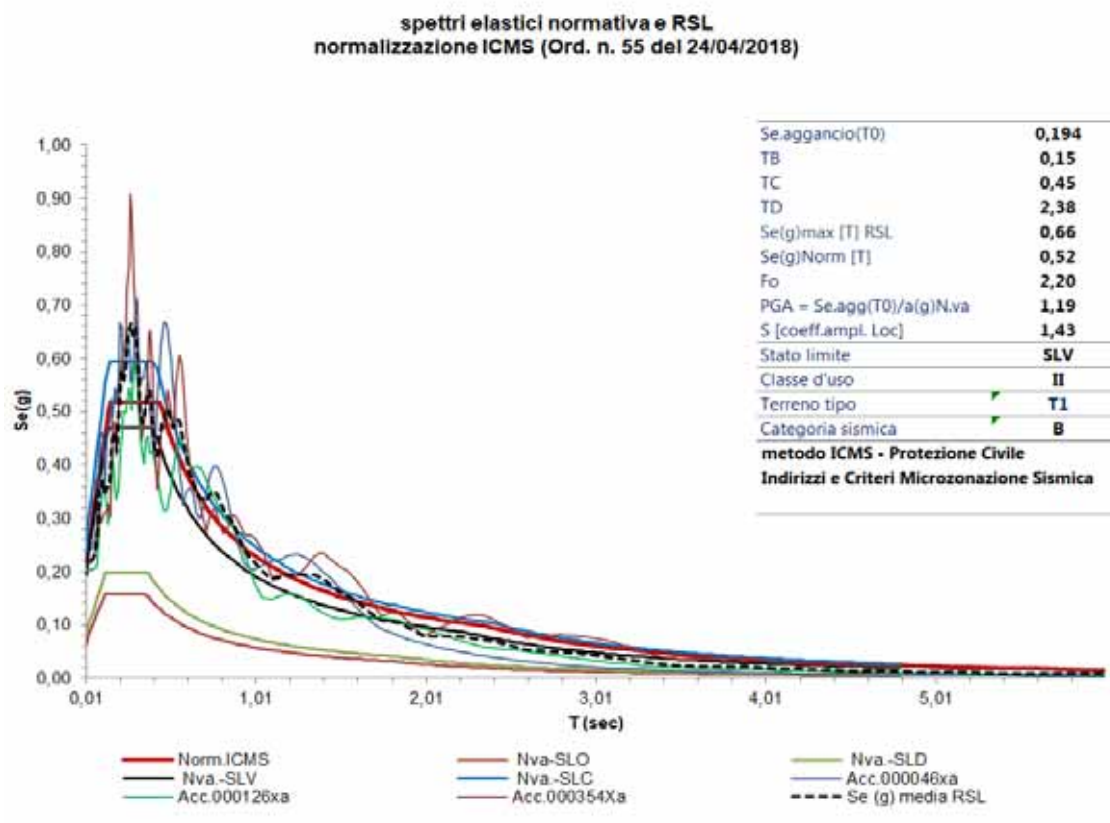


Fig. 19: spettri elastici del sottosuolo ottenuti dalla rielaborazione di ogni accelerogramma e spettro medio (in rosso)

RISPOSTA SISMICA LOCALE

Stato limite	SLV
Classe d'uso	II
Codice per la RSL :	EERA
Topografia	T1
categoria sismica	B
Spettro normalizzato	ICMS

Se.aggancio(T0)	0,19
TB	0,15
TC	0,45
TD	2,38
Se(g)max [T] RSL	0,66
Se(g)Norm [T]	0,52
Fo	2,20
PGA = Se.agg(T0)/a(g)	1,19
S	1,43

COEFFICIENTI DI HOUSNER

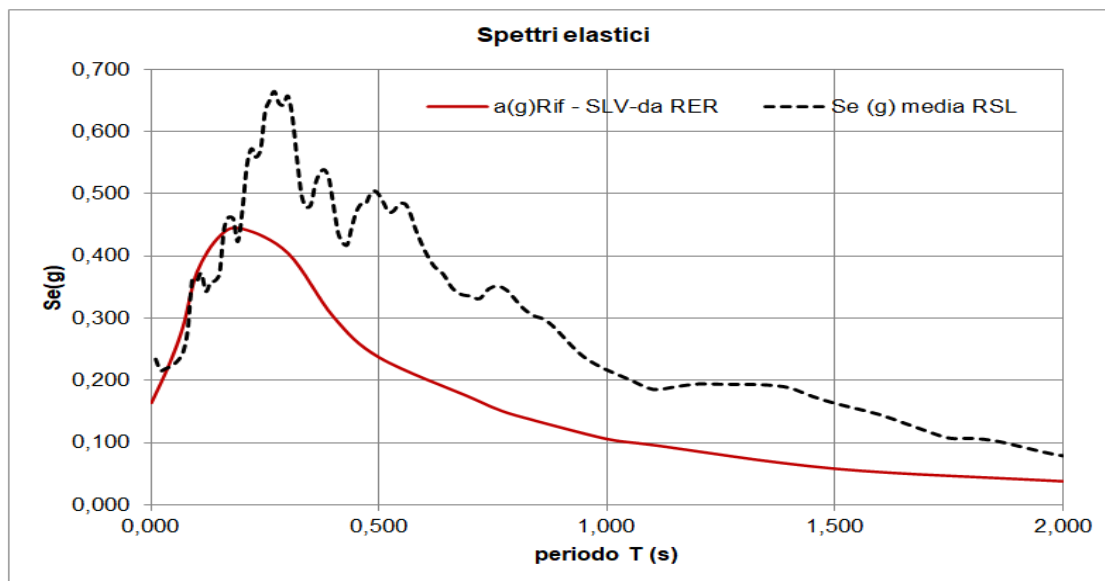
0,1 < T < 0,5	1,92
0,5 < T < 1,00	1,18
0,5 < Tc < 1,5	1,12

Per quanto riguarda i *Coefficienti di Housner*, inserendo l'accelerogramma che fornisce lo spettro più prossimo a quello medio e scegliendo opportunamente i sublayer e la loro posizione (inside o outcrop), si trova la pseudo relativa velocity nell'ambito dei periodi compresi fra 0,1 - 0,5 s / 0,5 - 1.0 s / 0,5 - 1.5 s. Il rapporto fra la sommatoria dei valori relativi alla superficie e quelli del substrato, nell'ambito dei due intervalli sopra citati, fornisce l'intensità di Housner (fig. 20), e si allega anche lo spettro delle amplificazioni SA" (DGR 630 del 29/04/2019, fig. 21).

← Fig. 20: tabulato riepilogativo dell'analisi della Risposta Sismica Locale con i coefficienti di Housner

Intensità Spettrale - **fattori di amplificazione "SA"** (Del.630 del 29/04/2019)

SA1	SA2	SA3	SA4	PGA
0,1 < T <= 0,5	0,4 < T <= 0,8	0,7 < T <= 1,1	0,5 < T <= 1,5	
1,309	1,404	2,133	2,171	1,185



PGA - rapporto fra acc. max. orizz. "T0" al suolo di riferimento e acc. Max. orizz. "T0" alla superficie suolo
SA - rapporto fra integrale spettro in acc. al suolo ed integrale spettro in acc. al suolo di riferimento

Fig. 21: fattori di amplificazione secondo le indicazioni del DGR 630 del 29/04/2019

Infine si confronta lo spettro di risposta sismica locale di “sito” con lo spettro riportato per il comune di Traversetolo, nel DM 14/01/2008 (uguali e non variati rispetto al DM 17/01/2018), in modo da ottenere lo spettro normalizzato secondo le indicazioni dell'ICMS (fig. 22).

NORMALIZZAZIONE ICMS							
T	Se(g) Norm.	T	Se(g) Norm.	T	Se(g) Norm.	T	Se(g) Norm.
0,010	0,2159	0,390	0,5163	0,960	0,2394	3,200	0,0533
0,020	0,2376	0,400	0,5163	0,980	0,2345	3,300	0,0502
0,030	0,2593	0,410	0,5163	1,000	0,2298	3,400	0,0473
0,040	0,2810	0,420	0,5163	1,050	0,2189	3,500	0,0446
0,050	0,3027	0,430	0,5163	1,100	0,2089	3,600	0,0421
0,060	0,3244	0,440	0,5163	1,150	0,1999	3,700	0,0399
0,070	0,3461	0,450	0,5107	1,200	0,1915	3,800	0,0378
0,080	0,3678	0,460	0,4996	1,250	0,1839	3,900	0,0359
0,090	0,3895	0,470	0,4890	1,300	0,1768	4,000	0,0341
0,100	0,4112	0,480	0,4788	1,350	0,1702	4,100	0,0325
0,110	0,4329	0,490	0,4691	1,400	0,1642	4,200	0,0310
0,120	0,4546	0,500	0,4597	1,450	0,1585	4,300	0,0295
0,130	0,4763	0,510	0,4507	1,500	0,1532	4,400	0,0282
0,140	0,4981	0,520	0,4420	1,550	0,1483	4,500	0,0270
0,150	0,5163	0,530	0,4337	1,600	0,1436	4,600	0,0258
0,160	0,5163	0,540	0,4256	1,650	0,1393	4,700	0,0247
0,170	0,5163	0,550	0,4179	1,700	0,1352	4,800	0,0237
0,180	0,5163	0,560	0,4104	1,750	0,1313	4,900	0,0228
0,190	0,5163	0,570	0,4032	1,800	0,1277	5,000	0,0219
0,200	0,5163	0,580	0,3963	1,850	0,1242	5,100	0,0210
0,210	0,5163	0,600	0,3831	1,900	0,1210	5,200	0,0202
0,220	0,5163	0,620	0,3707	1,950	0,1179	5,400	0,0187
0,230	0,5163	0,640	0,3591	2,000	0,1149	5,600	0,0174
0,240	0,5163	0,660	0,3482	2,050	0,1121	5,800	0,0162
0,250	0,5163	0,680	0,3380	2,100	0,1094	6,000	0,0152
0,260	0,5163	0,700	0,3283	2,150	0,1069	6,200	0,0142
0,270	0,5163	0,720	0,3192	2,200	0,1045	6,400	0,0133
0,280	0,5163	0,740	0,3106	2,250	0,1021	6,600	0,0125
0,290	0,5163	0,760	0,3024	2,300	0,0999	6,800	0,0118
0,300	0,5163	0,780	0,2947	2,350	0,0978	7,000	0,0111
0,310	0,5163	0,800	0,2873	2,400	0,0948	7,200	0,0105
0,320	0,5163	0,820	0,2803	2,500	0,0874	7,400	0,0100
0,330	0,5163	0,840	0,2736	2,600	0,0808	7,600	0,0095
0,340	0,5163	0,860	0,2673	2,700	0,0749	7,800	0,0090
0,350	0,5163	0,880	0,2612	2,800	0,0697	8,000	0,0085
0,360	0,5163	0,900	0,2554	2,900	0,0650	8,500	0,0076
0,370	0,5163	0,920	0,2498	3,000	0,0607	9,000	0,0067
0,380	0,5163	0,940	0,2445	3,100	0,0568	9,500	0,0061
stato limite	SLV	Classe d'uso	II	Terreno		T1	

Fig. 22: spettro di risposta locale (normalizzazione ICMS).

Liquefazione e cedimenti post-sismici

Il fenomeno della liquefazione si verifica quando (*tra parentesi si riportano le condizioni di sito*):

- la magnitudo del sisma è uguale o superiore a 5.0 ($M_w = 5.9$);
- l'accelerazione al suolo $a(g)$ è uguale o superiore a 0.2 ($a_g = 0.197$, *pertanto < 0.2*);
- i depositi sabbiosi (e/o incoerenti) si trovano a profondità inferiori o uguale a 15 m ed hanno una bassa densità relativa e uno spessore di almeno 1.00 m (*l'indagine di campagna e delle stratigrafie profonde escludono la presenza di orizzonti sabbiosi propriamente detti, ma sempre in matrice argillosa*);
- la falda è superficiale (nei primi 3.00 m – *l'indagine di campagna esclude la presenza di acqua in falda fino alla profondità di 12.6 m dal p.c.*).

Come descritto in precedenza, nel caso analizzato non si rinvenivano mai orizzonti prettamente sabbiosi, ma soltanto uno strato limo argilloso con qualche lente incoerente non rilevabile, pertanto, in tale situazione stratigrafica, risulta alquanto improbabile il verificarsi di un evento del genere.

In ogni modo la stima dei cedimenti dall'azione sismica nei terreni granulari saturi è la seguente:

La deformazione volumetrica (e verticale) ε_v nei terreni granulari saturi può essere stimata da prove CPT in funzione della resistenza penetrometrica di punta normalizzata e corretta, $(q_{c1N})_{cs}$ e del coefficiente di sicurezza alla liquefazione F_L con il grafico di Figura 3a (Zhang et al., 2002), e da prove SPT in funzione della resistenza SPT normalizzata e corretta $(N_1)_{60cs}$ e del rapporto di tensione ciclica CSR con il grafico di Figura 3b (Wu e Seed, 2004). Il cedimento post-sismico per ciascuno strato è dato da: $\Delta s_i = \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$.

In alternativa, la deformazione volumetrica, ε_v (espressa in decimali), può essere stimata mediante le seguenti espressioni (Idriss e Boulanger, 2008):

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(2.551 - 1.147 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max}) \quad \text{con } q_{c1Ncs} \geq 21$$

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(-0.369 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max})$$

in cui γ_{max} (decimale) è la massima deformazione di taglio indotta dall'azione sismica, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma_{max} = \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

dove G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale $G_0 (= \rho \cdot V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche in laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI, 2005).

A3. DEFINIZIONE E CALCOLO DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

L'indice del potenziale di liquefazione, I_L , è definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{in cui} \quad w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

z_{crit} è la profondità critica, ovvero la profondità massima entro la quale può verificarsi la liquefazione, che di norma si assuma pari a 20 m.

La variabile $F(z)$ vale (Sonmez, 2003):

$$\begin{aligned} F(z) &= 0 & \text{per} & \quad F_L \geq 1.2 \\ F(z) &= 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L) & \text{per} & \quad 1.2 > F_L \geq 0.95 \\ F(z) &= 1 - F_L & \text{per} & \quad F_L \leq 0.95 \end{aligned}$$

Tenuto conto della massima magnitudo attesa ($M_w = 5.9$) e dell'accelerazione locale ($a_g = 0.197$)⁴, il grafico relativo ai cedimenti post sismici, ricavato con la restituzione delle verticali penetrometriche, considerate separate e la somma delle due componenti (argille e locali intercalazioni sabbiose), risultano tutti **null**i, analogamente all'indice di liquefazione (*fig. 23*)⁵.

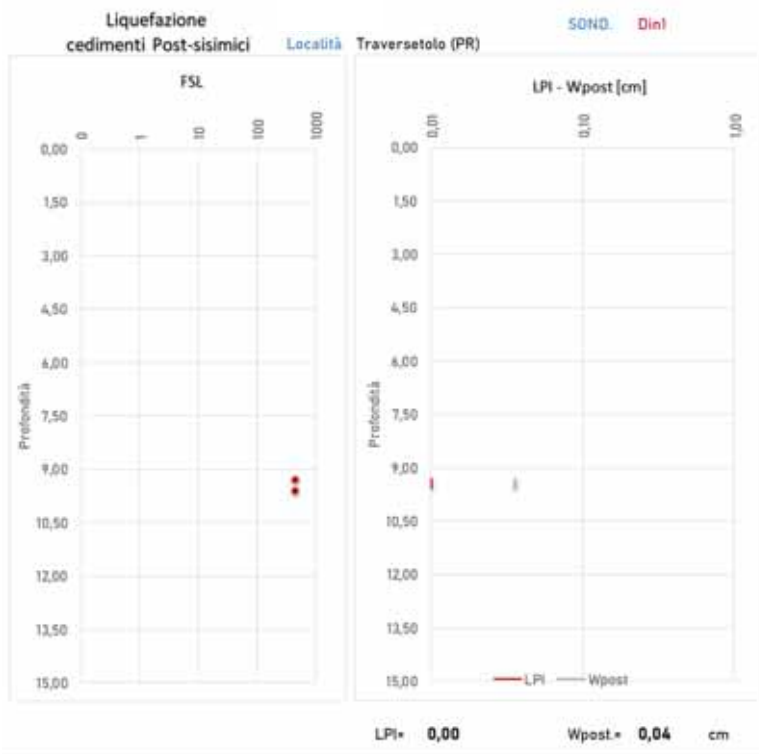


Fig. 23: indice LPI e cedimenti post sismici relativi alla verticale **D1**.

⁴ Valore desunto dall'analisi sismica locale

⁵ I tabulati e grafici relativo all'analisi di liquefazione sono riportati in allegato.

Relazione Geotecnica: indagini, caratterizzazione e modellazione volume significativo del sito

Caratterizzazione Geotecnica

Per la realizzazione dell'intervento, come si estrapola dalla normativa, bisogna evidenziare il volume significativo del terreno interessato dall'intervento, ed eventualmente dall'azione dei carichi di esercizio, pertanto, in questa sede vengono analizzati i parametri geotecnici relativi alla stratigrafia illustrata in *fig. 5*; a tal proposito, i valori ricavati dalla restituzione delle prove penetrometriche, secondo il 5 percentile, sono riportati in *fig. 24, 25, 26 e 27*.

Comm. ??		Località Traversetolo (PR)		data 09/10/2020		SOND. Din1		Falda nr				
da	a	natura	ps	c _u	c'	D _r	φ	E _{st}	K ₀	V _s	v	E _v
			t/m3	Kg/cm²	Kg/cm²	%		Kg/cm²	Kg/cm3	m/s		Kg/cm²
0	2,7	limi sabbiosi teneri	1,72	0,40	0,08	-	18	51	0,34	183	0,43	15
2,7	5,7	limi arg.teneri	1,74	0,44	0,09	-	18	45	0,37	174	0,43	12
5,7	7,5	argille lim.med.comp	1,90	0,62	0,12	-	19	68	0,92	213	0,39	29
7,5	9	argille med.comp.	2,06	1,27	0,25	-	23	104	2,12	266	0,31	71
9	9,6	Ghiaia argillosa	1,98	-	-	67	36	430	20,59	283	0,28	320

Fig. 24: parametri geotecnici relativi alla restituzione della prova **D1** (in rosso si evidenziano i parametri geotecnici da considerare per la stima della portata di esercizio).

Comm. ??		Località Traversetolo (PR)		data 09/10/2020		SOND. Din2		Falda nr				
da	a	natura	ps	c _u	c'	D _r	φ	E _{st}	K ₀	V _s	v	E _v
			t/m3	Kg/cm²	Kg/cm²	%		Kg/cm²	Kg/cm3	m/s		Kg/cm²
0	0,6	limi sabbiosi teneri	1,56	0,18	0,04	-	18	32	0,14	141	0,45	3
0,6	2,1	limi arg.teneri	1,75	0,51	0,10	-	21	60	0,44	200	0,41	21
2,1	8,1	argille lim.med.comp	1,92	0,71	0,14	-	19	71	0,84	221	0,39	33
8,1	9,6	argille med.comp.	2,05	1,27	0,25	-	23	103	2,24	263	0,31	71
9,6	10,5	Ghiaia argillosa	2,01	-	-	67	36	434	21,46	287	0,28	322

Fig. 25: parametri geotecnici relativi alla restituzione della prova **D2**; in rosso lo strato di riferimento su cui insistere con le fondazioni (nastriformi) del nuovo edificio.

Comm. ??		SOND. Din3										
Località Traversetolo (PR)		Falda nr										
data 09/10/2020												
da	a	natura	ps t/m3	c _u Kg/cm²	c' Kg/cm²	D _r %	φ	E _{se} Kg/cm²	K _s Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm²
0	1,5	limi sabbiosi teneri	1,64	0,25	0,05	-	18	39	0,20	159	0,45	6
1,5	2,1	limi arg.teneri	1,67	0,40	0,08	-	19	51	0,37	182	0,41	15
2,1	5,7	argille lim.med.comp	1,84	0,64	0,13	-	20	63	0,63	207	0,40	26
5,7	8,4	argille med.comp.	2,03	1,01	0,20	-	20	91	1,55	249	0,34	55
8,4	9	Ghiaia argillosa	1,98	-	-	67	36	431	20,23	283	0,28	320

Fig. 26: parametri geotecnici relativi alla restituzione della prova **D3**; in rosso lo strato di riferimento su cui insistere con le fondazioni (nastriiformi) del nuovo edificio.

Comm. ??		SOND. Din4										
Località Traversetolo (PR)		Falda nr										
data 09/10/2020												
da	a	natura	ps t/m3	c _u Kg/cm²	c' Kg/cm²	D _r %	φ	E _{se} Kg/cm²	K _s Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm²
0	1,8	limi sabbiosi teneri	1,70	0,41	0,08	-	18	50	0,32	180	0,43	16
1,8	4,5	limi arg.teneri	1,71	0,45	0,09	-	18	43	0,31	170	0,43	11
4,5	6	argille lim.med.comp	1,79	0,42	0,08	-	19	53	0,55	189	0,42	15
6	8,1	argille med.comp.	2,00	0,91	0,18	-	19	85	1,39	241	0,35	48
8,1	9,6	Ghiaia argillosa	2,03	-	-	68	37	426	20,39	286	0,28	317

Fig. 27: parametri geotecnici relativi alla restituzione della prova **D4** realizzata in aderenza all'edificio pericolante esistente, che evidenzia la presenza di uno strato superficiale ricco in matrice sabbiosa simile a quello rilevato dalla verticale D1.

Ipotesi di intervento con fondazioni superficiali in funzione dell'area indagata, e parametri geotecnici del substrato di riferimento

Per la varietà, tipologia e consistenza del primo strato di terreno rilevato dalle prove penetrometriche, si valuta per ogni unità abitativa la scelta dei basamenti più idonei, in funzione dei futuri assestamenti post-edificazione; mentre per i fabbricati indagati dai sondaggi D2 e D3 (fig. 28) non vi sono problemi particolari, in quanto a 1.5 m di profondità si individuano limi argillosi teneri, per uno spessore limitato (0.6 m), con caratteristiche medio-basse, ma sufficienti per strutture a un piano (leggere) con fondazioni nastriiformi.

In corrispondenza delle verticali D1 e D4, lo spessore di limi argillosi teneri viene rilevato oltre 5 m di profondità, con i primi 2 m superficiali ricchi in matrice sabbiosa, che conferisce alla stessa basse qualità geotecniche; per quanto concerne il fabbricato che sorgerà nell'area interessata dalla prova D1, si consiglia di realizzare lo stesso su una fondazione a platea, per distribuire in modo omogeneo il carico di esercizio e mitigare gli assestamenti futuri.

Per quanto riguarda l'area interessata dal fabbricato esistente (in parte lesionato) e analizzata dal sondaggio D4, si sconsiglia di adibirla a nuova edificazione perché il terreno sottostante, è caratterizzato dalla stessa litologia "tenera" di cui sopra (D1), con l'aggravante di risultare sovraconsolidata per il carico trasmesso dalla struttura in essere, pertanto qualunque nuovo intervento sarebbe interessato dalla ripresa di cedimenti localizzati, a meno di rimuovere ovunque almeno 5 metri di terreno, per insistere direttamente sulle litologie più competenti

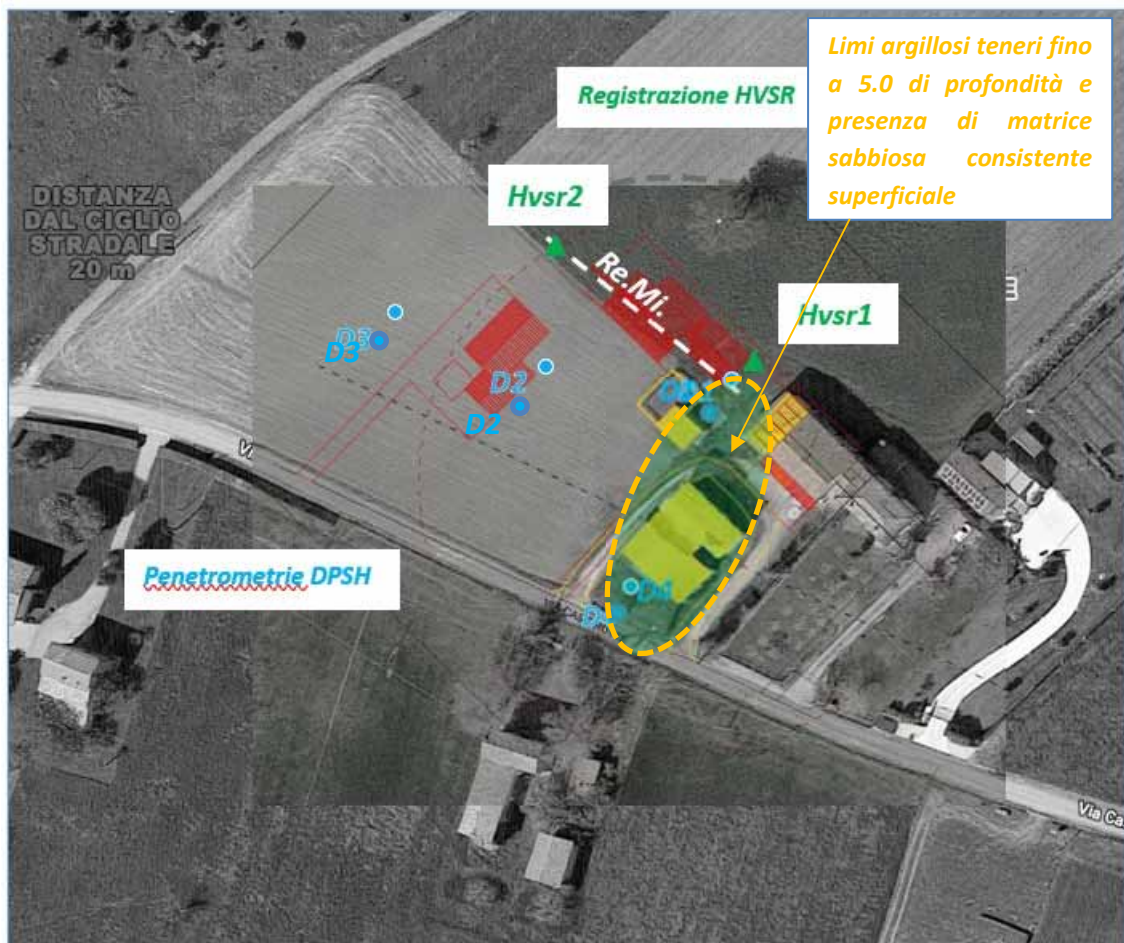


Fig. 28: collocazione area caratterizzata dalla presenza di limi argillosi teneri fin oltre i 5 m di profondità contraddistinti da una matrice sabbiosa consistente in superficie.

Con riferimento alla caratterizzazione geotecnica desunta dalla restituzione delle prove penetrometriche, si assegnano ai limi argillo-sabbiosi teneri i seguenti parametri:

- Peso specifico (γ): 1.70 kg/cm³;
- Coesione non drenata c_u : 0.42 kg/cm²;
- Angolo di attrito interno (ϕ): 19°;

I parametri sopra riportati possono essere indistintamente usati sia per lo scenario con fondazioni continue (fabbricati esaminati dalle verticali D2 e D3), sia per quello in cui si consiglia di realizzare una platea basale (verticale D1). Il piano di posa dei fabbricati con le nastriformi deve essere impostato a 1.5 m dal p.c. attuale, mentre quello con platea può bastare 1.2 m dal p.c.

In via indicativa, utilizzando i parametri di cui sopra, mediante metodo di *Brinch-Hansen & Paolucci – Pecker*, si procede alla stima della portata limite ultima del terreno di fondazione sia a lungo termine (*fig. 29*) che a breve termine (*fig. 30*), per basamenti nastriformi a **1.5 m dal p.c.**

FONDAZIONE		TERRENO		SISMICA
Incastro "D" [m]	1,5	ps [t/mc]	1,7	a(g)suolo
Larghezza "B" [m]	1,0	CU [Kg/cm ²]	0,42	Kh [SLV]
Lunghezza "L" [m]	10,0	C' [Kg/cm ²]	0,08	Kv
Forze verticali "N" [t/ml]	0	ϕ	18	
Forze orizzontali "H" [t/ml]	0	inclinazione p.c." ω "	0	
CONDIZIONE A LUNGO TERMINE	[G]enerale [P]endio [M]uri	G	APPROCCIO 2	C' [Kg/cm ²] 0,08
				ϕ 18,00
				R3 2,3

da Brinch-Hansen & Paolucci - Pecker

$$\begin{aligned}
 N_q &= \frac{1 + \sin. \phi}{1 - \sin. \phi} e^{\pi \tan. \phi} & 5,25 \\
 N_\gamma &= 2 \cdot (N_q + 1) \tan. \phi & 4,06 \\
 N_c &= (N_q - 1) \cotan. \phi & 13,09 \\
 m &= \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} & 1,91 \\
 i_\gamma &= \left[1 - \frac{H}{N + BL \cdot C \cot. \phi} \right]^{(m+1)} & 1,00
 \end{aligned}$$

$S\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L}$					0,96
$Sq = 1 + \frac{B}{L} \tan. \varphi$					1,03
$Sc = 1 + 0,2 \frac{B \cdot Nq}{L \cdot Nc}$					1,01
$iq = \left[1 - \frac{H}{N + BL \cdot C \cdot \cot. \varphi} \right]^m$					1,00
$dq = 1 + 2 \frac{D}{B} \tan. \varphi \cdot (1 - \sin. \varphi)^2$ se "D/B" ≤ 1,00					
$dq = 1 + 2 \tan. \varphi \cdot (1 - \sin. \varphi)^2 \cdot \text{Arctan.} \frac{D}{B}$ se "D/B" > 1,00	D/B=	1,50			1,30
$dc = dq - \frac{1 - dq}{Nc \cdot \tan. \varphi}$					1,38
$ic = iq - \frac{1 - iq}{N \tan. \varphi}$					1,00
$d\gamma = 1,00$					1,00
$hcf = 1 - 0,32 \cdot Kh$					1,00
$gq = g\gamma = (1 - \tan. \omega)^2$					0,98
$gc = gq - \frac{1 - gq}{N \tan. \varphi}$					0,98
$Hqf = h\gamma f = \left(1 - \frac{Kh}{\tan. \varphi} \right)^{0,35}$					0,94
Q.es. = Kg/cmq					
$\frac{CNc \cdot Sc \cdot dc \cdot ic \cdot gc \cdot hcf + \gamma D \cdot Nq \cdot Sq \cdot dq \cdot iq \cdot gq \cdot hqf + 0,5B \cdot N\gamma \cdot S\gamma \cdot d\gamma \cdot i\gamma \cdot g\gamma \cdot h\gamma f}{R}$					1,44
Coefficiente di sottofondo verticale "Ko" da Bowles [Kg/cm ²]					1,32

Fig. 29: portata limite ultima a lungo termine, per fondazioni nastriformi realizzate nei limi argillosi teneri, a -1.5 m dal p.c.

FONDAZIONE		TERRENO		SISMICA	
Incastro "D" [m]	1,5	ps [t/mc]	1,70	a(g)suolo	0,20
Larghezza "B" [m]	1,0	CU [Kg/cm ²]	0,42	Kh [SLV]	0,06
Lunghezza "L" [m]	10,0	inclinazione p.c. (ω)	0,00	Kv	0,03
eccentricità	Forze verticali "N" [t/ml]	0,00			
	Forze orizzontali "H" [t/ml]	0,00			
				CU [Kg/cm ²]	0,42
CONDIZIONE	[G]enerale [P]endio [M]uri	G	APPROCCIO 2	R3	2,30
A BREVE TERMINE					
Nc=					5,14
$Sc = 1 + 0,2 \frac{B}{L}$					1,02

$dc = 1 + 0,4 \cdot \frac{D}{B}$ per $B \geq D$		1,39
$dc = 1 + 0,4 \cdot \arctan \frac{D}{B}$ per $B < D$		
$m = \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}}$		1,91
$ic = 1 - \frac{mH}{BL \cdot CUNc}$		1,00
$gc = 1 - \frac{2\omega}{\pi + 2}$		1,00
$hcf = 1 - 0,32 \cdot Kh$		0,98
$Q. es. = \frac{CU \cdot Nc \cdot dc \cdot ic \cdot gc \cdot hcf + \gamma D}{R}$	Kg/cm ^q	1,42
<hr/>		
Coefficiente di sottofondo Verticale da Bowles : $Ko = 40(SF)qa$	Kg/cm ³	1,31
dove : SF = coefficiente di riduzione = 2.30		
qa = portata limite di esercizio		

Fig. 30: portata limite ultima a breve termine, per fondazioni nastriformi realizzate nei limi argillosi teneri, a -1.5 m dal p.c.

Conclusioni

La presente indagine, con riferimento alla modellazione geologica, stratigrafica, sismica e idrogeologica del volume significativo di terreno, effettuata a Traversetolo (PR), per la realizzazione di tre nuovi fabbricati in un lotto di proprietà, espletata mediante la realizzazione di n°4 penetrometrie dinamiche DPSH, n°1 acquisizione passiva ai microtremori (Re.Mi.) e n°2 registrazioni delle frequenze naturali del terreno (Hvsr), ha permesso di restituire il seguente quadro:

- 1) nell'area esaminata si intercalano litologie limo-argillose e/o argillo-limose, e orizzonti ghiaio-argillosi; nella fattispecie, i livelli incoerenti sono costituiti da ghiaie argillose, mentre la copertura è costituita da limi argillo-sabbiosi, di medio basse caratteristiche geotecniche. Nell'area esaminata è stata rilevata una spiccata variazione laterale di facies, ossia i primi metri sono caratterizzati localmente da una matrice sabbiosa predominante in 2 sondaggi (D1 e D4), e praticamente assente negli altri (D2 e D3);
- 2) la ricostruzione stratigrafica di superficie, ricavata dalla restituzione delle prove penetrometriche realizzate nell'area interessata dall'intervento,

confermano la natura alluvionale della copertura, ossia limi argillo-sabbiosi, poi argille limose fino a incontrare il primo orizzonte di ghiaia (con matrice argillosa sempre presente) e anche la spiccata eteropia laterale della stessa successione, diversa da NW a SE. Oltre a variare nettamente le quote dei contatti stratigrafici, a SE, in prossimità delle verticali D1 e D4 si evidenzia la presenza di limi argillo-sabbiosi di basse qualità geotecniche fino a 3.0 m di profondità;

- 3) la profondità (in m s.l.m.) del limite basale dei sedimenti quaternari continentali, evidenzia un substrato marino (bedrock sismico) posto ad una profondità prossima ai 60 m dal p.c.;
- 4) nei fori di sondaggio (09/10/2020), e nelle trincee esplorative (13/11/2020), **non è stata rilevata** presenza di acqua in falda e il rilevamento di campagna e l'analisi della cartografia esistente non evidenzia alcun fenomeno di detensionamento superficiale in atto (corpi franosi), pertanto il lotto è **stabile**.
- 5) Per la varietà, tipologia e consistenza del primo strato di terreno rilevato dalle prove penetrometriche, si valuta per ogni unità abitativa la scelta dei basamenti più idonei, in funzione dei futuri assestamenti post-edificazione: mentre per i fabbricati indagati dai sondaggi D2 e D3 non vi sono problemi particolari, in quanto a 1.5 m di profondità si individuano limi argillosi teneri, con spessore limitato (0.6 m), e caratteristiche medio-basse, ma sufficienti per strutture a un piano (leggere) con fondazioni nastriformi;
- 6) in corrispondenza delle verticali D1 e D4, lo spessore di limi argillosi teneri viene rilevato oltre 5 m di profondità, con i primi 2 m superficiali ricchi in matrice sabbiosa, che conferisce alla stessa basse qualità geotecniche; per quanto concerne il fabbricato che sorgerà nell'area interessata dalla prova D1, si consiglia di realizzare lo stesso su una fondazione a platea, per distribuire in modo omogeneo il carico di esercizio e mitigare gli assestamenti futuri;

- 7) per quanto riguarda l'area interessata dal fabbricato esistente (in parte lesionato) e analizzata dal sondaggio D4, si sconsiglia di adibirla a nuova edificazione perché il terreno sottostante, è caratterizzato dalla stessa litologia "tenera" di cui sopra (D1), con l'aggravante di risultare sovraconsolidata per il carico trasmesso dalla struttura in essere, pertanto qualunque nuovo intervento sarebbe interessato dalla ripresa di cedimenti localizzati, a meno di rimuovere ovunque almeno 5 metri di terreno, per insistere direttamente sulle litologie più competenti;
- 8) con riferimento alla caratterizzazione geotecnica desunta dalla restituzione delle prove penetrometriche, si assegnano ai limi argillo-sabbiosi teneri i seguenti parametri:

- Peso specifico (γ): 1.70 kg/cm³;
- Coesione non drenata c_u : 0.42 kg/cm²;
- Angolo di attrito interno (ϕ): 19°;

I parametri sopra riportati possono essere indistintamente usati sia per lo scenario con fondazioni continue (fabbricati esaminati dalle verticali D2 e D3), sia per quello in cui si consiglia di realizzare una platea basale (verticale D1). Il piano di posa dei fabbricati con le nastriformi deve essere impostato a 1.5 m dal p.c. attuale, mentre quello con platea può bastare 1.2 m dal p.c.

- 9) In via indicativa, utilizzando i parametri di cui sopra, mediante metodo di *Brinch-Hansen & Paolucci – Pecker*, si procede alla stima della portata limite ultima del terreno di fondazione sia a lungo termine che a breve termine, per basamenti nastriformi a **1.5 m dal p.c.**:

<i>tipo di fondazione</i>	<i>A lungo termine (kg/cm²)</i>	<i>A breve termine (kg/cm²)</i>
nastriforme (piano di posa ≈ 1.5 m)	1.44	1.42

- 10) l'analisi sismica del sito (RSL):

- a) magnitudo attesa: **5.9**;
- b) le “ V_{s30} ” ricavate dalla prova Re.Mi. (**455 m/s**) pongono il sito in **classe B**;
- c) la restituzione della RSL (risposta sismica locale) per la definizione dei parametri sismici del sito è la seguente (normalizzazione ICMS):

RISPOSTA SISMICA LOCALE		Se.aggancio(T0)	0,19	COEFFICIENTI DI HOUSNER	
		TB	0,15		
Stato limite	SLV	TC	0,45	$0,1 < T < 0,5$	1,92
Classe d'uso	II	TD	2,38	$0,5 < T < 1,00$	1,18
Codice per la RSL :	EERA	Se(g)max [T] RSL	0,66	$0,5 < T < 1,5$	1,12
Topografia	T1	Se(g)Norm [T]	0,52		
categoria sismica	B	Fo	2,20		
Spettro normalizzato	ICMS	PGA = Se.agg(T0)/a(g)	1,19		
		S	1,43		

- d) l’accelerazione sismica attesa a livello di suolo (a_{go}) è: **0.197**;
- e) l’analisi delle frequenze caratteristiche del terreno risulta contraddistinta da una discontinuità sismica ben marcata, individuata in entrambi i punti di registrazione associabile a un contatto stratigrafico con argille compatte marine, posto tra 30 – 33 m ($f_1 = 2.5$ Hz - fig. 11). Ne viene individuato anche uno minore, indicativo del passaggio superficiale con il primo livello di ghiaia ($f_1 = 13.2$ Hz);
- f) nessun rischio di liquefazione, in quanto il substrato è privo di orizzonti sabbiosi, propriamente sciolti e i cedimenti post sismici risultano praticamente nulli ($LPI = 0.0$ e $W_{post} = 0.04$ cm).

Dott. Geol. Thomas GEMELLI

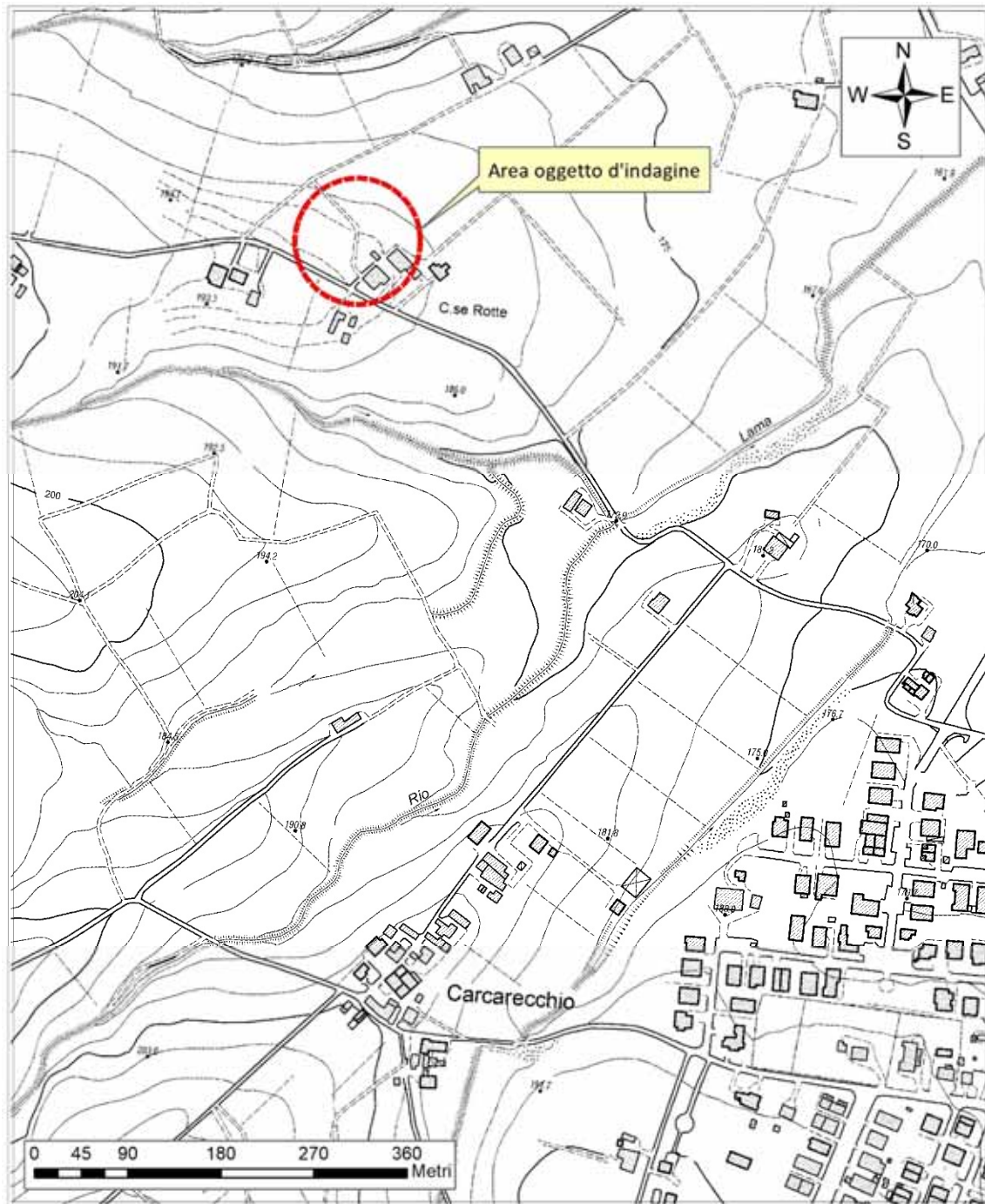
Albo Reg. Em. Rom. n° 1009



Allegati

Grafici ed elaborati relativi a:

- 1) Ubicazione dell'area indagata sulla base della Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) – *scala 1:5000* e Ortofoto AGEA 2012 - *scala 1:2.000*;
- 2) Istogrammi, grafici e principali parametri geotecnici desunti dalle prove penetrometriche realizzate (DPSH), relativi a:
 - resistenza all'infissione della punta (istogramma penetrometrico) e ricostruzione stratigrafica;
 - Tabulato Parametri geotecnici;



**Ubicazione sito sulla Carta Tecnica Regionale
(DBTR 2013)**

1:5.000

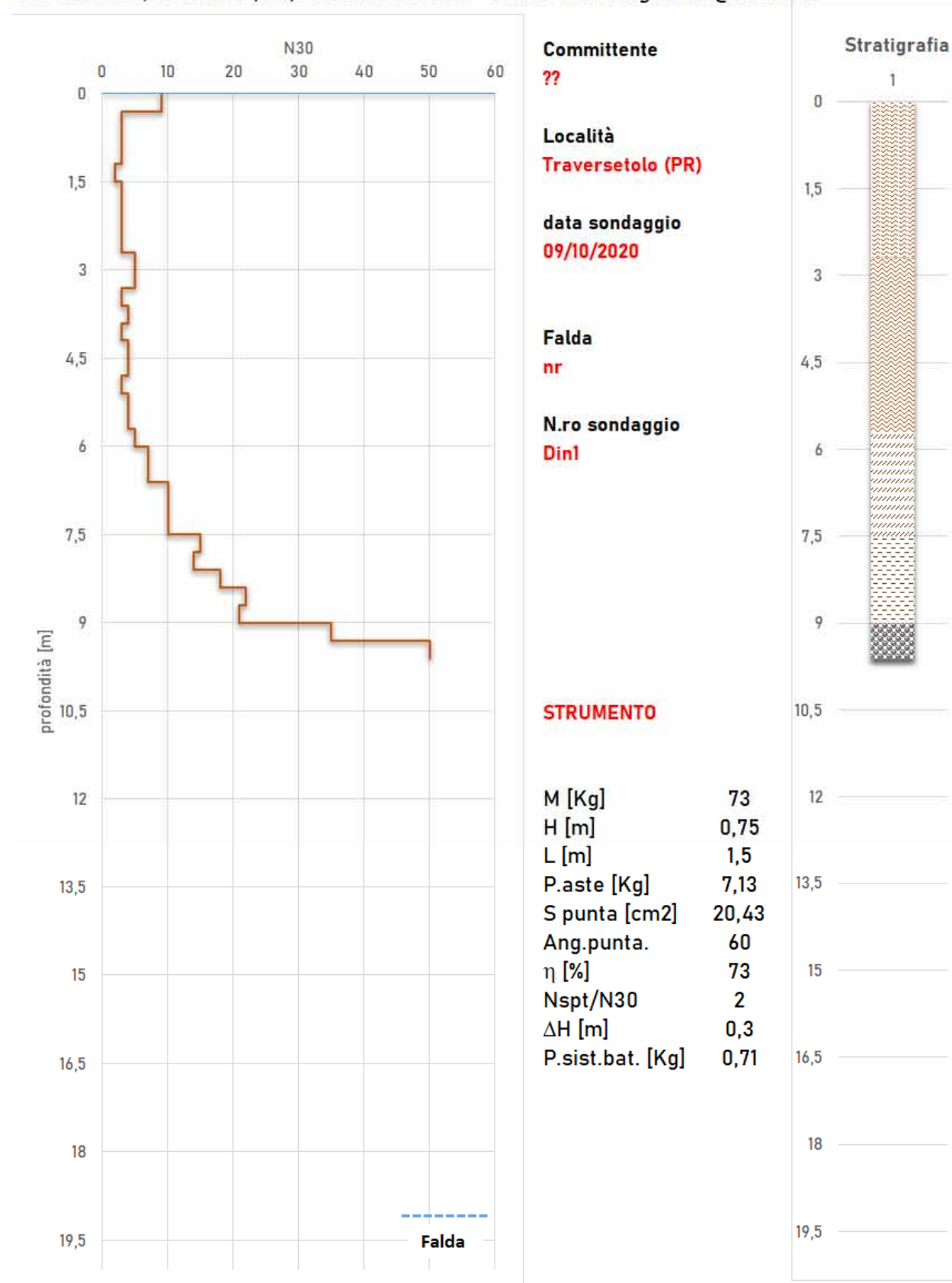


**Ubicazione sito sulla OrtofotoAGEA 2011
(base DBTR 2013)**

1:2.000

Dott. Geol. GEMELLI THOMAS

Via Milano 21, Sassuolo (MO). Cell. 3495786691 - email: thomas.gemelli@tiscali.it

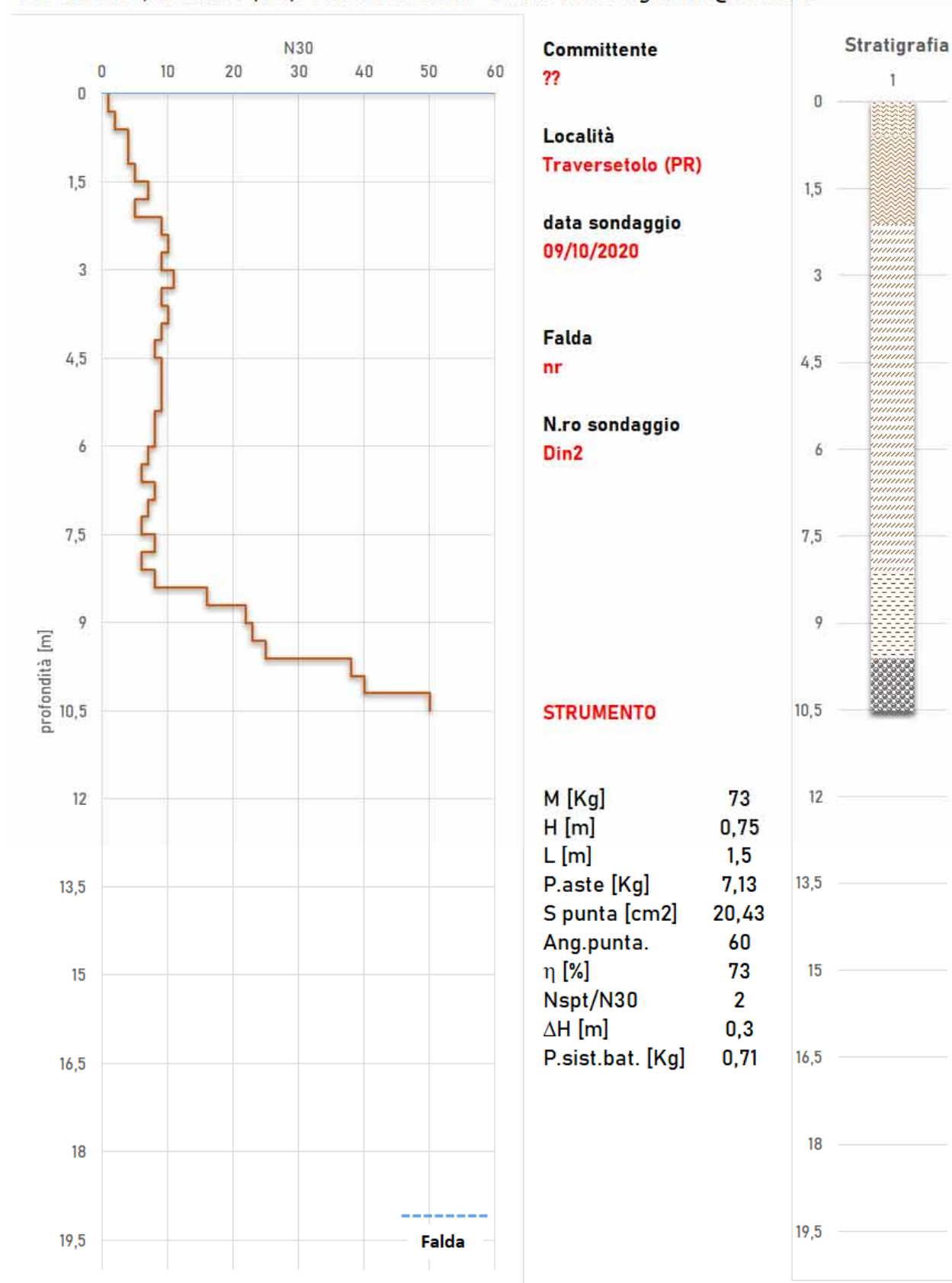


parametri geotecnici

	ps t/m3	c _u Kg/cm ²	c' Kg/cm ²	D _r %	φ	E _{ed} Kg/cm ²	K ₀ Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm ²
limi sabbiosi teneri	1,7	0,4	0,1	-	18,0	50,8	0,3	182,9	0,4	15,1
limi arg. teneri	1,74	0,44	0,09	-	18	45	0,4	174	0,43	12
argille lim. med. comp.	1,90	0,62	0,12	-	19	68	0,9	213	0,39	29
argille med. comp.	2,06	1,27	0,25	-	23	104	2,1	266	0,31	71
Ghiaia argillosa	1,98	-	-	67	36	430	20,6	283	0,28	320

Dott. Geol. GEMELLI THOMAS

Via Milano 21, Sassuolo (MO). Cell. 3495786691 - email: thomas.gemelli@tiscali.it

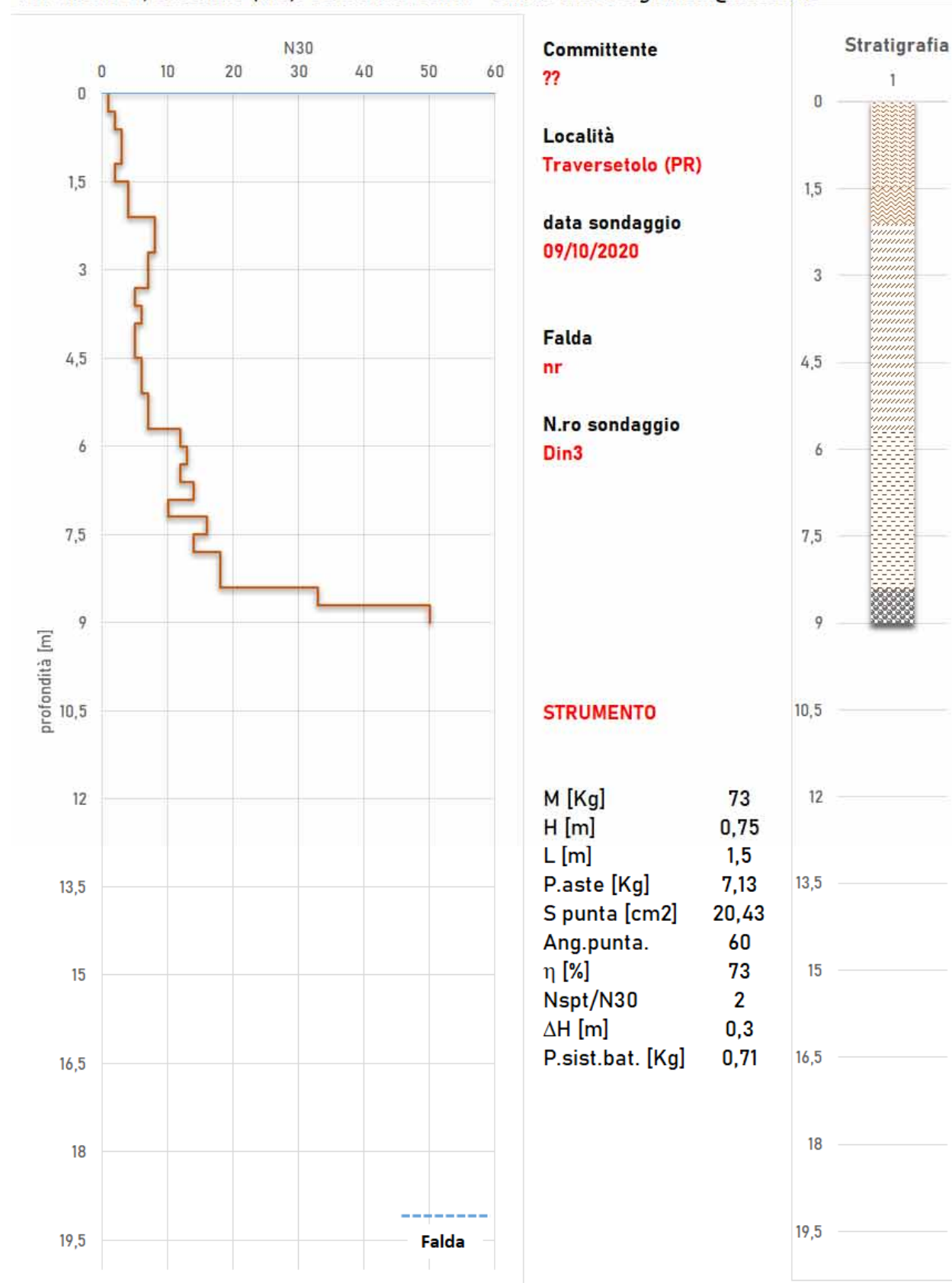


parametri geotecnici

	ps t/m3	c _u Kg/cm ²	c' Kg/cm ²	D _r %	φ	E _{ed} Kg/cm ²	K ₀ Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm ²
limi sabbiosi teneri	1,6	0,2	0,0	-	18,0	31,6	0,1	141,1	0,4	2,9
limi arg. teneri	1,7	0,5	0,1	-	21,1	60,0	0,4	200,2	0,4	21,3
argille lim.med.comp	1,92	0,71	0,14	-	19	71	0,8	221	0,39	33
argille med.comp.	2,05	1,27	0,25	-	23	103	2,2	263	0,31	71
Ghiaia argillosa	2,01	-	-	67	36	434	21,5	287	0,28	322

Dott. Geol. GEMELLI THOMAS

Via Milano 21, Sassuolo (MO). Cell. 3495786691 - email: thomas.gemelli@tiscali.it

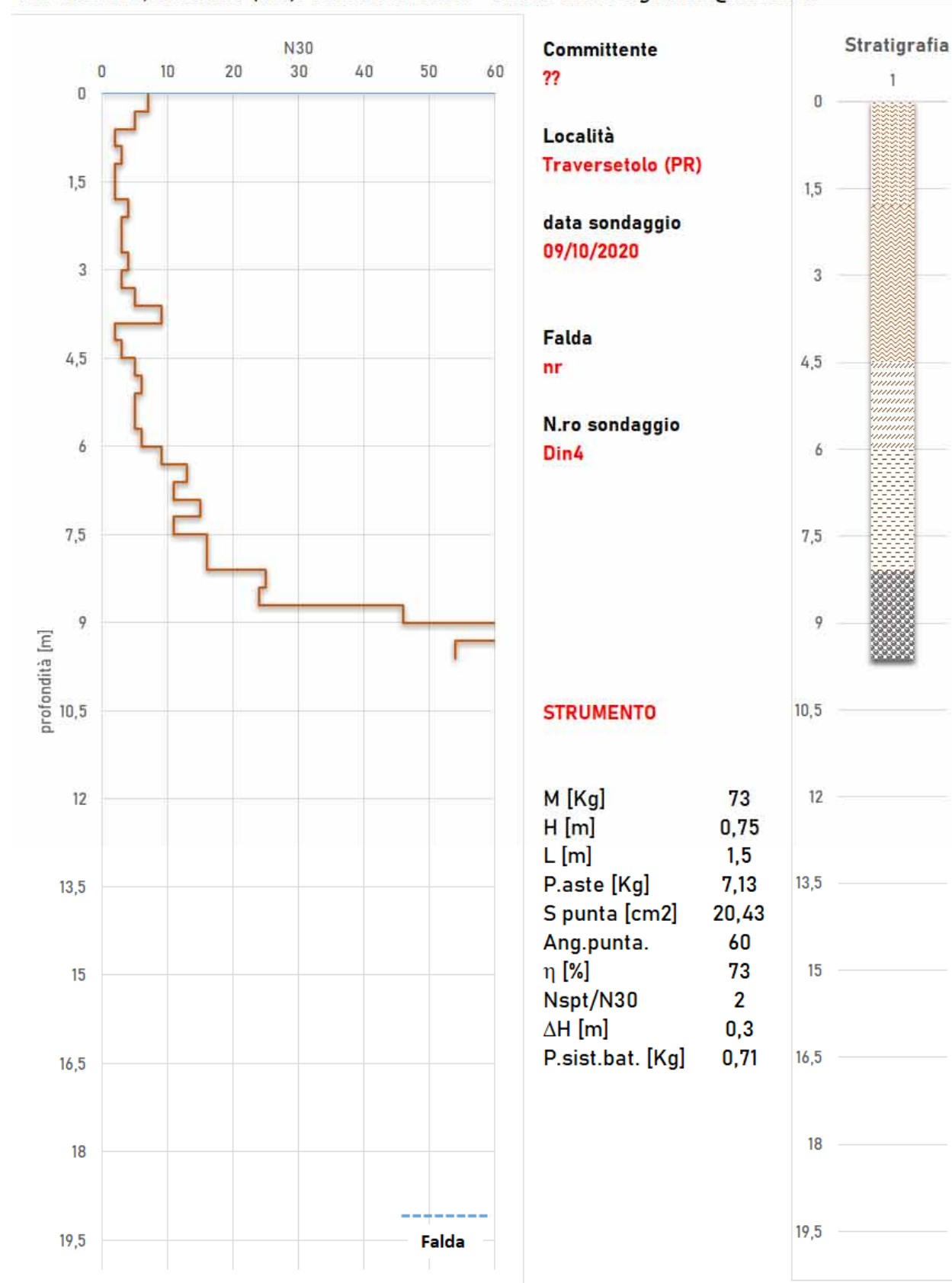


parametri geotecnici

	ps t/m3	c _u Kg/cm ²	c' Kg/cm ²	D _r %	φ	E _{ed} Kg/cm ²	K ₀ Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm ²
limi sabbiosi teneri	1,6	0,2	0,0	-	18,0	38,6	0,2	158,8	0,5	5,9
limi arg. teneri	1,67	0,40	0,08	-	19	51	0	182	0,41	15
argille lim.med.comp	1,84	0,64	0,13	-	20	63	0,6	207	0,40	26
argille med.comp.	2,03	1,01	0,20	-	20	91	1,6	249	0,34	55
Ghiaia argillosa	1,98	-	-	67	36	431	20,2	283	0,28	320

Dott. Geol. GEMELLI THOMAS

Via Milano 21, Sassuolo (MO). Cell. 3495786691 - email: thomas.gemelli@tiscali.it



parametri geotecnici

	ps t/m3	c _u Kg/cm ²	c' Kg/cm ²	D _r %	φ	E _{ed} Kg/cm ²	K ₀ Kg/cm3	V _s m/s	v	E _y Kg/cm ²
limi sabbiosi teneri	1,7	0,4	0,1	-	18,0	50,3	0,3	180,3	0,4	15,9
limi arg. teneri	1,71	0,45	0,09	-	18	43	0,3	170	0,43	11
argille lim.med.comp	1,79	0,42	0,08	-	19	53	0,5	189	0,42	15
argille med.comp.	2,00	0,91	0,18	-	19	85	1,4	241	0,35	48
Ghiaia argillosa	2,03	-	-	68	37	426	20,4	286	0,28	317

Parametri geotecnici da penetrometro dinamico

bibliografia	Terreni argillosi	Terreni incoerenti
Bowles	Peso volume in t/m³ $P_s = -0.00004N_{SPT}^2 + 0.008N_{SPT} + 1.844$	Ved. Bowles
Lambe	Coesione totale in Kg/cm² $C_u = 0.29 * N_{SPT}^{0.72} * 0.88$	
Jacobsen	Coesione efficace in Kg/cm² $C' = 0.2C_u$	
Yoshida		Densità relativa in % $DR = 0.25 * N_{SPT}^{0.46} * \sigma_v^{0.12}$
Righi – Piacentini [argille] Bowles [incoerenti]	Angolo di attrito interno $q_c \leq 20 \text{ Kg/cm}^2$ $\varphi = \text{Atan}(0.0081 * (q_c/0.7) + 0.2)$ $q_c > 20 \text{ Kg/cm}^2$ $\varphi = \text{Atan}(0.0081 * (q_c/1.2) + 0.5)$	$\varphi = -0.0011N_{SPT}^2 + 0.3139N_{SPT} + 28.16$
Buisman [argille] Schultze [incoerenti]	Modulo edometrico in Kg/cm² $q_c \leq 10 : E_{ed} = 7q_c$ $10 < q_c \leq 30 : E_{ed} = 3q_c$ $30 < q_c \leq 45 : E_{ed} = 2.5q_c$ $q_c > 45 : E_{ed} = 1.5q_c$	$10 * [0.4 + 1.15N_{SPT}]$
Widijala [argille] Ziaie [incoerenti]	Coefficiente di sottofondo in Kg/cm³ $K_o = [(q_c - \sigma_{vtot}) / \sigma_{veff.}] * 0.1$	$K_o = 3.143 * N_{60}^{0.489}$
Lee [argille] Otha-Goto [incoerenti]	Velocità onde di taglio in m/s $V_s = 114.43N_{SPT}^{0.31}$	$V_s = 83.35N_{SPT}^{0.348}$
J.A.Hemsley [argille] Widijala [incoerenti]	coefficiente di Poisson $\nu = 0.0328C_u^2 - 0.1918C_u + 0.5224$	$\nu = 0.3$
Teoria elasticità	Modulo elastico di Young in Kg/cm² $E_y = [(1+\nu) * (1-2\nu)] / [(1-\nu) * E_{ed}]$	$E_y = [(1+\nu) * (1-2\nu)] / [(1-\nu) * E_{ed}]$
Bruschi [argille e sabbie]	Relazione fra "qc" e prova dinamica $Q_c = R_d * \alpha$ Rd dalla formula degli Olandesi $\alpha : \text{con } N_{SPT} \leq 3: 0.6$ $\alpha : \text{con } 3 < N_{SPT} \leq 9: 0.2535 \ln(N_{SPT}) + 0.3299$ $N_{SPT} > 9 : \alpha = 1.00$	Vedi Bruschi