

COMUNE DI PAVULLO NEL FRIGNANO
Provincia di Modena

PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
COMPARTO A8 (parte dell'Ambito ANS 1.8)
VIA SERRA DI PORTO - PAVULLO N/F

Relazione Geologica e Sismica



DATA:

Febbraio 2020

PROT. N°:

PRATICA N°

COMMITTENZA:

COO.FIN S.R.L.

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Marco Santi Bortolotti

DOTT. SANTI BORTOLOTTI MARCO
GEOLOGO

Via Montorso, 19 - 41026 Pavullo nel Frignano (Mo) - Tel./Fax 0536 324233 - Cell. 339 4679008 - E Mail sb.marco@libero.it
P.Iva 02496130366 - CF SNTMRC72M09G393S - PEC SANTIBORTOLOTTI@EPAP.SICUREZZAPOSTALE.IT - Cod (SDI) XL13LG4



INDICE

1.	PREMESSA	PAG. 4
1.1	CRONOPROGRAMMA E METODOLOGIA DI LAVORO	" 4
2.	RELAZIONE GEOLOGICA	" 6
	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO (6.2.1 NTC)	" 6
2.1	ELEMENTI GEOGRAFICI-CARTOGRAFICI DELL'AREA	" 6
2.2	MORFOLOGIA DELL'AREA	" 8
2.3	ELEMENTI GEOLOGICI DELL'AREA	" 9
2.4	ELEMENTI IDROGEOLOGICI DELL'AREA	" 11
2.5	STABILITÀ DELL'AREA	" 12
2.5.1	QUADRO CONOSCITIVO-CARTOGRAFICO	" 12
2.5.2	INFLUENZA DELLE OPERE IN PROGETTO SULLE CONDIZIONI DI STABILITÀ - QUADRO MORFOEVOLUTIVO	" 12
	RELAZIONE SISMICA	" 13
3.1	PERICOLOSITÀ SISMICA DEL COMUNE DI PAVULLO	" 13
3.2	NORMATIVA SISMICA DI RIFERIMENTO	22
3.3	INDAGINI SISMICHE	25
3.4	CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO	31
3.5	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	31
3.6	CALCOLO DEI PARAMETRI SISMICI DEL SITO	32
3.7	PERICOLOSITÀ SISMICA ED EFFETTI LOCALI	34
3.8	AMPLIFICAZIONE SISMICA PER CARATTERISTICHE LITOLOGICHE – DGR 630/2019	" 37
4.	ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL)	" 39
4.1	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	" 39
4.1.1	Stima della pericolosità e analisi di disaggregazione	" 39
4.1.2	Definizione del moto di riferimento	" 40
4.1.3	Classe d'Uso e Periodo di riferimento per l'azione sismica	" 42
4.1.4	Stati Limite e relative probabilità di superamento – Tempo di ritorno	" 42
4.1.5	Valutazione dell'azione sismica	" 43
4.1.6	Terremoti di input e spettri di risposta	" 45
4.1.7	Sismostratigrafia	" 47
4.1.8	Proprietà geotecniche dinamiche	" 48
4.2	RISULTATI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA	" 49
4.2.1	FUNZIONE DI TRASFERIMENTO	" 49
4.2.2	SPETTRI DI RISPOSTA	" 50

5. MODELLO GEOLOGICO-SISMICO	"	52
5.1 INDAGINI, MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE	"	52
5.1.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE DI CAMPAGNA	"	52
5.1.2 CARATTERISTICHE LITOSTRATIGRAFICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE	"	54
5.1.3 IDROLOGIA SOTTERRANEA	"	54
6. TIPOLOGIA DELL'INTERVENTO	"	55
7 CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE GENERALI	"	55
7.1 SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI FONDAZIONE		56
7.2 STABILITÀ DELLE PARETI DI SBANCAMENTO		56
7.3 MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO		57
8. CONSIDERAZIONI FINALI		58

5.1 INDAGINI, MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE

5.1.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE DI CAMPAGNA

5.2.2

5.3.

ALLEGATO 1	PROVE PENETROMETRICHE STATICHE	PAG. 60
ALLEGATO 2	INDAGINE SISMICA - MASW	" 61
ALLEGATO 3	INDAGINE SISMICA - HVSR	" 62

Relazione Geologica e Sismica

1. PREMESSA

La presente relazione riferisce dello studio geologico e sismico eseguito su un terreno situato tra Via Serra di Porto e Via Montecuccolo a Pavullo n/F. (Mo) (Fig. 1-2), in particolare espone gli aspetti geologici e sismici connessi con il PUA Piano Urbanistico Attuativo relativo al Comparto 8 (parte dell'Ambito ANS 1.8).

1.1 CRONOPROGRAMMA E METODOLOGIA DI LAVORO

Al fine di inquadrare e contestualizzare dal punto di vista geologico e sismico l'area di PUA, si è proceduto essenzialmente attraverso due fasi:

- 1) analisi bibliografica degli studi e delle indagini disponibili nell'area e in un suo intorno significativo;
- 2) approfondimento d'indagine sito-specifica con esecuzione di indagini geognostiche e sismiche.

1) La ricerca bibliografica ha permesso di reperire dati di buona qualità, ma generali dell'area; quelli più significativi e utilizzati in questo lavoro sono:

- cartografia tecnica e geologica esistente;
- Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Pavullo nel Frignano;
- PSC del Comune di Pavullo nel Frignano;

2) La consultazione dei documenti sopra elencati permette di ottenere solo un quadro generale del sito in studio. Per qualificare e completare ulteriormente lo studio sono state quindi programmate una serie di nuove indagini geognostiche e geofisiche "sito-specifiche", comprensive di:

- n° 6 prove penetrometriche statiche (All. 1);
- n° 1 indagine di sismica a rifrazione con metodologia MASW (All. 2);
- n° 1 prospezione sismica passiva di microtremiti HVSR (All. 3);

Così operando, si è inteso:

- valutare le condizioni geologiche-geomorfologiche e idrogeologiche dell'area;
- valutare le caratteristiche geolitologiche dei terreni di fondazione dell'area;
- definire il modello geologico-geotecnico generale;
- valutare la pericolosità sismica di base dell'area in studio e i possibili effetti di sito;
- individuare le possibili problematiche geologiche-tecniche dell'area in relazione agli interventi;
- valutazione preliminare della risposta sismica locale mediante classificazione semplificata del suolo in base alla VsEq, calcolo dell'accelerazione spettrale elastica e dei coefficienti di amplificazione sismica (NTC 2018);
- microzonazione sismica e calcolo dei coefficienti di amplificazione FA ottenuti con le nuove tabelle regionali (2019) che aggiornano quelle della DAL RER 112/2007.

Oltre agli interventi edificatori di tipo residenziale, è prevista anche la realizzazione di una struttura di carattere strategico comunale, più precisamente la nuova sede della "Casa del Volontariato"; pertanto come da Norme dello Studio di Microzonazione Sismica, sono stati eseguiti gli opportuni **approfondimenti di terzo livello**.

Questo livello di analisi è finalizzato a valutare:

- l'effettivo grado di pericolosità sismica locale

Si è condotta quindi una valutazione della RSL, risposta sismica locale, mediante l'utilizzo di 7 segnali sismici di riferimento (Rexel) e codice di calcolo (Software EERA) con determinazione degli spettri elastici normalizzati.

Lo studio, pertanto, secondo i dettami della normativa vigente (NTC2018) e dello stato dell'arte, è rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica e sismica dell'area del PUA che consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, geomorfologici, idrogeologici, e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

L'elaborato è sviluppato in modo da costituire imprescindibile elemento di base e di riferimento per la redazione del dimensionamento geotecnico di dettaglio e per il completamento delle successive progettazioni dei singoli lotti.

RELAZIONE GEOLOGICA

2. CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO (6.2.1 NTC)

Il modello geologico del sito viene sviluppato in modo da costituire utile elemento di riferimento per l'inquadramento, da parte del progettista, delle problematiche geotecniche a piccola e grande scala e per stilare il programma delle indagini. Il modello geologico di riferimento sarà quindi validato e supportato da indagini specifiche in funzione dell'importanza delle opere.

2.1 ELEMENTI GEOGRAFICI-GEOMORFOLOGICI DELL'AREA

Il sito di studio è situato nel settore sud dell'abitato di Pavullo (Fig. 1-2).

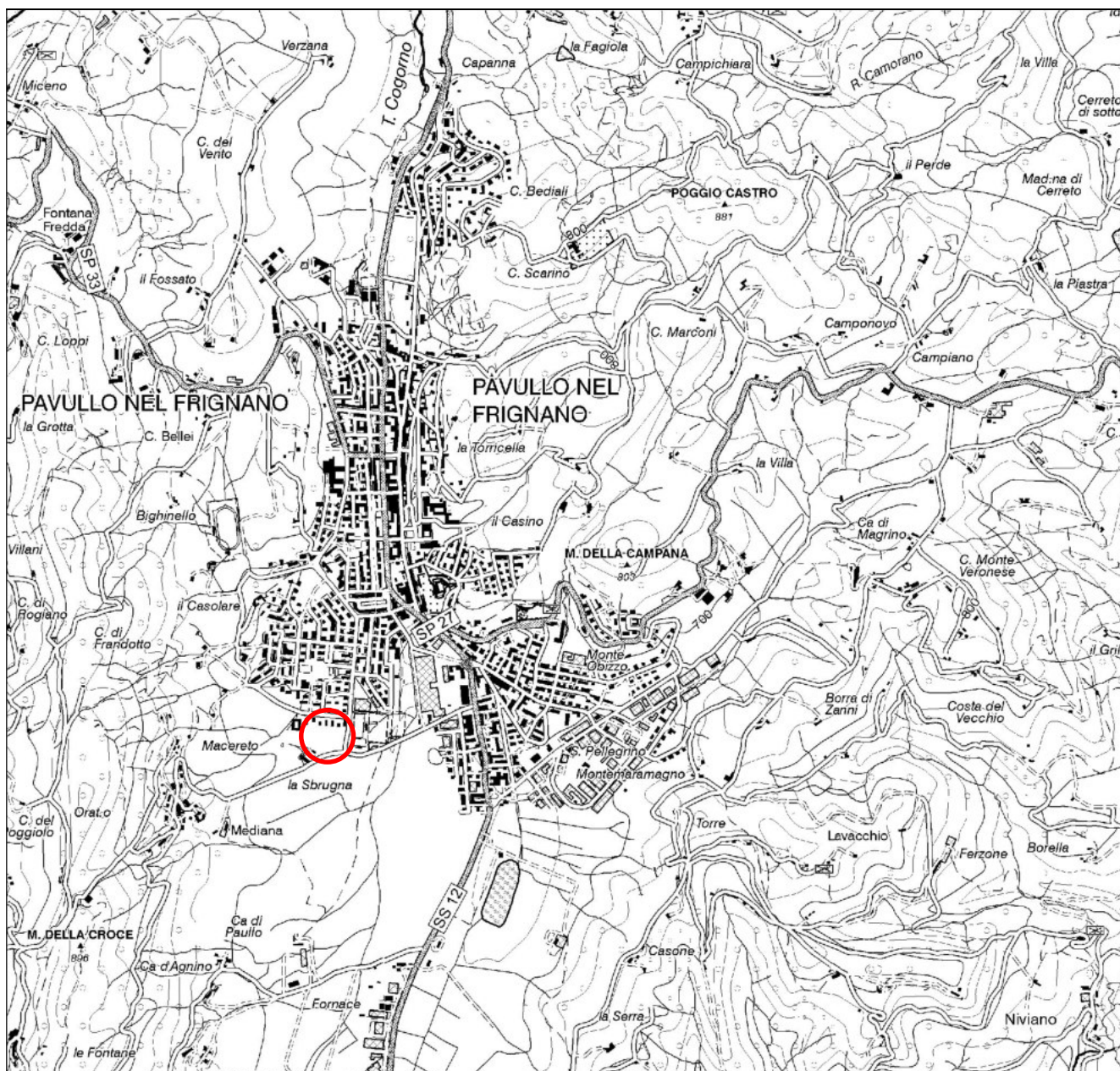


Figura 1 – Inquadramento geografico 1:25.000 (Tavolette ctr n° 236no-236ne)

L'abitato di Pavullo si colloca lungo la fascia della media-alta collina nel medio Appennino modenese, a quote altimetriche medie comprese tra 675-690 nei settori della piana fino a 750 metri s.l.m. nei settori marginali a est e a ovest.



Figura 2 – Corografia 1:5.000 (Elementi Ctr n° 236061-236074)

2.1.1 Riferimenti Cartografici

Cartograficamente l'area in studio è individuata sulla C.T.R. nelle Tavole 236no e 236ne a scala 1:25.000 (Fig. 1), nella Sezione n° 236060 alla scala 1:10.000 e nell'Elemento n° 236061 a scala 1:5.000 (Fig. 2).

2.2 MORFOLOGIA DELL'AREA

L'area di PUA si colloca al margine occidentale della piana di Pavullo ai piedi di un versante ad esposizione est che scende dalla dorsale di Montecuccolo.

Le caratteristiche morfometriche del versante sono le seguenti:

MORFOMETRIA E MORFOLOGIA DEL PENDIO

Quota massima (s.l.m.): 860 m

Quota del settore d'intervento (s.l.m.): 682-679 m

Quota minima (s.l.m.): 675 m

Distanza dallo spartiacque: 1250 m

Distanza dalla base della piana: 0 m

Pendenza media dallo spartiacque alla base: 9-10° (16-18%)

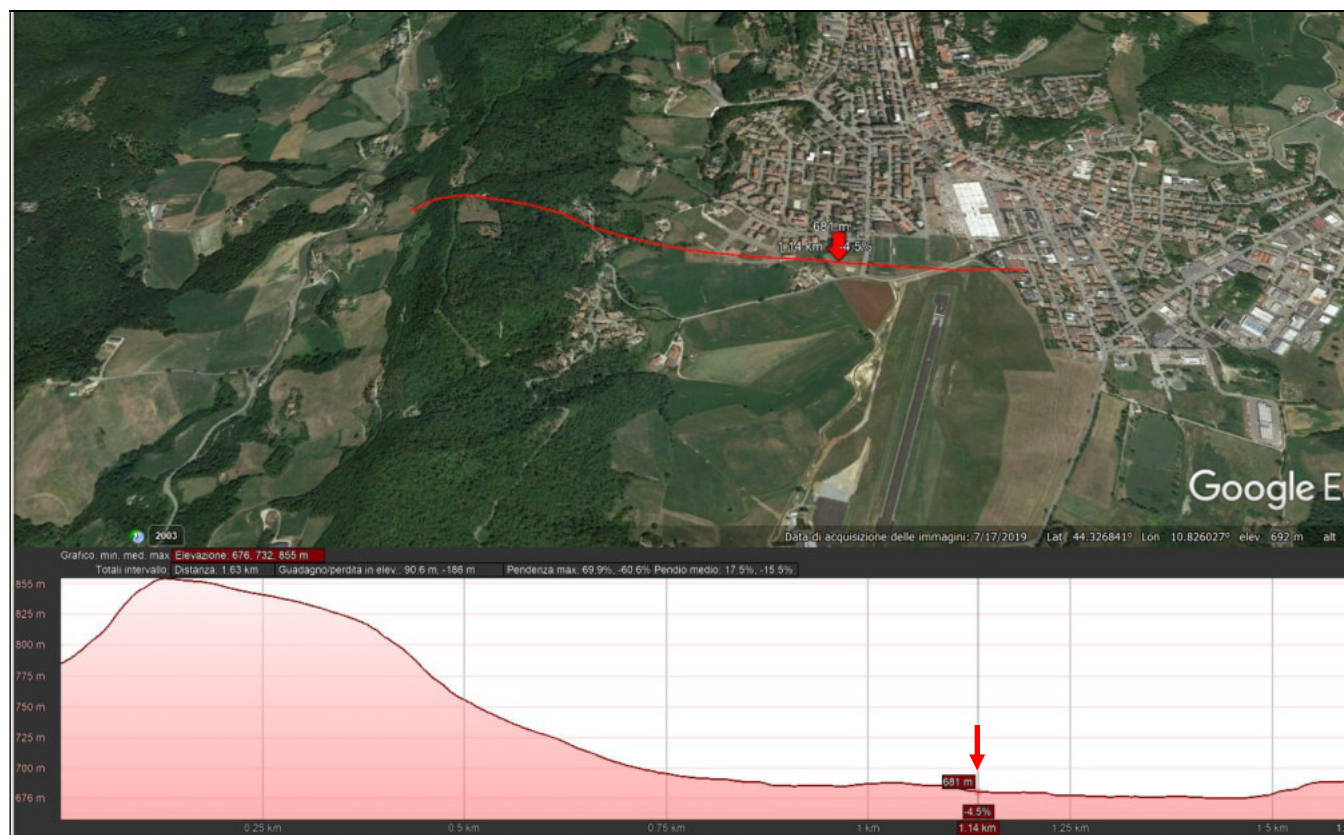


Figura 3 – Profilo topografico (tratta da Google Earth)

2.3 ELEMENTI GEOLOGICI

Le caratteristiche geologiche dell'area presentano una certa peculiarità rispetto alla tipica situazione riscontrabile lungo i versanti prevalentemente argillosi del medio Appennino modenese: l'abitato di Pavullo si colloca infatti all'interno di una zolla calcareo-arenaceo-marnosa semiautoctona Epiligure, sovrapposta tettonicamente su formazioni argillose alloctone appartenenti alle Unità Liguri.

L'unità morfologica della Piana di Pavullo è infatti costituita da un rilievo a pianta sub-polygonale, perimetralmente costituito da rocce calcareo-arenacee e/o marnose coerenti e tutt'intorno circondato da formazioni poco resistenti e facilmente degradabili.

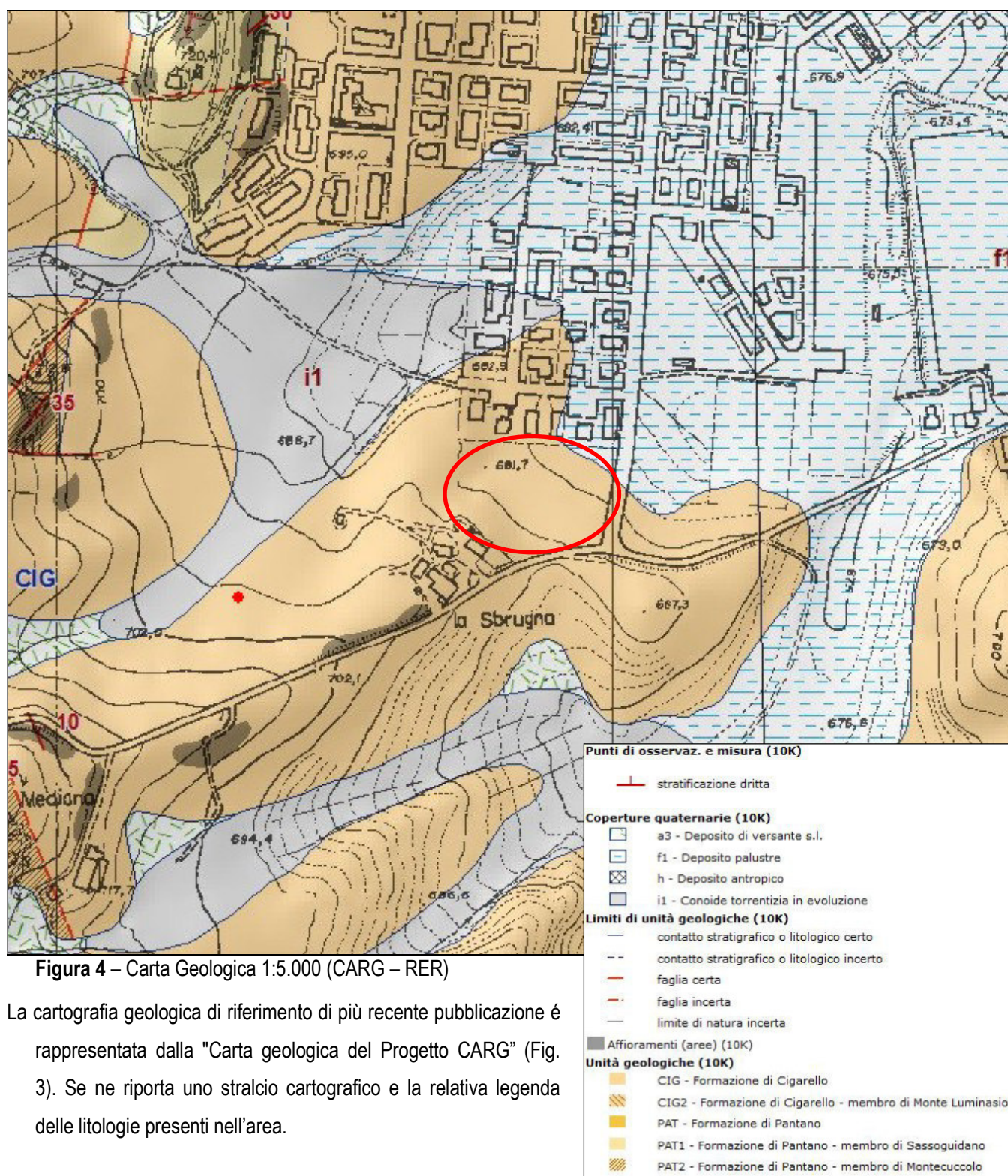


Figura 4 – Carta Geologica 1:5.000 (CARG – RER)

La cartografia geologica di riferimento di più recente pubblicazione è rappresentata dalla "Carta geologica del Progetto CARG" (Fig. 3). Se ne riporta uno stralcio cartografico e la relativa legenda delle litologie presenti nell'area.

Il substrato dell'area in studio è costituito dalla Formazione di Cigarelllo.

Di seguito vengono descritte brevemente le caratteristiche litologiche e stratigrafiche delle unità presenti nell'area in studio; (Fig. 3).

CIG - Formazione di Cigarelllo

Questa formazione costituisce il substrato dell'area d'intervento.

Si tratta di marne siltoso-sabbiose, talora argillose, grigie, grigio scure o beiges se alterate, bioturbate e fossilifere. Stratificazione generalmente poco evidente per l'assenza di livelli grossolani e per la bioturbazione. Localmente affiorano intervalli di strati sottili arenaceo-pelitici tabulari con $A/P < 1$ o litofacies marnose franche. Ambiente di sedimentazione di piattaforma esterna e scarpata-bacino. Il limite inferiore è per alternanza o sfumato con PAT. La potenza varia da qualche decina di metri a circa 200 m. *Langhiano - Serravalliano*

I terreni formazionali sono mascherati da depositi detritici di copertura.

PAT - Formazione di Pantano

Areniti siltose fini e finissime, grigie (beige se alterate), alternate a peliti marnose e siltose grigio-chiare; stratificazione generalmente poco marcata o addirittura impercettibile a causa dell'intensa bioturbazione; sono presenti resti di Echinidi, Gasteropodi e Lamellibranchi. Sedimentazione in ambiente da litorale a piattaforma esterna. *Burdigaliano sup. - Langhiano inf.*

Nell'area d'intervento e nell'immediato intorno, il rilevamento diretto offre ben poche indicazioni in quanto si tratta di area completamente ricoperta da un cotico vegetale impostato su falda di detrito medio-fine di copertura (limo sabbioso e argilloso a media compattazione e discretamente drenato).

f1 - Deposito palustre

Limi e depositi di materiale organico alloggiati in depressioni per lo più di origine glaciale.

i1 - Conoide torrentizia in evoluzione

Depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallette trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia.

2.4 ELEMENTI IDROGEOLOGICI

Nell'area in studio l'eduzione delle acque meteoriche e superficiali per lo più avviene per infiltrazione e filtrazione all'interno della coltre detritica di copertura, che può essere considerata dotata di una discreta permeabilità per porosità.

Le formazioni coinvolte direttamente nell'intervento in oggetto possono essere distinte, in base alle caratteristiche litologiche e al grado di permeabilità, in due complessi idrogeologici:

- complesso permeabile per porosità: fanno parte di questo complesso tutti i terreni detritici superficiali di copertura; questo tipo di permeabilità è legato principalmente alla granulometria dei clasti che costituiscono il detrito, per cui si ha una discreta permeabilità per i termini più grossolani. Questa coltre detritica, ricopre indistintamente i terreni marnosi sottostanti.

a) complesso impermeabile: costituito da terreni prevalentemente marnosi della Formazione di Cigarello. Questa formazione ponendosi alla base di litotipi a maggiore permeabilità tamponano in modo pressoché completo la circolazione idrica sotterranea delle unità sovrastanti.

L'area in oggetto insiste su terreni prevalentemente marnosi a loro volta ricoperti da una coltre detritica: pertanto può essere soggetta a filtrazione di acque in particolare nello strato più superficiale e detensionato o in corrispondenza di concentrazioni di elementi grossolani d'alterazione.

Le acque che si infiltrano dal versante a monte alimentano e generano una falda freatica sospesa e/o di fondo abbastanza superficiale tamponata dalle litologie marnose di substrato. Il campo di pressione neutra nel sottosuolo è comunque variamente influenzato dagli eventi meteorici ed il livello stesso può cambiare sensibilmente da punto a punto.

Seppur le indagini dirette svolte non abbiano rilevato, all'interno dei fori di sondaggio, la presenza di acqua, non si può quindi escludere la presenza di locali orizzonti naturali di saturazione discontinui a carattere stagionale e/o livelli di filtrazione preferenziale al contatto tra litotipi a diversa permeabilità.

Gli interventi non determineranno sostanziali interferenze né modifiche ai processi di naturale alimentazione dell'acquifero principale.

L'area in studio non ricade in alcuna zona di protezione di acque sotterranee e/o di zone di possibile alimentazione di sorgenti (PTCP 2009).

2.5 STABILITÀ DELL'AREA

2.5.1 Quadro conoscitivo-cartografico

Nella Figura 5 si riporta la “Carta del dissesto del PTCP di Modena PTCP (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale) dove l'area in studio non rientra in zone di dissesto in atto né potenziale.

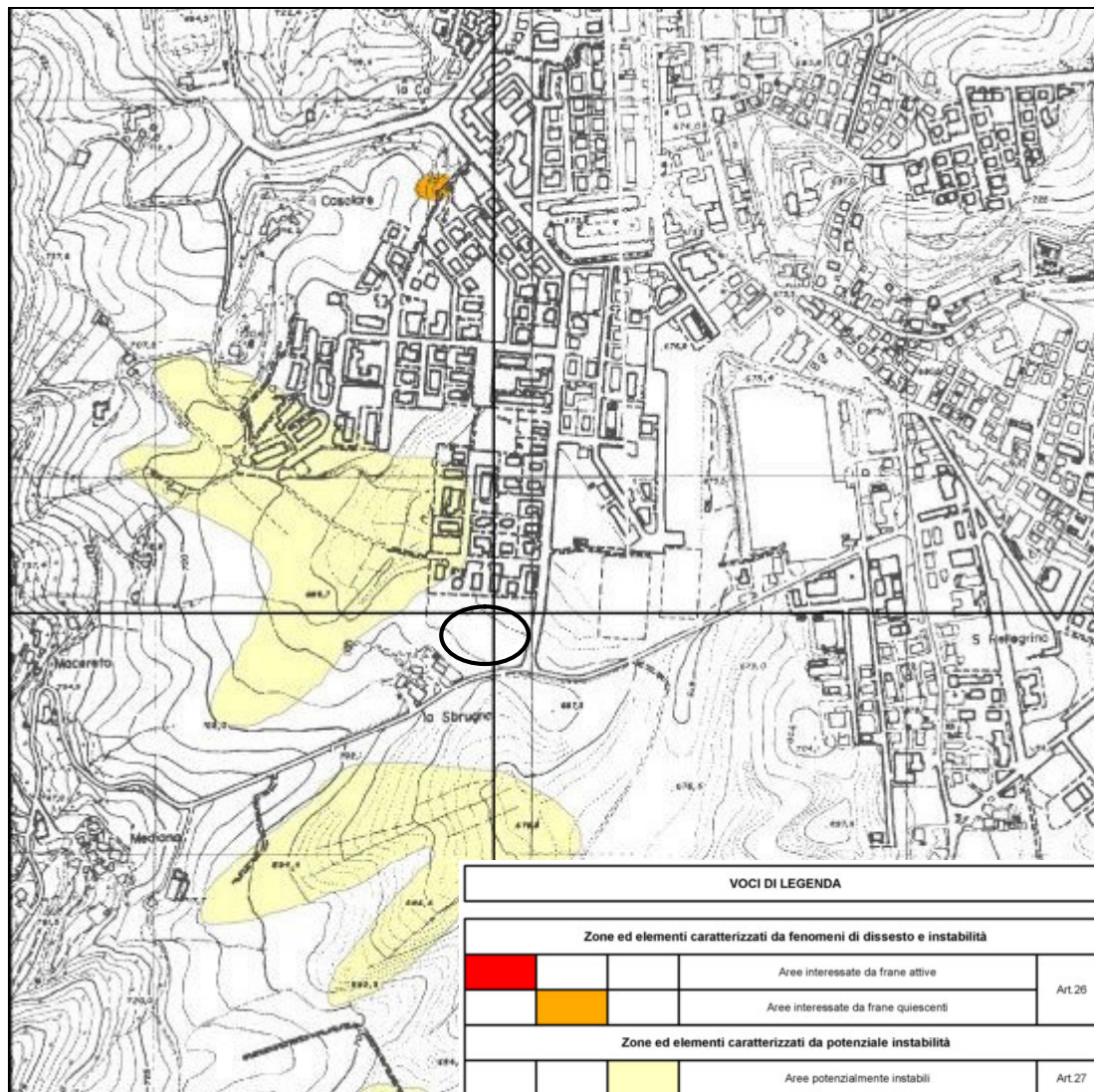


Figura 5 – Carta del dissesto – stralcio PTCP (1:10.000)

2.5.2 Influenza dell'opera sulle condizioni di stabilità - Quadro morfoevolutivo

Il sito in studio si colloca in posizione subpianeggiante nella piana di Pavullo alla base di un pendio che anche a monte non presenta alcuna forma e/o processo di degradazione significativo.

In un adeguato intorno non si rilevano fenomeni geodinamici e/o segnali di azione morfogenetica che possono influire direttamente sul sito in studio.

Non si rilevano processi erosivi da parte delle acque di corrivazione.

La morfologia praticamente subpianeggiante dell'area permette di affermare che anche lo stato di progetto non determinerà significative alterazioni degli equilibri statici del sito.

Laddove verranno eseguiti sbancamenti ne andranno verificate le condizioni di stabilità in tutte le condizioni.

Da quanto sopra elencato, la verifica complessiva di tipo geologico-tecnico e di compatibilità geomorfologica mette in risalto la non influenza negativa degli interventi in progetto sulle condizioni di stabilità dell'area.

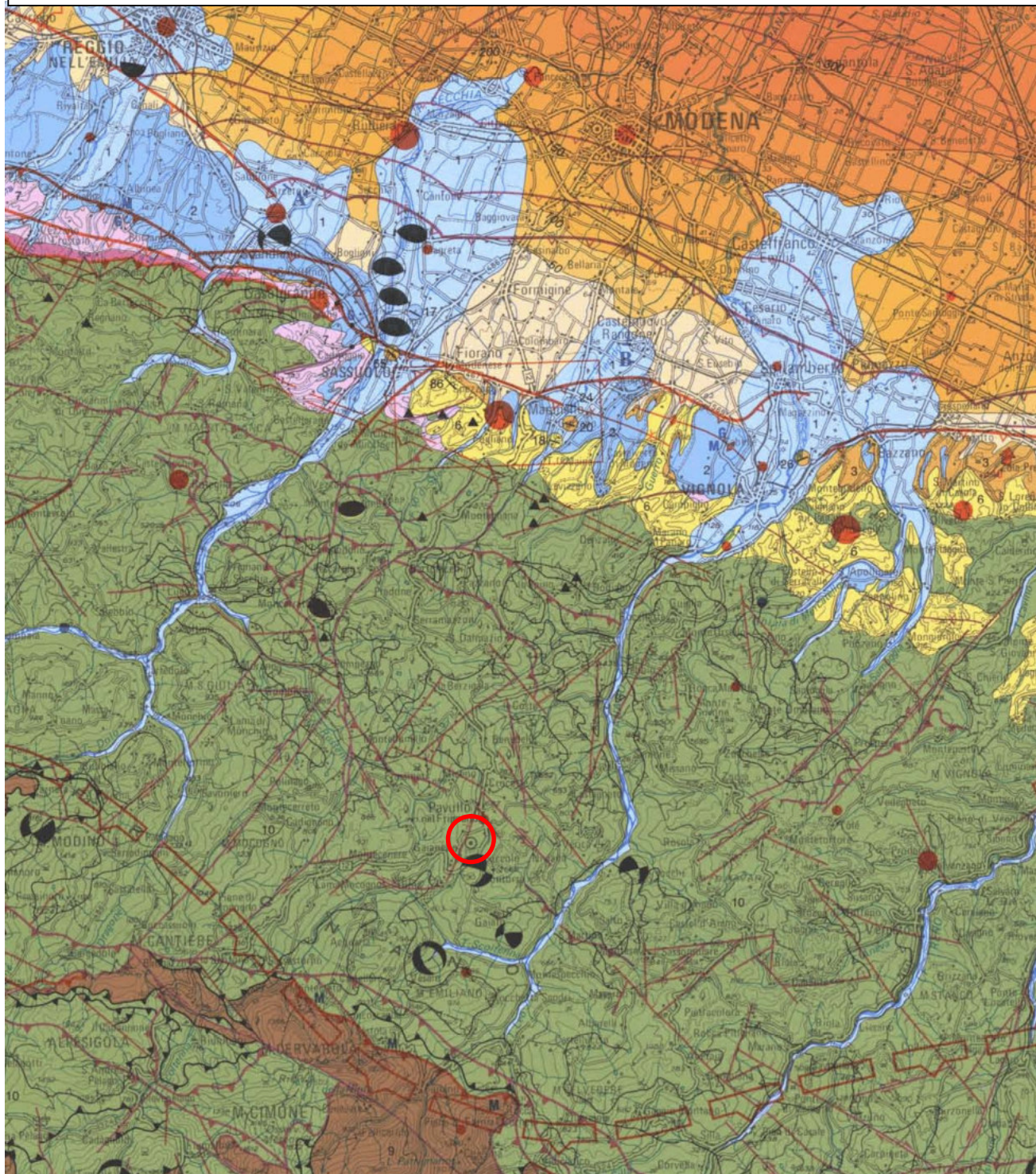
3. RELAZIONE SISMICA

3.1 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

3.1.1 SISMOTETTONICA

Di seguito si riporta uno stralcio della Carta Sismotettonica dell'Emilia Romagna e una sezione relativa all'andamento dei terreni di substrato.

FIGURA 6 – CARTA SISMOTETTONICA DELL'EMILIA ROMAGNA





3.1.2 SISMICITÀ DEL COMUNE DI PAVULLO

Zonazione sismogenetica

È stata utilizzata la zonazione sismogenetica dell'INGV, chiamata ufficialmente ZS9. Rispetto alle zonazioni precedenti, in questo caso le zone sorgente sono state disegnate più vincolate rispetto alle sorgenti sismogenetiche e alla sismicità storica e strumentale e le aree circostanti sono state cautelate attraverso i normali effetti di propagazione della pericolosità sismica al di fuori delle zone sorgente.

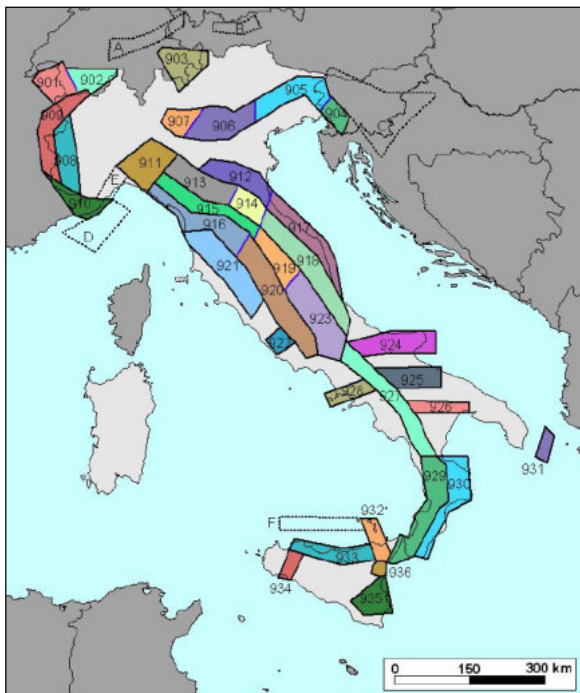


Fig. 7 – Zonazione sismogenetica ZS9 (INGV).

La zonizzazione ZS9 risulta basata prevalentemente sulle informazioni di ZS4; recepisce le informazioni sulle sorgenti sismogenetiche italiane messe a disposizione da DISS 2.0 (Database of Potential Sources for Earthquake Larger than M5.5 in Italy, 2001) e da altre compilazioni regionali di faglie attive; considera inoltre le indicazioni che derivano dall'analisi dei dati relativi ai terremoti più importanti verificatisi successivamente alla predisposizione di ZS4, alcuni dei quali localizzati al di fuori delle zone sorgente in essa definite; supera il problema delle ridotte dimensioni delle zone sorgente e della conseguente limitatezza del campione di terremoti che ricade in ciascuna di esse.

La ZS9 può essere utilizzata in congiunzione con il catalogo CPTI2, e fornisce inoltre una stima della "profondità efficace", cioè dell'intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti in ogni zona sorgente, utilizzabile in

combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale, e fornisce per ogni zona un meccanismo di fagliazione prevalente, utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione modulate sulla base dei coefficienti proposti da Bommer et al. (2003).

La zonazione è costituita da 42 zone-sorgente, i limiti tra le zone sono neri e blu, i limiti neri definiscono limiti il cui tracciamento dipende esclusivamente da informazioni tettoniche e geologico-strutturali, il colore blu invece definisce suddivisioni di zone con uno stesso stile deformativo ma con differenti caratteristiche della sismicità. Come ad es. distribuzione spaziale degli eventi o la massima magnitudo rilasciata, ecc.

Le 42 zone-sorgente ZS9 vengono identificate da un numero che va da 901 a 936 o con una lettera da A a F.

Sismicità delle zone sorgenti

Il territorio del Comune di Pavullo si colloca a sud del fronte di accavallamento della successione carbonatica meso-cenozoica in sovrascorrimento verso NE. In passato sono stati risentiti gli effetti di numerosi terremoti dovuti ad una sismicità naturale localizzata nelle zone 913 e 915.

Le zone 913 e 915 sono quelle con un potenziale sismico tale da generare effetti non trascurabili nel territorio del Comune di Pavullo, mentre le altre vengono considerate poco influenti per generando terremoti con magnitudo a volte anche elevata (ad es. la zona 912).

La zona 915 determina una sismicità riconducibile a sorgenti attivate da meccanismi focali distensivi (faglie dirette e trascorrenti distensive) con massimi storici che hanno raggiunto intensità del X° MCS (Magnitudo $M_a=6-6.5$). In particolare il terremoto del 1920 della Garfagnana, con intensità epicentrale del IX-X° MCS ha determinato, in base alla ricostruzione macrosismica, intensità del VI-VII° MCS a Pavullo.

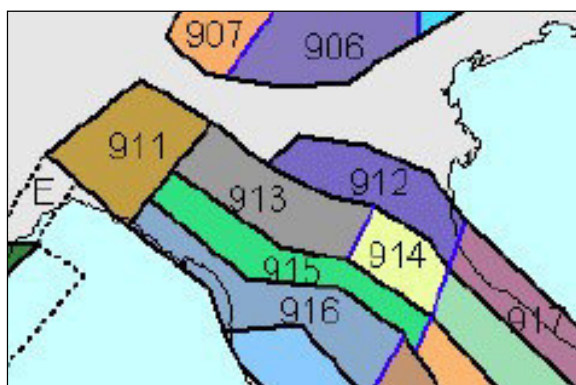


Figura 8 – Zoom sulla zonazione sismogenetica ZS9 dell'Emilia Romagna.

Nella zona 913 si verificano terremoti prevalentemente compressivi che sono causa di una sensibile attività come documentato dagli eventi del bolognese, del reggiano e del parmense (anno 2000) risentiti nell'area in studio. Questi eventi sono riconducibili a sorgenti superficiali attivate da meccanismi focali per compressione (faglie inverse e trascorrenti compressive) se si escludono eventi la cui origine è ancora incerta. Fra questi figura il terremoto di Castelvetro del 1501 che avrebbe prodotto, in base alla ricostruzione macrosismica, effetti del IX° MCS. Se confermato, la fascia

pedappenninica sarebbe quella potenzialmente più pericolosa per il territorio modenese.

L'intera fascia è caratterizzata da terremoti che raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo. Le profondità ipocentrali sono mediamente maggiori rispetto alla fascia esterna 912. La fascia del fronte appenninico sepolto determina infatti una sismicità rappresentata da terremoti a intensità medio-bassa, ma con una discreta frequenza di accadimento.

Per quanto riguarda la sismicità storica si può osservare che meccanismi focali di terremoti a dinamica compressiva, con direzione di raccorciamento principale orientata all'incirca N-S o NNE-SSO e di magnitudo (secondo la scala di Richter) fino a 5-5,5, sono stati registrati con epicentri posti non lontani da Pavullo.

Ricostruzione della storia sismica

Il catalogo delle massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani, valutate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA, Elaborato per il Dipartimento della Protezione Civile (D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise, 1996), evidenzia quanto riportato nella figura seguente:

L'intensità massima registrata nel Comune di Pavullo è dell'VIII MCS (scala Mercalli-Cancani-Sieberg), corrispondente ad una magnitudo dell'ordine di 5-5.5 (scala Richter).

L'attività tellurica dell'area è nota e documentata dall'anno 1000, anche se la qualità e la quantità delle informazioni non sono omogenee e si manifesta sia con eventi singoli di media intensità, sia con sequenze sismiche estese nel tempo.

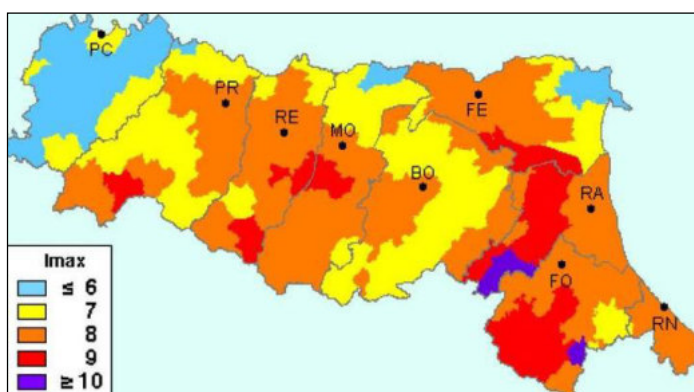


Fig. 9 – Intensità Macrosismiche osservate nei comuni italiani – GNDT ING/SGA

Le revisioni e ricollocazioni degli eventi storici e recenti, ma soprattutto l'attivazione di una rete sismica regionale integrata con quella nazionale, hanno permesso di distinguere, nell'ambito della regione, zone con differente regime sismico, vale a dire frequenza dei fenomeni, intensità e profondità focale.

Il confronto dei dati della sismicità strumentale con quelli storici evidenzia la stabilità nel tempo delle aree sismogenetiche.

Dal Catalogo parametrico CPT115 dell'INGV si evince che storicamente i terremoti più forti entro una distanza di 30-40 km risultano:

periodo dal 1000 al 2014:

- Anno 1920 – Garfagnana – Mw 6.48
- Anno 1937 – Frignano – Mw 5.30

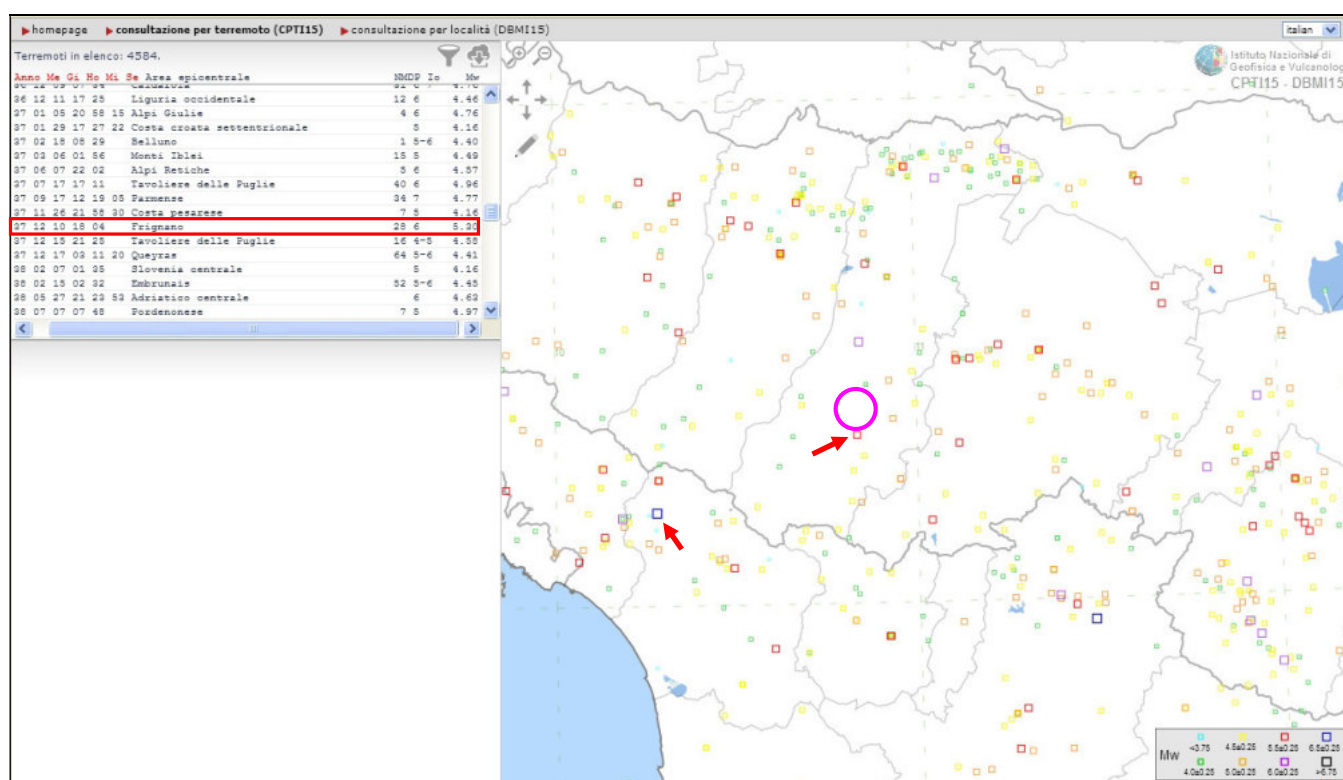


Figura 10 – Tratto da INGV CPT115 (Catalogo parametrico dei terremoti italiani – 2015) – Dal 1000 al 2014.

○ Area in studio

Nella pagina successiva sono elencate le osservazioni, aventi la maggiore intensità al sito, disponibili per il territorio comunale. Nella tabella sono indicate:

Is: intensità al sito

Anno Me Gi: anno mese giorno dell'evento

AE: località

Io: l'intensità massima epicentrale in scala MCS

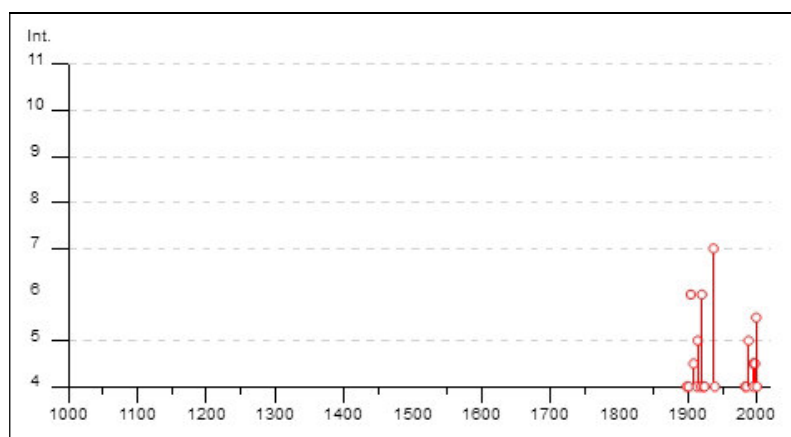
Mw: magnitudo momento

Dalla consultazione del Database Macrosismico Italiano 2015 DBMI15 per Pavullo si ottiene il seguente elenco di eventi sismici:

Pavullo nel Frignano

PlaceID	IT_38865
Coordinate (lat, lon)	44.334, 10.834
Comune (ISTAT 2015)	Pavullo nel Frignano
Provincia	Modena
Regione	Emilia-Romagna
Numero di eventi riportati	52

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
3	1887 02 23 05 21 50.00	Liguria occidentale	1511	9	6.27
3	1892 05 17 03 08 15.00	Carpinetti	28	5	4.28
F	1895 05 18 19 55 12.00	Fiorentino	401	8	5.5
F	1895 08 07 19 49 32.00	Appennino tosco-emiliano	84	5	4.67
3	1896 07 08 01 51 28.00	Porretta Terme	17	5	4.37
NF	1896 12 08 17 06 45.00	Sestola	26	5	4.33
NF	1897 09 06 03 10 44.00	Valdarno inferiore	104	5-6	4.59
4	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5.37
4	1901 10 30 14 49 58.00	Garda occidentale	289	7-8	5.44
6	1904 06 10 11 15 28.00	Frignano	101	6	4.82
4-5	1908 06 02 22 30	Frignano	18	4-5	4.5
NF	1909 08 25 00 22	Crete Senesi	259	7-8	5.34
4	1913 02 13 16 39	Corno alle Scale	26	5	4.18
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
3	1915 10 10 23 10	Reggiano	30	6	4.87
3	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
4	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6.38
3	1919 09 25 03 15	Frignano	7	4	3.7
6	1920 09 07 05 55 40.00	Garfagnana	750	10	6.53
2	1922 08 02 21 13	Frignano	21	5	4.32
4	1923 06 28 15 12	Modenese	22	6	5.04
4	1924 06 12 21 03 48.00	Frignano	25	5-6	4.46
2-3	1928 06 13 08	Carpi	35	6	4.67
3-4	1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7	5.13
2	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
2	1931 06 10 17 02	Modenese	14	4	4.59
3	1936 10 18 03 10	Alpago Consiglio	269	9	6.06
7	1937 12 10 18 04	Frignano	28	6	5.3
4	1939 10 15 14 05	Garfagnana	62	6-7	4.96
3	1951 05 15 22 54	Lodigiano	179	6-7	5.17
NF	1956 04 26 03 00 03.00	Appennino bolognese	89	6	4.74
3	1957 08 27 11 54	Appennino modenese	58	5	4.73
3	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	228	8	5.51
4	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5.04
4	1985 01 23 10 10 16.55	Garfagnana	73	6	4.6
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1987 05 02 20 43 53.32	Reggiano	802	6	4.71
3-4	1988 02 08 11 24 46.14	Garfagnana	75	6	4.34
5	1988 02 08 13 36 44.64	Frignano	43	5	4.28
NF	1992 04 17 11 59 07.29	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
4-5	1995 08 24 17 27 33.00	Appennino pistoiese	56	6	4.45
1-2	1995 10 10 06 54 21.72	Lunigiana	341	7	4.82
4	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
4-5	1997 12 24 17 53 10.12	Garfagnana	98	5	4.33
5-6	1999 07 07 17 16 12.59	Frignano	32	5	4.67
NF	2000 06 18 07 42 07.68	Pianura emiliana	304	5-6	4.4
4	2000 10 03 01 12 36.56	Frignano	62	5	4.22
3-4	2002 06 08 20 13 07.10	Frignano	115	4	4.23
3-4	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
3	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	133	6	5.24



Tratto da INGV DBMI15 (Database Macrosismico Italiano – 2015)

3.1.3 Frequenza di accadimento in Emilia Romagna

La frequenza con cui si sono verificati in passato i terremoti capaci di produrre danni significativi agli edifici consente di valutare con quale frequenza si manifesteranno in futuro, dal momento che questa presumibilmente non cambia.

Nella tabella sono riportati, per varie soglie di magnitudo, il numero di eventi per intervalli di tempo crescenti di 100 anni, partendo dall'ultimo secolo, registrati in Emilia Romagna.

CLASSI DI MAGNITUDO	INTERVALLO DI 100 ANNI		INTERVALLO DI 200 ANNI		INTERVALLO DI 300 ANNI		INTERVALLO DI 400 ANNI	
	Numero di terremoti	Tempo in anni di ripetizione	Numero di terremoti	Tempo in anni di ripetizione	Numero di terremoti	Tempo in anni di ripetizione	Numero di terremoti	Tempo in anni di ripetizione
4.5 < Ma < 5.0	28	3,6	56	3,6	67	4,5	75	5,3
5.0 < Ma < 5.5	10	10,0	16	12,5	22	13,6	27	14,8
5.5 < Ma < 6.0	3	33,3	4	50,0	6	50,0	8	50,0
Ma > 6.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Tutte*	76	1,3	129	1,5	147	2,0	173	2,3

* tutti gli eventi che hanno prodotto danni (intensità epicentrale massima osservata maggiore di V-VI grado MCS)

Come si può osservare le frequenze che si ottengono nei primi due intervalli, più attendibili perché andando indietro nel tempo il catalogo dei terremoti diventa più incompleto, è di un evento ogni 1.3-1.5 anni. Valori di magnitudo maggiori di 5.0, che corrispondono ad intensità epicentrali di VII-VIII grado MCS indicano un evento ogni 10-12 anni, mentre terremoti con Ma>5.5

(VIII-IX grado MCS) si ripetono con una frequenza di un evento ogni 50 anni, che si mantiene costante indicando una buona completezza del catalogo.

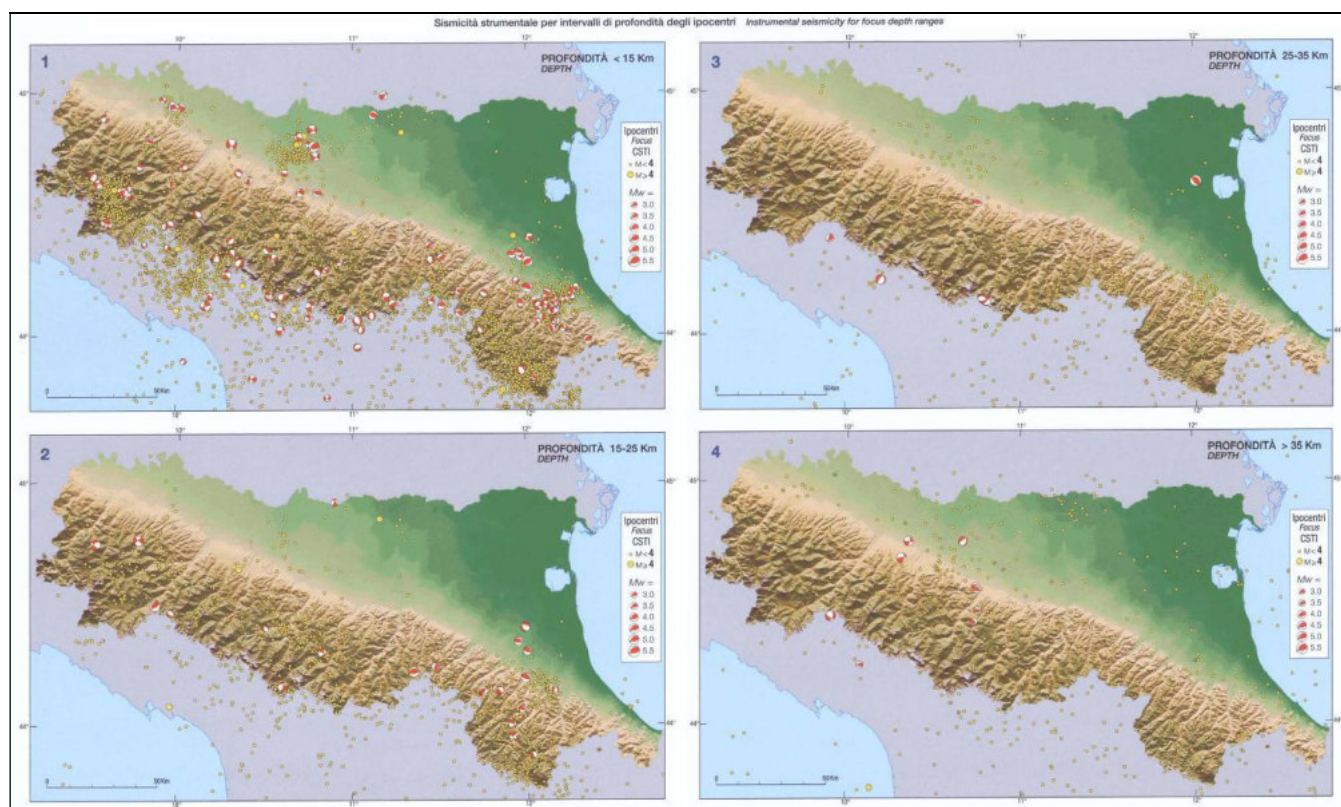


Figura 13 – Sismicità strumentale per intervalli di profondità degli ipocentri.

3.1.4 Sismicità recente

La sismicità recente che ha interessato il territorio comunale di Pavullo è stata desunta dal Bollettino Sismico Italiano elaborato da ISIDe Working Group (INGV, 2010), Italian Seismological instrumental and parametric database: <http://iside.rm.ingv.it>.

Nello specifico sono stati ricercati i terremoti, registrati nell'intervallo di tempo tra il 01/01/2007 e il 25/08/2015, aventi una magnitudo maggiore di 5 in un raggio di 100 km e maggiore di 4.5 nel raggio di 50 Km dal Comune di Pavullo.

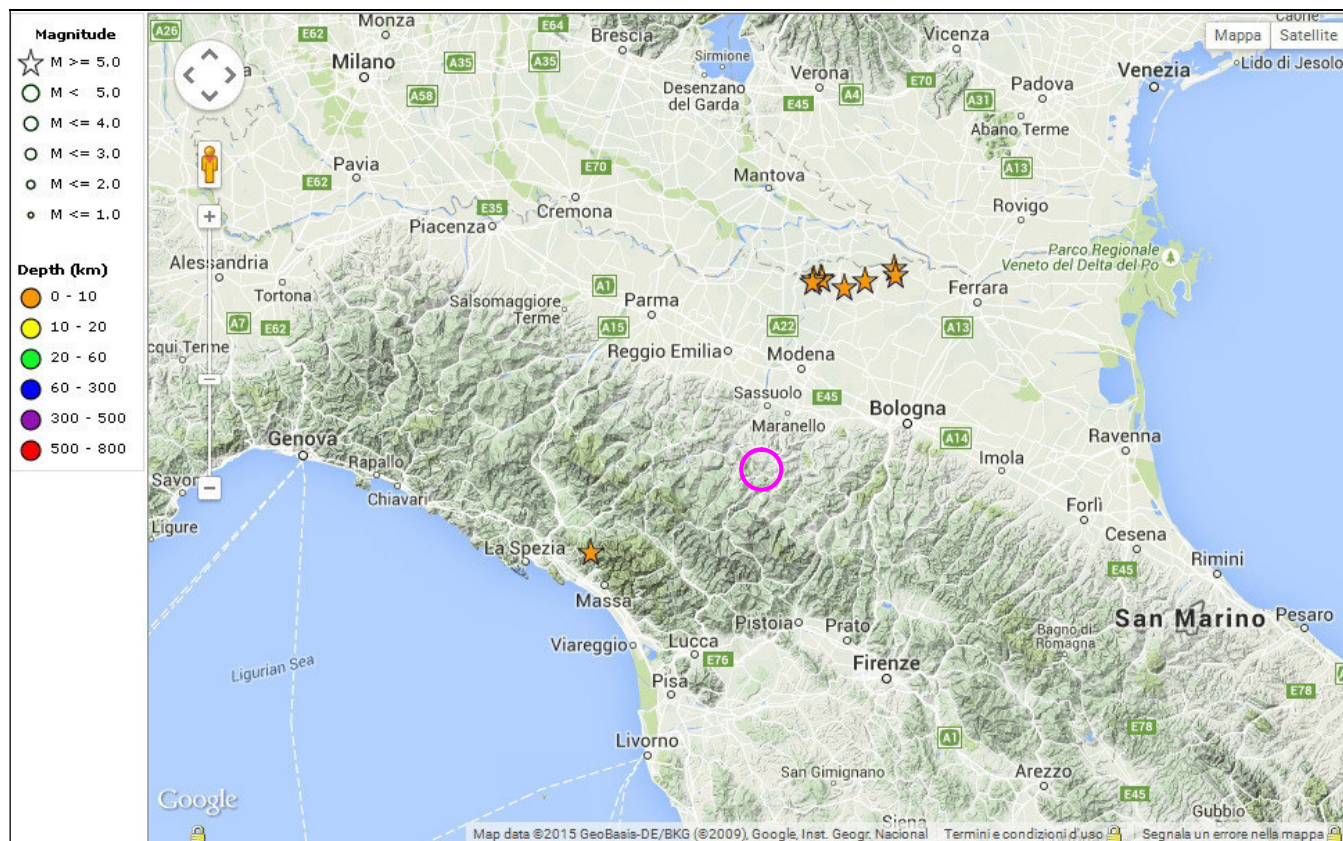


Figura 14: Eventi sismici recenti registrati con $M > 5$ in un raggio di 100 Km dal Comune di Pavullo

Data: 01/01/2007 → 25/08/2015

Distanza: 100 km da Pavullo

Magnitudo: > 5

Terremoti totali: 9

Tempo Origine (UTC)	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo	Fonte
2013-06-21 10:33:56.070	44.09	10.062	5.7	5.1-Mw	BULLETIN
2012-05-29 11:00:22.990	44.866	10.976	7.2	5.1-ML	BULLETIN
2012-05-29 11:00:01.680	44.856	10.941	8.7	5.0-ML	REMO
2012-05-29 10:55:56.550	44.865	10.98	4.4	5.3-Mw	REMO
2012-05-29 08:25:51.480	44.865	10.948	7.9	5.0-ML	REMO
2012-05-29 07:00:02.880	44.842	11.066	8.1	5.6-Mw	REMO
2012-05-20 03:02:47.090	44.86	11.152	9.1	5.0-ML	BULLETIN
2012-05-20 02:07:28.950	44.874	11.27	6.1	5.0-ML	BULLETIN
2012-05-20 02:03:50.170	44.896	11.264	9.5	5.8-Mw	BULLETIN

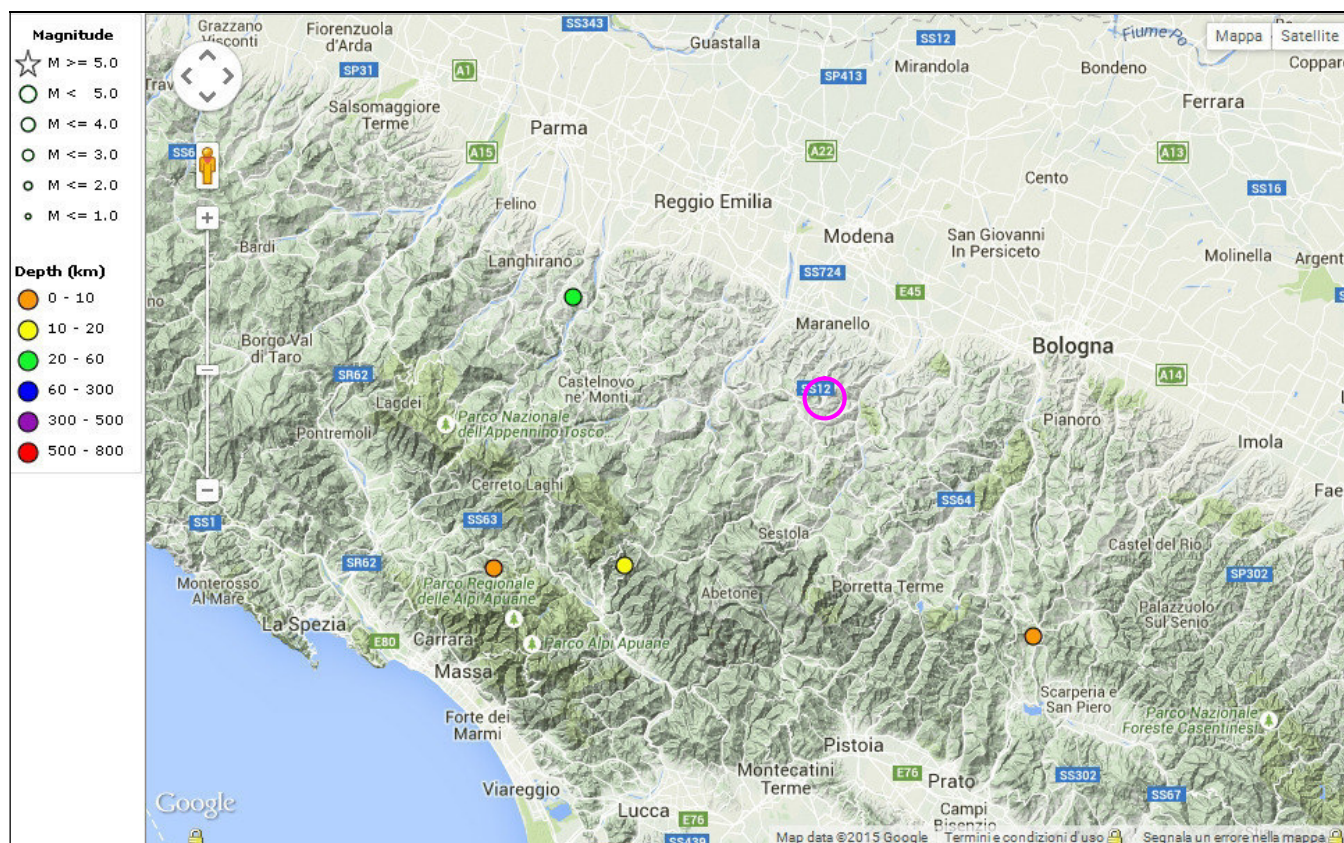


Figura 15: Eventi sismici recenti registrati con M > 4.5 in un raggio di 50 Km dal Comune di Pavullo

Data: 01/01/2007 → 25/08/2015

Distanza: 50 km da Pavullo

Magnitudo: > 4.5

Terremoti totali: 4

Tempo Origine (UTC)	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo	Fonte
2013-06-30 14:40:08.480	44.16	10.187	6.1	4.5--Mw	BULLETIN
2013-01-25 14:48:18.270	44.164	10.446	19.8	4.8--Mw	BULLETIN
2008-12-23 15:24:21.770	44.544	10.345	22.9	4.9--Mw	BULLETIN
2008-03-01 07:43:13.080	44.063	11.253	3.8	4.5--Mw	BULLETIN

Come si evince dalle Tabelle sopra riportate, gli eventi principali (M>5) registrati nel raggio di 100 Km dal Comune di Pavullo sono i terremoti del maggio-giugno 2012 della bassa pianura modenese e ferrarese e quello di giugno 2013 della Lunigiana in Toscana.

3.2 NORMATIVA SISMICA DI RIFERIMENTO

Ordinanza P.C.M. 3274/2003

A seguito della nuova classificazione sismica (Ordinanza P.C.M. 3274 del 20/3/2003 e s.m), il territorio nazionale è diviso in 4 zone sismiche caratterizzate da differenti valori dell'accelerazione orizzontale massima (ag/g) su suolo di categoria A.

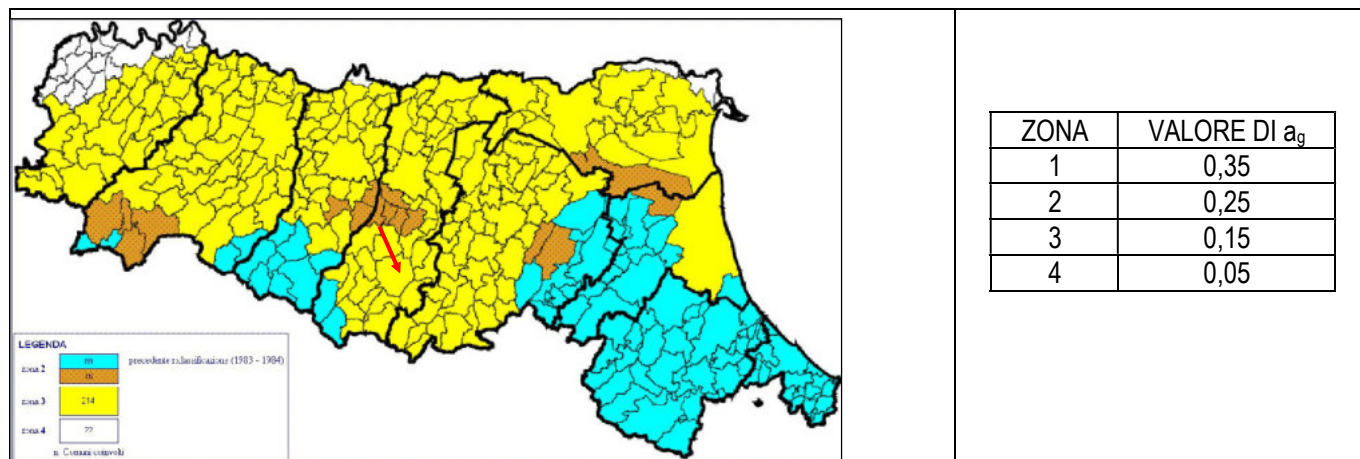


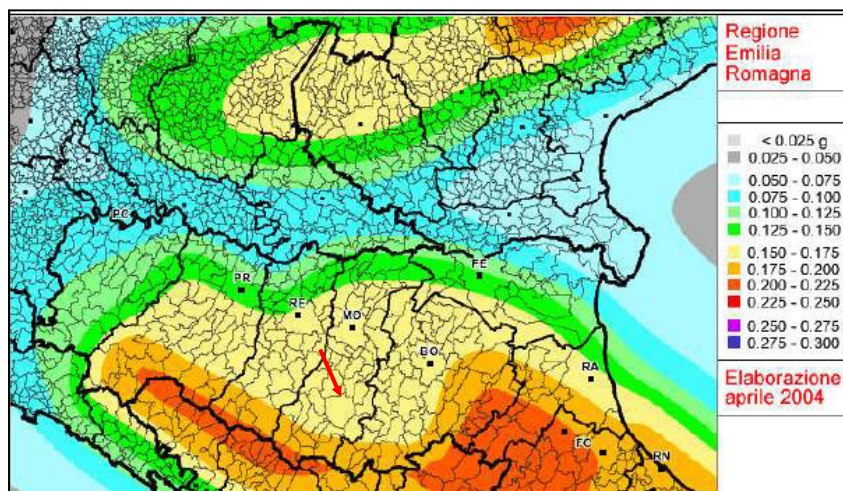
Fig. 11 - Classificazione sismica attuale di riferimento - Ordinanza PCM del 20 marzo 2003 n. 2374 All. 1.

Il Comune di Pavullo ricade in "zona sismica 3" a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale massima convenzionale su suolo di categoria A, riferita ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, ed espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g, pari a $a_g = 0,15g$.

Ordinanza P.C.M. 3519/2006

Successivamente, l'Ordinanza PCM 3519/2006 ha indicato i *Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*.

A tale ordinanza è allegata la *Mappa di Pericolosità sismica di riferimento a scala nazionale* nella quale è possibile verificare che il territorio del Comune di Pavullo è compreso nell'area caratterizzata da **valori dell'accelerazione massima al suolo**



(amax), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita ai suoli molto rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat. A, All. 2, 3.1), **compresi tra 0,150-0.175** l'accelerazione di gravità g.

Fig. 12 - Mappa di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima al suolo (amax) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita ai suoli molto rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat. A) allegata all'Ordinanza PCM n. 3519 del 28 aprile 2006. (Fonte: Sito web RER).

Del. Rer. 112/2007

La RER ha approvato la Del. n. 112 del 02-05-2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica."; in All. A4 sono riportati i valori di accelerazione max, espressa sempre in frazione dell'accelerazione di gravità g (a_{refg}), per ogni comune della Regione.

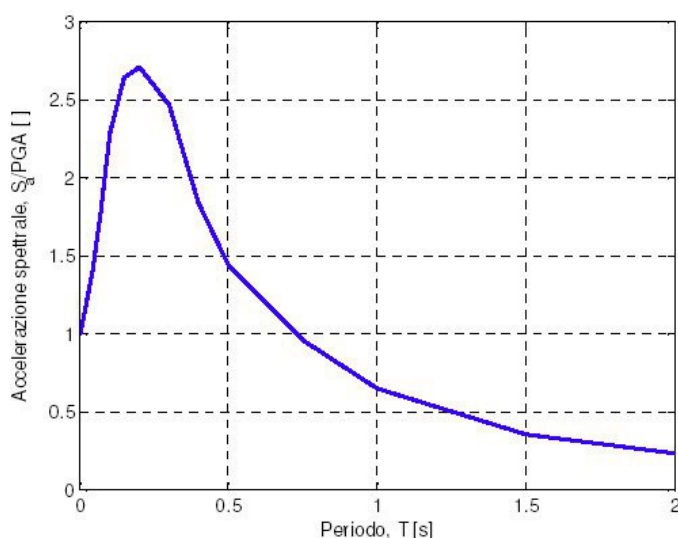
MO	Nonantola	0.160
MO	Novi di Modena	0.139
MO	Palagano	0.164
MO	Pavullo	0.159
MO	Pievepelago	0.194
MO	Polinago	0.161
MO	Prignano	0.158

Per il Comune di Pavullo: $a_{refg}=0,159$

Definizione del moto di riferimento

La PGA per un periodo di ritorno di 475 anni riportata nelle mappe di pericolosità sismica di INGV (Meletti C., Montaldo V., 2007. Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>) varia nell'intervallo $0,150 \div 0,175 g$. Tali dati sono anche stati utilizzati anche dalla Regione Emilia Romagna nella redazione della Delibera dell'Assemblea Legislativa n° 112 - 2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica" dove viene indicata una PGA corrispondente a $0,159 g$ per l'intero territorio comunale.

La RER fornisce lo spettro di risposta normalizzato, dal quale è possibile ottenere, moltiplicando i valori della tabella seguente per il valore di a_{refg} di ogni comune (vedi sopra), lo spettro di risposta a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per ogni comune dell'Emilia-Romagna.



T (s)	S_a/a_{refg}
0,00000	1,00000
0,04000	1,38865
0,07000	1,75927
0,10000	2,28349
0,15000	2,63726
0,20000	2,70745
0,30000	2,46642
0,40000	1,84047
0,50000	1,44476
0,75000	0,95494
1,00000	0,64546
1,50000	0,35479
2,00000	0,23070

Spettro di risposta normalizzato ($T_R = 475$ anni, smorzamento = 5%) per l'Emilia-Romagna, e valori che lo definiscono.

Nella prima colonna sono riportati i valori del periodo proprio T , espresso in secondi, nella seconda i valori di accelerazione spettrale normalizzata al valore di accelerazione massima orizzontale (PGA), espressa in frazione dell'accelerazione di gravità g (pari a $9.81m/s^2$), al corrispondente periodo T .

NTC2018

Le NTC stabiliscono che l'accelerazione orizzontale massima del sito di riferimento non è più riferita ad una classificazione comunale ma viene calcolata considerando le proprietà del sito in esame, utilizzando come riferimento le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi (§ 7.11.3 NTC18). In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella seguente Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

Il suolo può essere assimilato e classificato in modo semplificato in una delle 5 classi principali (A,B,C,D,E).

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>

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad \text{m/s}$$

h_i = spessore dello strato i-esimo

$V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nello strato i-esimo

N = numero strati considerati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

3.3 INDAGINI SISMICHE

Per la caratterizzazione sismica del suolo di fondazione oltre alla consultazione dello Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Pavullo, sono state eseguite indagini geofisiche “sito-specifiche”, comprensive di:

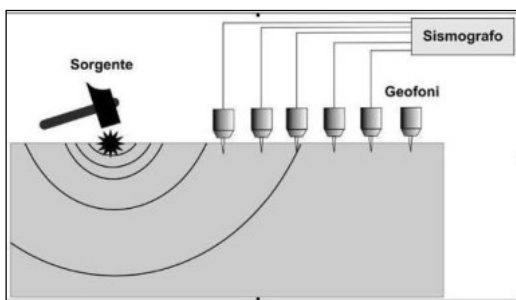
- n° 1 indagine di sismica a rifrazione con metodologia MASW (All. 2)
- n° 1 prospezione sismica passiva di microtrempi HVSR (All. 3)

3.3.1 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE TIPO MASW – ALLEGATO 2

Al fine di valutare la possibilità di definire in modo semplificato la categoria di suolo e fornire una prima caratterizzazione della risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) utili a definire il profilo verticale della VS (velocità di propagazione delle onde di taglio).

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo con le NTC 2018.

Acquisizione e strumentazione impiegata



La tecnica non è invasiva e richiede una fonte di energizzazione (mazza battente).

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.

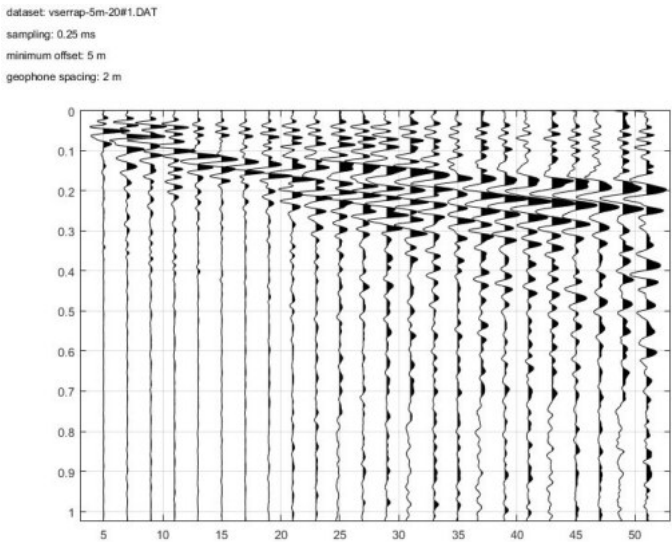
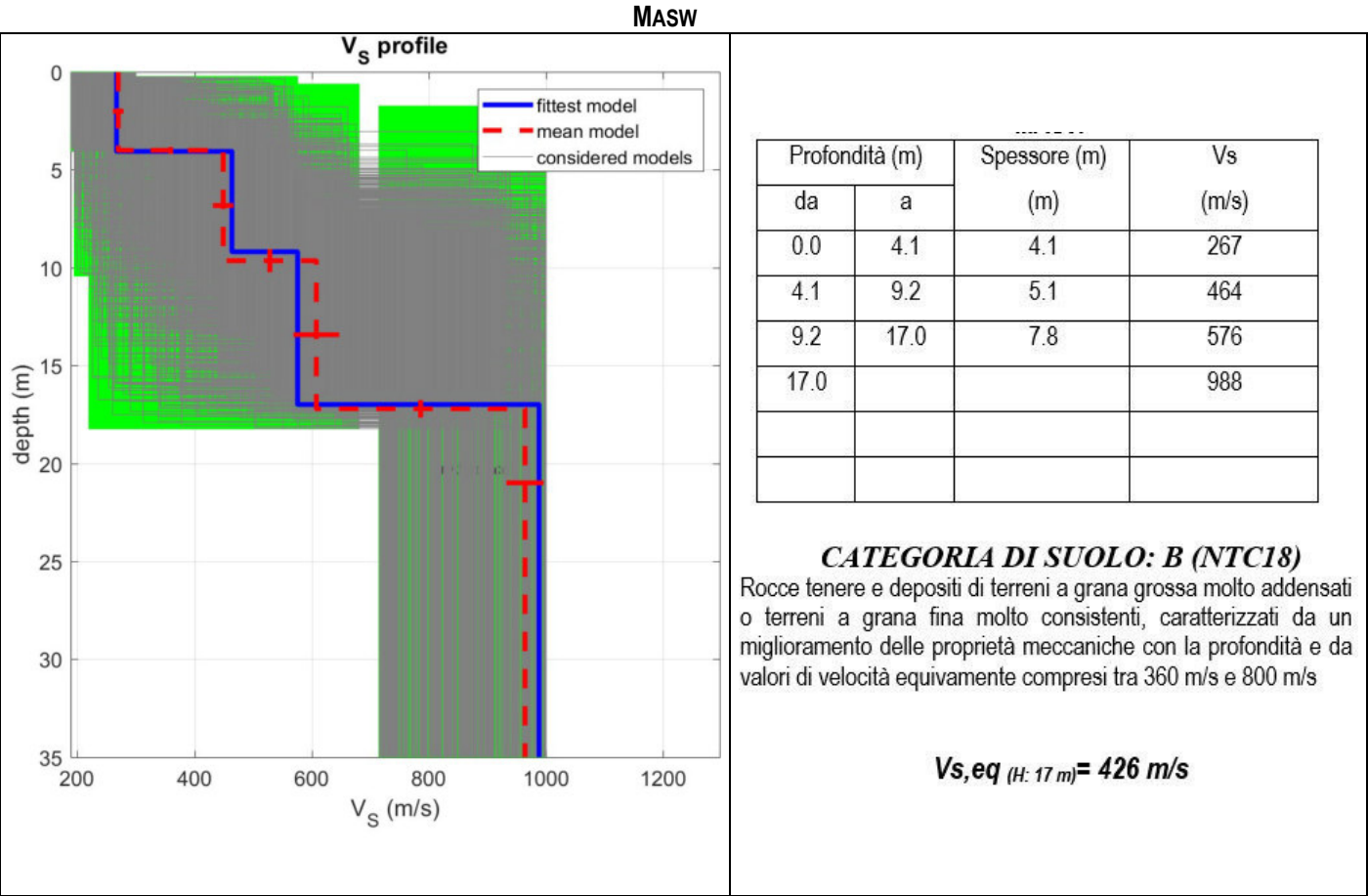
L'acquisizione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (Sismografo PASI mod. 16S-U) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz (spaziatura tra geofoni 2 m, 1s di acquisizione, offset minimi di 2-5 m).



L'indagine eseguita è composta da n° 1 stendimento lungo 46 m; l'ubicazione dello stendimento è riportata nella pagina seguente.

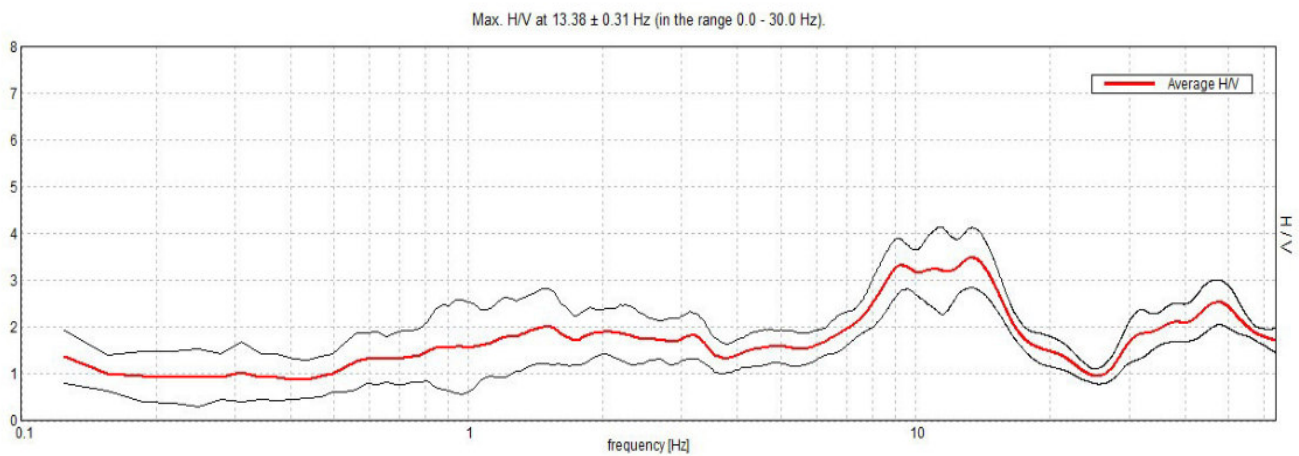
Elaborazione dati

Per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (VS), i dati acquisiti sono stati elaborati tramite i seguenti passaggi: determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime. Di seguito si riporta, per la Masw, il profilo verticale delle Vs (Allegato 4).



L'andamento della curva H/V unitamente all'osservazione del profilo Vs della Masw permette di rilevare l'assenza di sostanziali inversioni di velocità; la linea rossa (average H/V) si mantiene con valori superiori a 1.

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



Frequenze di risonanza

La curva H/V mostra un picco principale di risonanza a 13.38 Hz.

Questo andamento, ritenuto affidabile e di origine stratigrafica, evidenzia come ci sia un primo passaggio di rigidezza tra i terreni di copertura e il primo substrato, stimabile intorno ai 4-5 m di profondità.

Il range tipico di interesse ingegneristico/strutturale delle costruzioni è compreso tra 1-10 Hz.

Si lascia alla fase progettuale il calcolo della frequenza di vibrazione delle strutture in progetto. La conoscenza di tale caratteristica è necessaria al fine di valutare l'esistenza di eventuali incrementi dell'ampiezza delle oscillazioni sismiche, legati a fenomeni di doppia risonanza tra la frequenza fondamentale dei terreni superficiali e il primo modo di vibrare dei fabbricati in previsione.

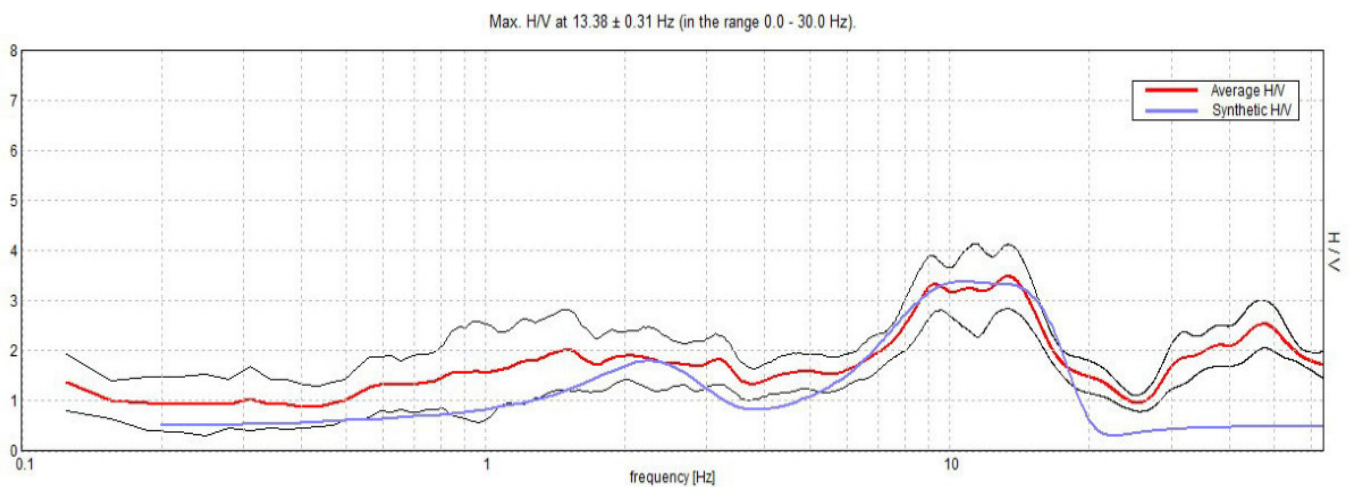
Valutazione della $VsEq$

La procedura è la seguente: la curva sperimentale HVSR, che ha il grande vantaggio rispetto ai singoli spettri di fornire una correzione automatica per il livello assoluto del tremore, viene fittata con una curva teorica usando come vincolo lo spessore dello strato più superficiale (o altro orizzonte) di sottosuolo, che è sempre indipendentemente noto dalle indagini geognostiche eseguite a corredo del progetto edilizio.

La procedura di inversione consiste in 3 passi:

- 1) identificazione di un orizzonte stratigrafico superficiale (di solito ad alcuni metri di profondità),
- 2) identificazione del marker HVSR corrispondente,
- 3) fit della curva HVSR teorica utilizzando 1) e 2) come vincoli (vedi figura seguente).

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

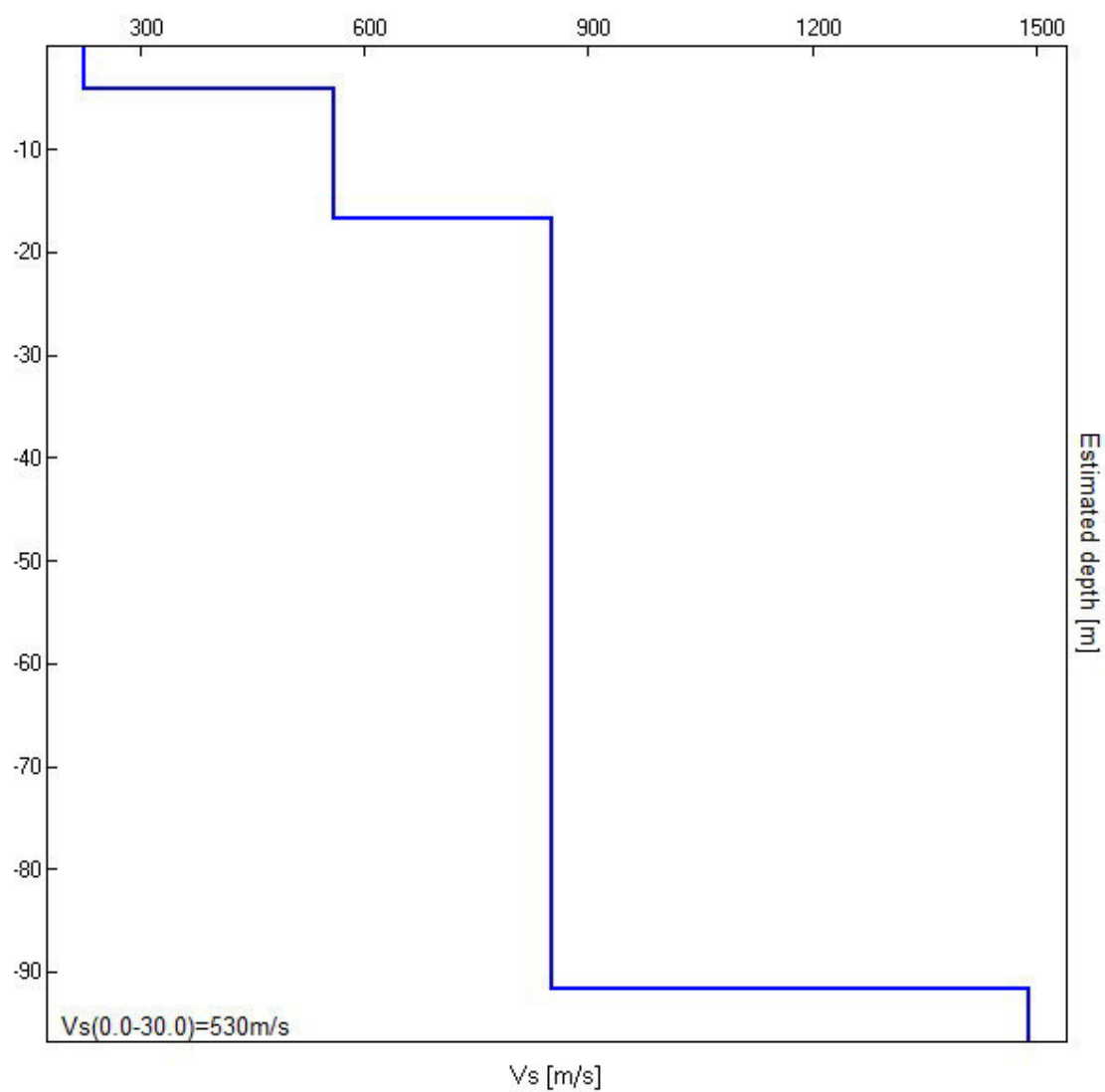


La curva HVSR teorica è calcolata assumendo un campo di tremore con sorgenti puntuali distanti posizionate casualmente sulla superficie, ed un campo d'onde che si propagano in un mezzo stratificato 1-D, con i coefficienti di accoppiamento di Ben-Menahem e Singh (1981), correzione di stabilità di Dunkin (1965) per i propagatori e con valori di Q indipendente dalla frequenza. Il fit della curva HVSR fornisce un modello stratigrafico sismico dell'andamento di Vs con la profondità da cui è immediato calcolare $VsEq$.

Di seguito si riporta il profilo delle Vs ottenuto, che schematizza il modello di sottosuolo geosismico fino al bedrock, che presenta valori superiori agli 800 m/s.

Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
4.20	4.20	225	0.35
16.70	12.50	560	0.35
91.70	75.00	850	0.35
inf.	inf.	1490	0.35

VsEq=408 m/s (H: 16.7 m)



3.4 CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO

Utilizzando l'analisi semplificata, l'osservazione dei dati ottenuti con le indagini geofisiche unitamente alle conoscenze geologiche e litostratigrafiche, permette di ottenere un valore della $V_{s,eq}=426$ m/s a 0 m di prof (Masw).

Il suolo di fondazione del sito d'intervento può essere definito:

- suolo di fondazione Categoria B (NTC2018)

a cui corrisponde un coefficiente di amplificazione stratigrafica **$S_s=1.20$**

3.5 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (Tab. 3.2.III):

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella seguente Tab. 3.2.V, in funzione della categoria topografica definita e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

La variazione spaziale del coefficiente di amplificazione topografica è definita da un decremento lineare con l'altezza del pendio o del rilievo, dalla sommità o dalla cresta, dove S_T assume il valore massimo riportato nella Tab. 3.2.V, fino alla base, dove S_T assume valore unitario.

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

L'area in esame si colloca in posizione subpianeggiante nella piana di Pavullo, pertanto la **categoria topografica è T1** a cui si fa corrispondere un coefficiente di amplificazione: **$S_T=1.0$** .

3.6 CALCOLO DEI PARAMETRI SISMICI DEL SITO (NTC 2018)

I parametri spettrali per definire l'azione sismica di progetto vengono calcolati:

EDIFICI RESIDENZIALI

- a) Classe dell'opera II - Cu = 1
- b) vita nominale della costruzione: 50 anni
- c) azione sismica: stato limite di salvaguardia della vita (tempo di ritorno: 475 anni)

I parametri tabellati sono sempre riferiti al substrato rigido. Oltre ad ag si riportano anche altri due parametri:

- Fo: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- Tc: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Il valore del sito viene ottenuto tramite la media pesata dei valori che si riferiscono ai quattro punti del reticolo che comprendono l'area in oggetto mediante la seguente formula:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

Dove:

p = valore del parametro di interesse nel punto in esame

pi = valore del parametro di interesse nell'i-simo punto della maglia elementare contenente il punto in esame

di = distanza del punto in esame dall'i-simo punto della maglia suddetta

Parametri sismici

Di seguito si riportano i parametri e i coefficienti sismici del sito.

Sito in esame	Siti di riferimento			
latitudine: 44,327629	Sito 1 ID: 17610	Lat: 44,3035	Lon: 10,7663	Distanza: 5830,478
longitudine: 10,831328	Sito 2 ID: 17611	Lat: 44,3051	Lon: 10,8360	Distanza: 2531,553
Classe: 2	Sito 3 ID: 17389	Lat: 44,3551	Lon: 10,8338	Distanza: 3058,787
Vita nominale: 50	Sito 4 ID: 17388	Lat: 44,3535	Lon: 10,7640	Distanza: 6080,312

Parametri sismici

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T1
Periodo di riferimento:	50anni
Coefficiente cu:	1

Di seguito i parametri sismici ai vari stati limite:

Parametri sismici		Operatività SLO	
Probabilità di superamento:	81 %	Ss:	1,200
Tr:	30[anni]	Cc:	1,450
ag:	0,056 g	St:	1,000
Fo:	2,498	Kh:	0,012
Tc*:	0,251[s]	Kv:	0,006
		Amax:	0,664
		Beta:	0,180
Parametri sismici		Danno SLD	
Probabilità di superamento:	63 %	Ss:	1,200
Tr:	50[anni]	Cc:	1,440
ag:	0,070 g	St:	1,000
Fo:	2,488	Kh:	0,015
Tc*:	0,264[s]	Kv:	0,008
		Amax:	0,825
		Beta:	0,180
Parametri sismici		Salvaguardia della vita SLV	
Probabilità di superamento:	10 %	Ss:	1,200
Tr:	475[anni]	Cc:	1,410
ag:	0,160 g	St:	1,000
Fo:	2,526	Kh:	0,046
Tc*:	0,292[s]	Kv:	0,023
		Amax:	1,879
		Beta:	0,240
Parametri sismici		Prevenzione del collasso SLC	
Probabilità di superamento:	5 %	Ss:	1,200
Tr:	975[anni]	Cc:	1,400
ag:	0,201 g	St:	1,000
Fo:	2,534	Kh:	0,075
Tc*:	0,302[s]	Kv:	0,037
		Amax:	2,363
		Beta:	0,310

STRUTTURA “CASA DEL VOLONTARIATO”

- a) Classe dell'opera IV - Cu = 2
 b) vita nominale della costruzione: 50 anni
 c) azione sismica: stato limite di salvaguardia della vita (tempo di ritorno: 949 anni)

I parametri tabellati sono sempre riferiti al substrato rigido. Oltre ad ag si riportano anche altri due parametri:

- Fo: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- Tc: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Il valore del sito viene ottenuto tramite la media pesata dei valori che si riferiscono ai quattro punti del reticolo che comprendono l'area in oggetto mediante la seguente formula:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

Dove:

p = valore del parametro di interesse nel punto in esame

pi = valore del parametro di interesse nell'i-simo punto della maglia elementare contenente il punto in esame

di = distanza del punto in esame dall'i-simo punto della maglia suddetta

Parametri sismici

Di seguito si riportano i parametri e i coefficienti sismici del sito.

Sito in esame	Siti di riferimento
latitudine: 44,327629	Sito 1 ID: 17610 Lat: 44,3035 Lon: 10,7663 Distanza: 5830,478
longitudine: 10,831328	Sito 2 ID: 17611 Lat: 44,3051 Lon: 10,8360 Distanza: 2531,553
Classe: 4	Sito 3 ID: 17389 Lat: 44,3551 Lon: 10,8338 Distanza: 3058,787
Vita nominale: 50	Sito 4 ID: 17388 Lat: 44,3535 Lon: 10,7640 Distanza: 6080,312

Parametri sismici

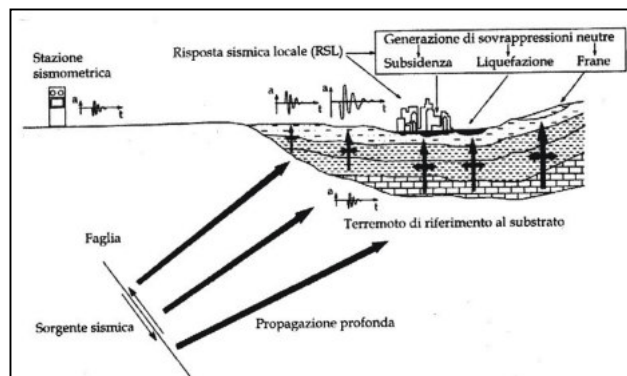
Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T1
Periodo di riferimento:	100 anni
Coefficiente cu:	2

Di seguito i parametri sismici ai vari stati limite:

Parametri sismici	Operatività SLO
Probabilità di superamento: 81 %	Ss: 1,200
Tr: 60[anni]	Cc: 1,430
ag: 0,075 g	St: 1,000
Fo: 2,495	Kh: 0,016
Tc*: 0,268[s]	Kv: 0,008
	Amax: 0,885
	Beta: 0,180
Parametri sismici	Danno SLD
Probabilità di superamento: 63 %	Ss: 1,200
Tr: 101[anni]	Cc: 1,420
ag: 0,092 g	St: 1,000
Fo: 2,489	Kh: 0,020
Tc*: 0,277[s]	Kv: 0,010
	Amax: 1,087
	Beta: 0,180
Parametri sismici	Salvaguardia della vita SLV
Probabilità di superamento: 10 %	Ss: 1,200
Tr: 949[anni]	Cc: 1,400
ag: 0,199 g	St: 1,000
Fo: 2,534	Kh: 0,057
Tc*: 0,302[s]	Kv: 0,029
	Amax: 2,343
	Beta: 0,240
Parametri sismici	Prevenzione del collasso SLC
Probabilità di superamento: 5 %	Ss: 1,150
Tr: 1950[anni]	Cc: 1,390
ag: 0,244 g	St: 1,000
Fo: 2,567	Kh: 0,087
Tc*: 0,312[s]	Kv: 0,044
	Amax: 2,753
	Beta: 0,310

3.7. PERICOLOSITÀ SISMICA ED EFFETTI LOCALI

La diversa entità dei danni prodotti da un terremoto nello stesso ambito territoriale dimostra che le azioni sismiche possono



assumere, anche a distanze di poche decine di metri, caratteristiche differenti in funzione delle diverse condizioni geologiche che caratterizzano un dato ambito territoriale (morfologia superficiale, morfologia del substrato roccioso sepolto, presenza/profondità della falda freatica, proprietà del sottosuolo, presenza di faglie, ecc).

Terreni con caratteristiche geotecniche particolarmente scadenti possono, in condizioni di sollecitazione sismica, perdere

temporaneamente o permanentemente la capacità portante a loro ascrivibile in condizioni statiche, causando cedimenti e lesioni negli edifici, anche se questi sono stati costruiti secondo criteri tali da far loro sopportare le sollecitazioni indotte dai terremoti attesi. Altro caso riguarda l'effetto di liquefazione in condizioni sismiche dei terreni sabbiosi saturi che, sotto sollecitazioni cicliche, tendono a perdere la loro resistenza al taglio.

In alcuni casi, le particolari caratteristiche del sito, sia di tipo morfologico sia derivanti dalla natura del substrato, possono determinare effetti di amplificazione delle sollecitazioni, rispetto ad una situazione tipo. Si precisa che la situazione tipo è in generale definita da un'area pianeggiante con roccia granitica come appoggio per le strutture di fondazione degli edifici oppure, negli studi di microzonazione sismica, come il substrato roccioso (bedrock) che risente del terremoto di riferimento per il sito in questione, rispetto al quale si verifica l'eventuale effetto di amplificazione.

Tale effetto di amplificazione è legato alla presenza di terreni con rigidità inferiori a quella di riferimento; tale condizione di minore rigidità può ad esempio essere espressa dal valore dell'impedenza acustica della roccia (prodotto della densità per la velocità delle onde sismiche): più l'impedenza acustica della roccia è minore rispetto a quella della roccia di riferimento più l'effetto di amplificazione si rende evidente.

L'effetto di amplificazione sismica si risente poi anche quando il substrato è costituito da "terreni" (in senso geotecnico: terreni quaternari, depositi superficiali, ecc.), che per la loro stessa natura sono caratterizzati da valori di impedenza acustica sempre inferiori a quelli della roccia di riferimento. In questi casi, tuttavia, accade spesso che il fenomeno di amplificazione non risulta la causa delle lesioni e dei crolli degli edifici costruiti su questi terreni. In effetti, sono le caratteristiche geotecniche dei medesimi, che in condizioni di sollecitazione sismica tendono a peggiorare decisamente, a determinare i crolli: a causa della perdita di capacità portante alle strutture di fondazione, che avviene prima che l'effetto di amplificazione venga risentito dalla struttura degli immobili.

Fondamentale quindi è la valutazione della "risposta sismica locale" (RSL). Con tale termine s'intende l'insieme delle modifiche in intensità, ampiezza e frequenza, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock), posta ad una certa profondità nel sottosuolo, subisce attraverso gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie.

I due coefficienti di amplificazione che sono stati considerati in questo studio sono:

S_s (in base al profilo stratigrafico e tipo di suolo) e S_T (coefficiente di amplificazione topografica)

Per l'area in esame non sono invece previsti effetti locali indotti da instabilità e da liquefazione.

3.7.1 MICROZONAZIONE SISMICA - CARTA DELLE MOPS

Dalla consultazione dello Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Pavullo, di seguito si riporta la “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica”, nella quale il sito in studio rientra nelle “Zone stabili”.

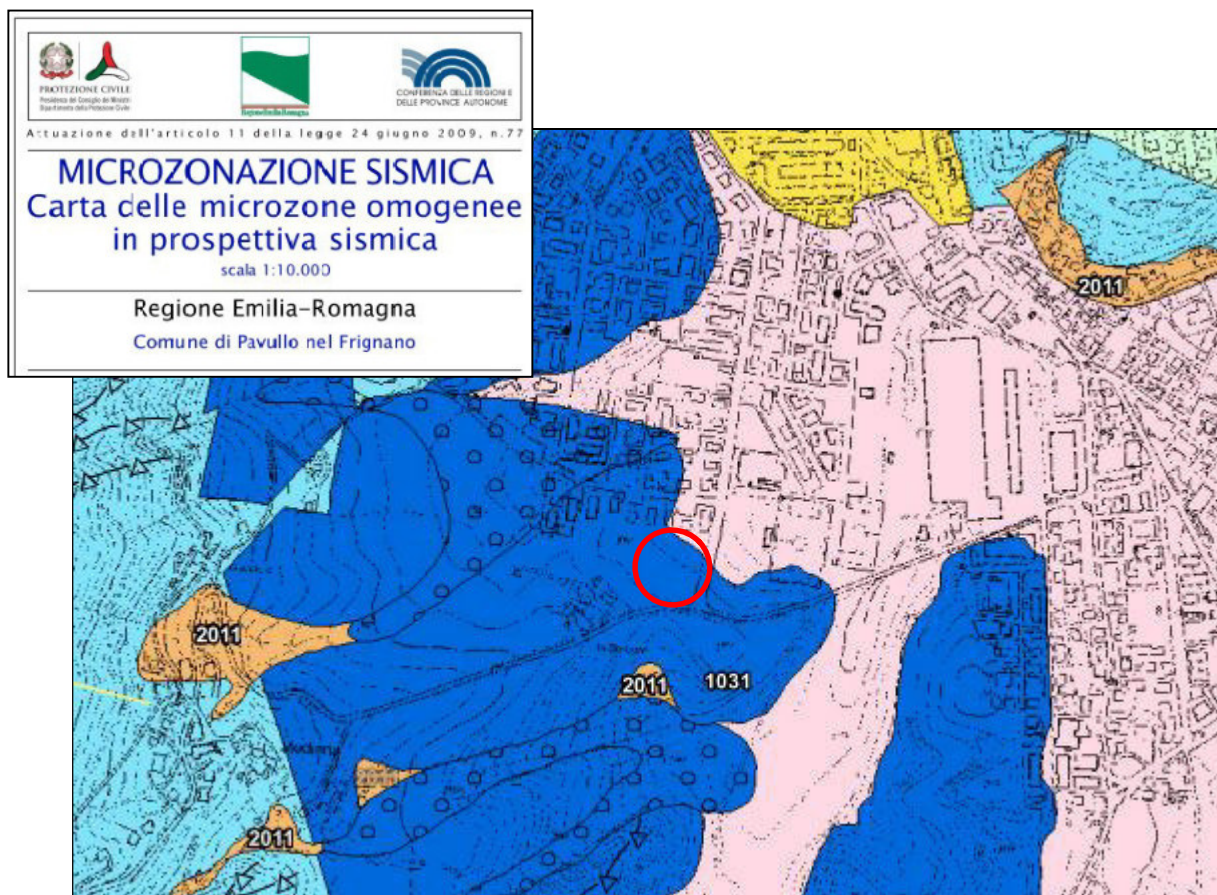
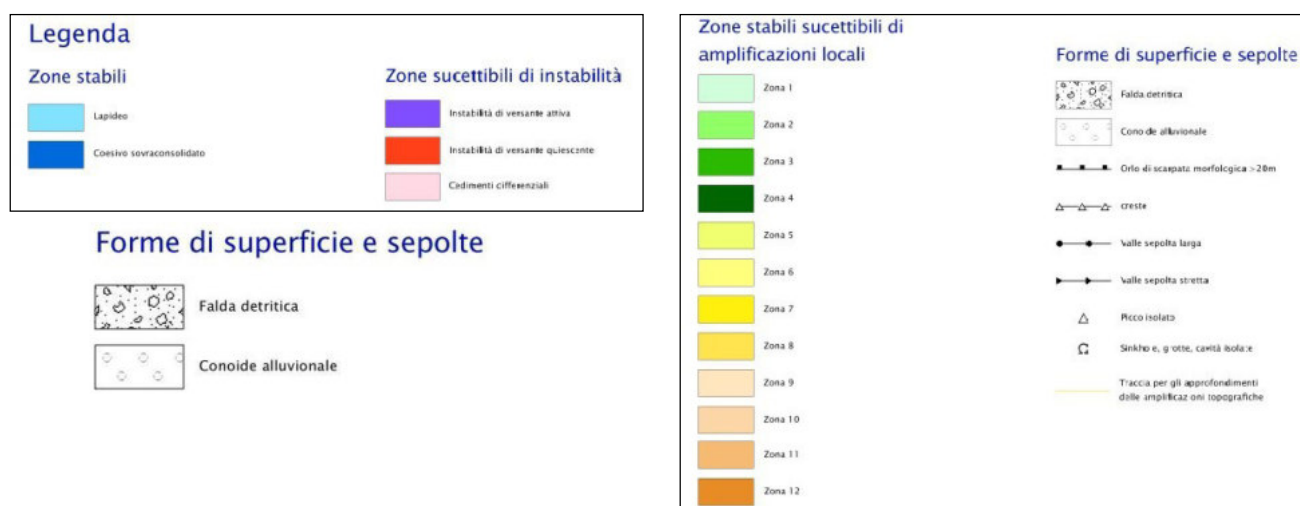


Fig. 13



Di seguito la cartografia di Piano della Microzonazione sismica di Pavullo con riportata la suddivisione delle Zone.

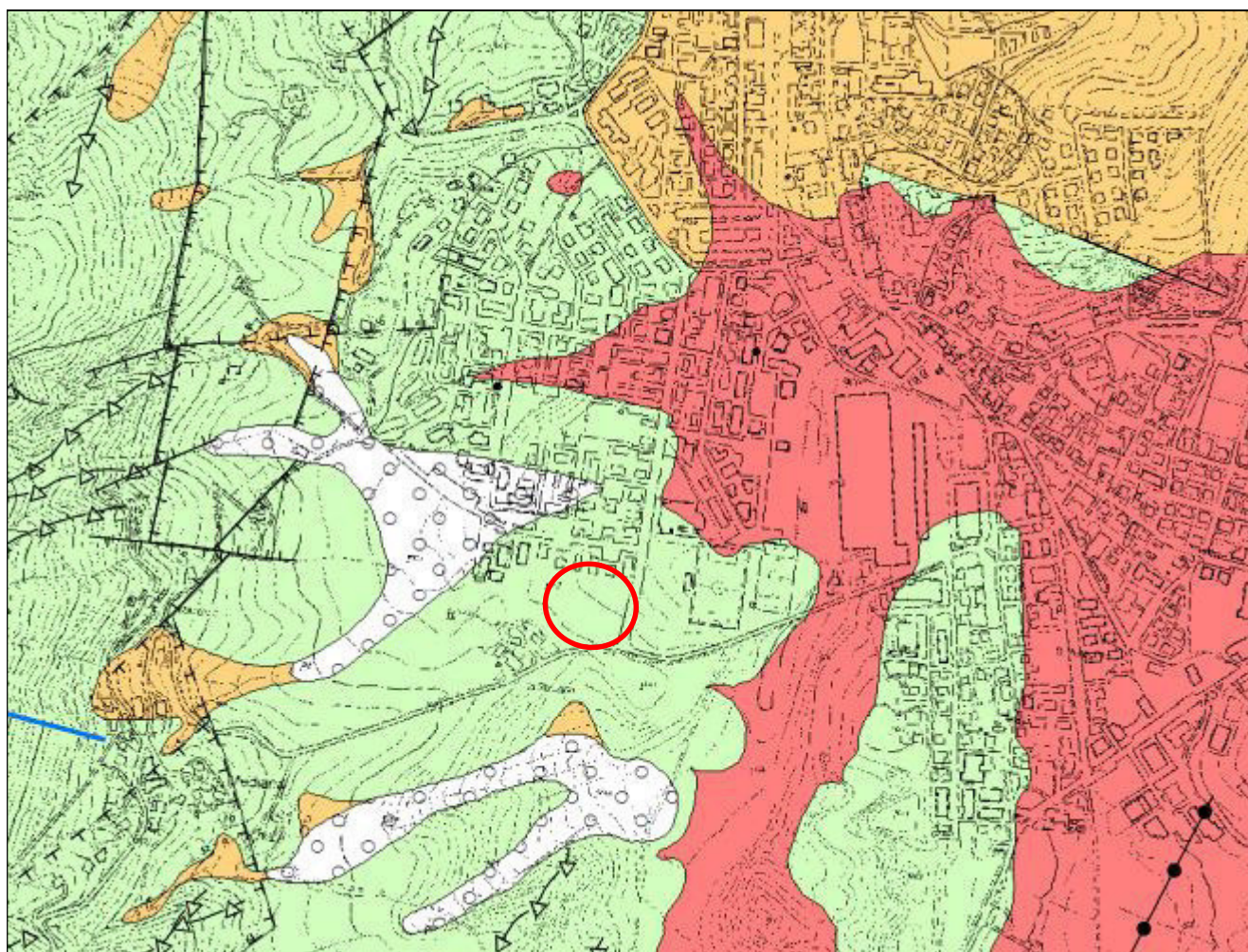


Fig. 14



L'area di PUA rientra nelle Zone stabili.

Le indagini sito specifiche mostrano invece come possa essere presente un'amplificazione di tipo stratigrafico.

3.8 AMPLIFICAZIONE SISMICA PER CARATTERISTICHE LITOLOGICHE - DGR 630/2019

La Regione con deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007 ha approvato l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. n. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a gli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", successivamente aggiornato con propria deliberazione n. 2193/2015.

Alla luce dei recenti studi di microzonazione sismica realizzati per la ricostruzione dei Comuni dell'Italia Centrale colpiti dalla sequenza sismica iniziata il 24 agosto 2016, la Commissione Tecnica, nella versione 4.1 degli standard, richiede la valutazione dei fattori di amplificazione sismica anche in termini di accelerazione per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s, tra 0,4 e 0,8 s e tra 0,7 e 1,1 s; tali parametri non sono previsti nei citati indirizzi regionali (Delibera Assemblea legislativa n. 112/2007 e propria deliberazione n. 2193/2015).

In data 6 aprile 2018 il CNR-IDPA, Istituto che ha curato le tabelle dell'Allegato A2 della Delibera Assemblea legislativa n. 112/2007 e dell'aggiornamento propria deliberazione n. 2193/2015, ha inviato un'integrazione all'Allegato A2 contenente tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica anche in termini di accelerazione per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s, tra 0,4 e 0,8 s, tra 0,7 e 1,1 s.

In data 21 maggio 2018 il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, lo stesso che ha curato l'Allegato A3 della Delibera Assemblea legislativa n. 112/2007 e dell'aggiornamento propria deliberazione n. 2193/2015, ha trasmesso la revisione dell'Allegato A3;

Viste le modifiche di alcune parti dell'Allegato A e degli Allegati tecnici alla propria deliberazione n. 2193/2015, rese necessarie dall'approvazione della L.R. n. 24/2017 e dalle revisioni degli Allegati A2 e A3 sopra indicate; si ritiene pertanto opportuno provvedere all'aggiornamento dell'atto di indirizzo di cui alla citata propria deliberazione n. 2193/2015, al fine di indirizzare l'attività pianificatoria degli Enti locali, per definire in modo omogeneo i criteri e le modalità di analisi della risposta sismica locale e di microzonazione sismica del territorio regionale.

Viene quindi approvata la nuova DGR 630/2019 quale aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico, denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" di cui alla propria deliberazione n. 2193/2015, per ridefinire i criteri, le procedure e le specifiche tecniche per la microzonazione sismica del territorio regionale;

La Delibera regionale, propone un'analisi semplificata al secondo livello di approfondimento con lo scopo di valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale. Essa suggerisce la definizione delle amplificazioni locali sulla base delle tabelle allegate in appendice al documento e riferite a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche ("secondo livello" di analisi).

Tale livello di approfondimento prevede la determinazione dei coefficienti di amplificazione sismica impiegando le tabelle e le formule dell'Allegato A2 (A2.1.1 e A2.1.2) che permettono di calcolare i fattori di amplificazione sismica rispetto ad un suolo di riferimento.

Sulla base di quanto sopra riportato e in considerazione delle risultanze delle indagini svolte, l'area in studio rientra nel:

A2.1.1 - APPENNINO

Le tabelle relative al settore appenninico sono il riferimento per la stima semplificata dell'amplificazione stratigrafica nelle aree collinari e montane dell'Emilia-Romagna. In caso di coperture direttamente poggianti su substrato rigido, ovvero bedrock sismico, generalmente caratterizzato da $V_s > 800$ m/s, si devono usare le seguenti tabelle:

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,8	1,7	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
15	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,0
20	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,0
25	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,3	1,0
30		1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2
35		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
40		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
50		1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,4	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,7	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	2,2	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
20	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
25	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1
30		2,2	2,2	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2
35		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,2
50		2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,2

Fattore di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,5	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,4	2,3	2,1	1,7	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0
20	2,4	2,4	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
25	2,4	2,4	2,4	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0
30		2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,1
35		2,3	2,3	2,3	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
50		2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	1,8	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,8	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,8	2,4	1,7	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
30		3,0	2,7	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
35		3,1	2,9	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1
40		3,1	3,0	2,6	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
50		2,9	2,9	2,7	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,7	1,9	1,5	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
30		2,5	1,8	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
35		3,1	2,3	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	2,9	1,9	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
50		3,5	3,3	2,8	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1

Fattore di Amplificazione **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,6	1,9	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
30		2,9	2,3	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
35		3,2	2,8	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	3,1	2,4	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0
50		3,2	3,2	2,9	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

4. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL)

Nell'ambito del presente studio vengono svolte analisi della risposta sismica locale (RSL) al fine di quantificare i possibili fenomeni di amplificazione del moto sismico che possono interessare le litologie sovrastanti il bedrock rigido.

Per determinare la risposta sismica del sottosuolo attesa in superficie a partire da un input (terremoto) tipico atteso al bedrock, è stato utilizzato il codice di calcolo EERA (Equivalentlinear Earthquake site Response Analyses, 2000), in grado di modellare la propagazione unidimensionale delle onde di taglio.

In considerazione della sufficiente regolarità dello spessore e della geometria della coltre detritica del sito considerato, si è ritenuto infatti adeguato un modello numerico monodimensionale.

La verifica monodimensionale dell'amplificazione locale, tramite l'utilizzo di EERA si compone di due fasi: elaborazione del modello e simulazione degli effetti indotti dal sisma di progetto.

4.1 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

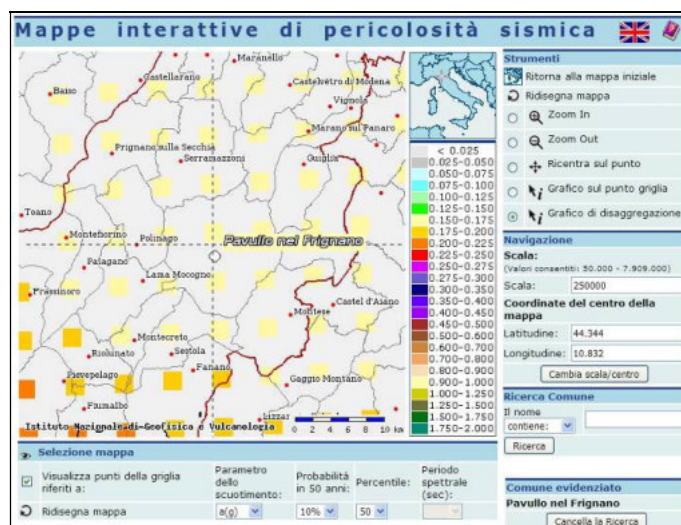
4.1.1 Stima della pericolosità e analisi di disaggregazione

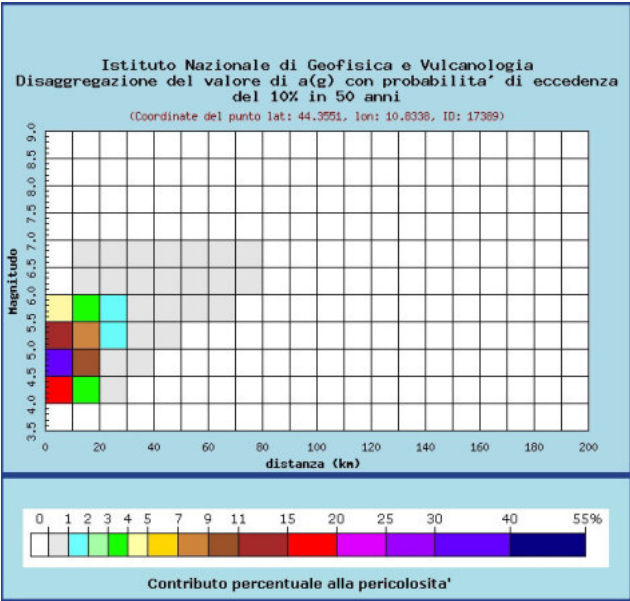
Una stima della pericolosità del sito in studio può essere fatta attraverso le Mappe interattive della pericolosità sismica dell'INGV. Una volta selezionata la località si disegna la mappa. È stata selezionata la carta di pericolosità relativa alla specifica probabilità di eccedenza. La carta Ingv è costruita per tempi di esposizione Δt di 50 anni; nel nostro caso ($C_u=1$) il periodo di esposizione è lo stesso (50 anni).

$$P = 1 - e^{-\left[\frac{1}{T_e}\right]Dt} = 1 - e^{-\left[\frac{1}{475}\right]50} \approx 5\%$$

Dove T_e è il tempo medio di ritorno associato all'evento caratterizzato da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La carta è costruita per probabilità del 10-5-2% in 50 anni; si può quindi scegliere il valore del 5% e ridisegnare la carta di disaggregazione per questa probabilità:

Selezionando il punto sulla griglia più vicino al sito in esame si ottiene il grafico di disaggregazione riportato nella pagina seguente e il suo valore mediano.





Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilit� di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 44.3551, lon: 10.8338, ID: 17389)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	19.800	31.300	14.000	4.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	3.710	9.430	7.410	3.510	0.089	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.036	0.783	1.760	1.550	0.592	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.008	0.257	0.586	0.384	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.017	0.160	0.156	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	0.039	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Valori medi											
Magnitudo	Distanza										
4.890	Epsilon										
4.890	8.710	0.911									

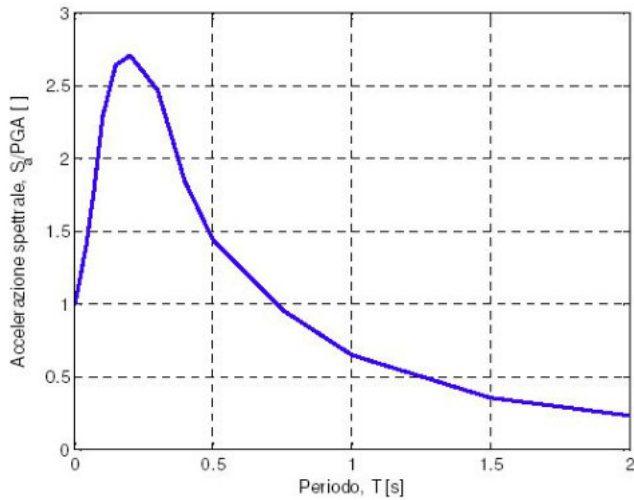
Risulta come rappresentativa la coppia magnitudo-distanza 4.89-8.71 km con un valore di ξ pari a 0.911.

Epsilon indica di quanto l'accelerazione attesa al sito per coppia magnitudo/distanza individuata dall'analisi di disaggregazione si discosta dal valore di PGA stimato al sito nella carta di pericolosità relativo al sito.

Dato che questo scostamento è espresso in frazioni della deviazione standard della legge di attenuazione, valori di epsilon minori di 1 indicano che la coppia corrisponde a valori di PGA attesi compatibili con la PGA dedotta dalle carte di pericolosità. Valori maggiori di 1 indicano che questo scostamento è significativo e che quindi la coppia scelta produce valori di PGA molto lontani da quelli attesi.

4.1.2 Definizione del moto di riferimento

Lo spettro di riferimento viene fornito dalla RER che assegna lo spettro di risposta normalizzato all'intero territorio regionale, per un valore dello smorzamento pari al 5% dello smorzamento critico, uno spettro di risposta normalizzato a probabilità uniforme (10% di probabilità di superamento in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno dell'evento sismico di 475 anni).



T (s)	Sa/a _{ref}
0.00000	1.00000
0.04000	1.38865
0.07000	1.75927
0.10000	2.28349
0.15000	2.63726
0.20000	2.70745
0.30000	2.46642
0.40000	1.84047
0.50000	1.44476
0.75000	0.95494
1.00000	0.64546
1.50000	0.35479
2.00000	0.23070

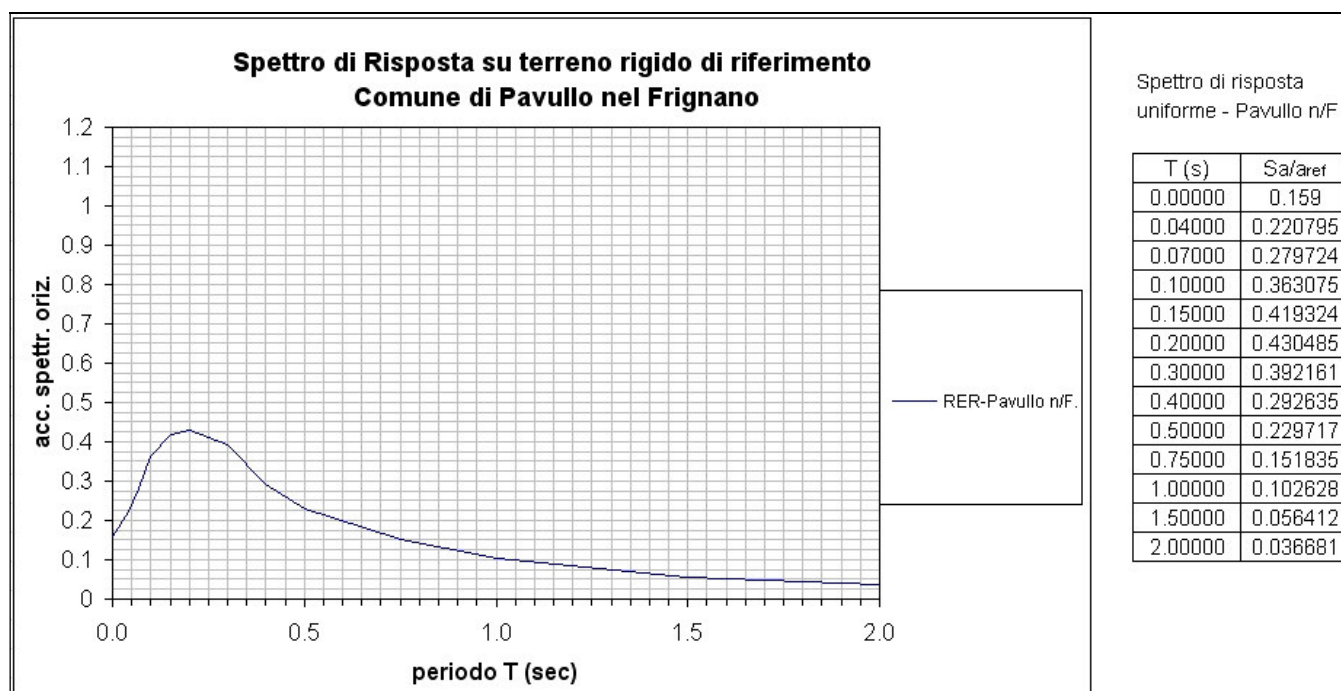
Spettro di risposta normalizzato ($T_R = 475$ anni, smorzamento = 5%) per l'Emilia-Romagna, e valori che lo definiscono.

Dallo spettro di riferimento è possibile ottenere, moltiplicando le ordinate spettrali (valori della tabella della figura precedente) per il valore di accelerazione massima attesa in 475 anni a_{refg} del comune d'interesse, lo spettro di risposta elastico a probabilità uniforme del moto sismico atteso su terreno rigido di riferimento per il periodo di ritorno prescelto, che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per Pavullo n/F..

La PGA per un periodo di ritorno di 475 anni riportata nelle mappe di pericolosità sismica di INGV (Meletti C., Montaldo V., 2007. Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>) varia, per Pavullo n/F., nell'intervallo $0,150 \div 0,175$ g.

Tali dati sono anche stati utilizzati anche dalla Regione Emilia Romagna nella redazione della Delibera dell'Assemblea Legislativa n° 112 - 2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica" dove viene indicata una PGA corrispondente a 0,159 g per l'intero territorio comunale di Pavullo n/F.

Per il Comune di Pavullo n/F. lo spettro così determinato è riportato nella figura seguente:



Spettro di risposta a probabilità uniforme, pari al 10% di almeno una eccedenza in 50 anni per Pavullo n/F.. Con linea blu viene riportato lo spettro costruito con i parametri riportati nella delibera dell'assemblea legislativa ER – DAL112-2007.

Nella prima colonna sono riportati i valori del periodo proprio T , espresso in secondi, nella seconda i valori di accelerazione spettrale normalizzata al valore di accelerazione massima orizzontale (PGA), espressa in frazione dell'accelerazione di gravità g (pari a 9.81m/s^2), al corrispondente periodo T .

4.1.3 Classe d'Uso e Periodo di riferimento per l'azione sismica

L'indagine condotta ha avuto in particolare lo scopo di determinare lo spettro di risposta elastico per uno smorzamento del 5% corrispondente alla specifica situazione sismo-stratigrafica dell'area interessata dal progetto.

Bisogna però determinare preventivamente quale è il livello di "cautela" richiesto ovvero determinare quale probabilità di eccedenza caratterizzi il terremoto massimo da cui proteggere il manufatto

Questo tipo di indicazioni deve provenire dal "progettista" e dipende dal tipo di utilizzo del manufatto ("Classe d'uso").

2.4.2 CLASSI D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

La Classe d'uso, determina il "periodo di riferimento" (V_R) relativo al problema affrontato. Il periodo di riferimento (in anni) è definito da due parametri prodotto:

$$V_F = V_N \times C_U$$

Dove V_N è la vita nominale e C_U è il coefficiente d'uso.

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso C_U

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0.7	1.0	1.5	2.0

Nel caso in oggetto C_U è pari a 2.

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purchè soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale è pari a 50 anni.

Tabella 2.4.I – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Quindi $V_F = V_N \times C_U = 50 \times 2 = 100$ anni.

4.1.4 Stati Limite e relative probabilità di superamento – Tempo di ritorno

Il Periodo di riferimento rappresenta il tempo di esposizione ovvero l'intervallo di tempo (futuro) al quale si riferisce la previsione del massimo scuotimento ragionevolmente atteso dal quale dobbiamo proteggere la struttura. Il problema è che non sappiamo di fatto prevedere quale sarà questo scuotimento ma solo definire possibili scenari ai quali attribuiamo diverso livelli di verosimiglianza (probabilità). Questi livelli di verosimiglianza costituiscono la stima della pericolosità sismica. La pericolosità sismica è la valutazione della probabilità associata a un possibile livello di scuotimento per un fissato tempo di esposizione o periodo di riferimento. Dato il periodo di riferimento viene quindi definita una curva di pericolosità (Hazard) che associa ad ogni valore dello scuotimento sismico una fissata probabilità di eccedenza.

Il problema assume la forma: "Quanto voglio essere cautelativo (in termini di probabilità di eccedenza) nella previsione del massimo scuotimento atteso nei prossimi 50 anni (ovvero del periodo di riferimento scelto per la struttura)?"

La cautela dipende dal tipo di effetti da cui mi voglio cautelare (Stati Limite):

3.2.1 STATI LIMITE E RELATIVE PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO	
Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.	
Gli stati limite di esercizio sono:	
-	Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
-	Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.
Gli stati limite ultimi sono:	
-	Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
-	Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Il livello di "cautela" (ovvero la probabilità di eccedenza) è allora fissata dalle NTC18 in funzione del tipo di effetti da cui ci si vuole difendere. Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3.2.1 – Probabilità di superamento P_{V_R} al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

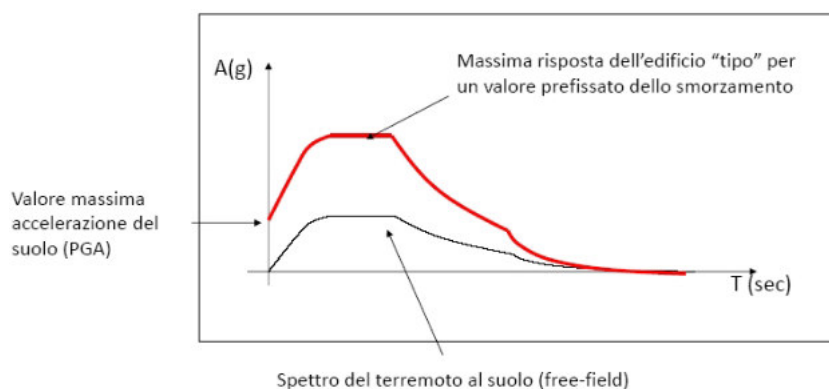
Per la salvaguardia della vita (SLV) la probabilità è fissata al 10% ovvero si ci si cautela contro il 10% di probabilità di eccedenza ("voglio essere sicuro al 90% che qual livello di scuotimento non verrà superato).

Si sceglie quindi il livello di scuotimento associato ad un tempo di ritorno di 475 anni ovvero caratterizzato da un numero di eccedenza annuali pari a $1/475 = 0.0021$ eventi per anno.

In sintesi quindi il fabbricato in oggetto può rientrare in Classe IV (2.4.2, NTC18) in quanto il suo uso risulta strategico. Pertanto, per la definizione del periodo di riferimento per l'azione sismica si tiene conto di un coefficiente d'uso (C_u) pari a 2 che, per un valore della vita nominale (V_n) pari a 50 anni, porta ad un periodo di riferimento (V_r) di 100 anni. Infine, i carichi sismici verranno determinati facendo riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), così come descritto nel paragrafo 3.2.1 delle NTC18. La pericolosità di riferimento sarà quindi definita come il massimo scuotimento ragionevolmente atteso (ovvero con una probabilità di eccedenza del 10%) su un tempo di esposizione di 50 anni (corrispondente ad un tempo di ritorno di 475 anni).

4.1.5 Valutazione dell'azione sismica

È necessario valutare l'accelerazione massima e il relativo spettro di risposta attesi in superficie. È opportuno ricordare che lo spettro di risposta non è lo spettro di scuotimento del terremoto. Di seguito si riporta lo schema esplicativo.



L'ampiezza della "risposta" è maggiore (circa 2.5 volte per smorzamenti del 5%) dello scuotimento del suolo alla stessa frequenza.

Le caratteristiche dello spettro di risposta relativo al terremoto da considerare per le verifiche sismiche possono essere ricavate in due modi

1. Attraverso un approccio semplificato
2. Attraverso analisi di risposta sismica locale (RSL) L'approccio semplificato permette di risalire allo spettro di risposta atteso sulle base di pochi parametri: *valore del picco di accelerazione orizzontale atteso (PGA) relativo al tempo di ritorno specificato (dato di pericolosità) e classe di sottosuolo dedotta mediante un abaco.*

Nella situazione in studio si è ritenuto opportuno, data l'importanza del progetto, ricorrere, per la valutazione delle azioni sismiche attese, ad una approfondita analisi della risposta sismica locale (RSL).

4.1.6 Terremoti di input e spettri di risposta

Occorre in primo luogo individuare l'accelerogramma di riferimento e il suo spettro di risposta

Nella valutazione della Risposta sismica locale gli elementi chiave sono

1. L'accelerogramma di riferimento o almeno il suo spettro di risposta
2. Scelta dei parametri dinamici del modello (p.es le curve di degrado dei diversi materiali).

L'accelerogramma può essere un accelerogramma teorico (generato artificialmente) in modo che sia compatibile con lo spettro atteso per il moto di riferimento al suolo.

In realtà, avere a disposizione uno spettro di risposta di riferimento e una coppia magnitudo-distanza non basta; per poter applicare la nostra procedura per lo studio della risposta sismica locale abbiamo bisogno di un accelerogramma.

Si hanno tre possibilità:

1. Costruire per via numerica accelerogrammi con le caratteristiche richieste utilizzando modelli fisico/empirici (accelerogrammi artificiali)
2. Costruire accelerogrammi a partire dalle caratteristiche della sorgente utilizzando una modellazione fisica (accelerogrammi sintetici o simulati)
3. Trovare accelerogrammi registrati al sito o in altre situazioni con le caratteristiche richieste (accelerogrammi reali spettro-compatibili)

Nel presente studio si utilizzano accelerogrammi reali spettro-compatibili.

A tale scopo è stato utilizzato il codice REXEL che permette di:

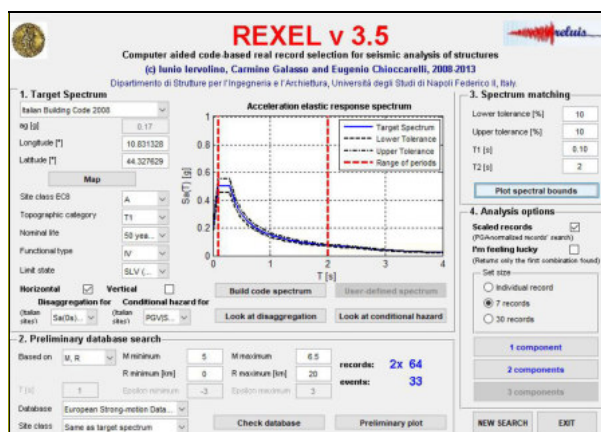
- consultare alcune banche dati relative a registrazioni accelerometriche in Italia e in Europa;
- selezionare automaticamente gruppi di accelerogrammi spettro-compatibili da utilizzare per studi di RSL.

Le banche dati contengono migliaia di registrazioni relative a situazioni differenti

La ricerca si svolge in diverse fasi:

- si sceglie il sito di interesse;
- sulla base delle carte di pericolosità e le caratteristiche del manufatto il programma definisce lo spettro di risposta del terremoto di riferimento per il sito (**spettro target**);
- viene fornita l'analisi di disaggregazione dalla quale si sceglie la coppia (l'insieme di valori) magnitudo-distanza di interesse;
- viene scelta la banca dati di interesse;
- il programma ricerca gruppi di accelerogrammi spettro-compatibili e con magnitudo distanza simili a quelle scelte.

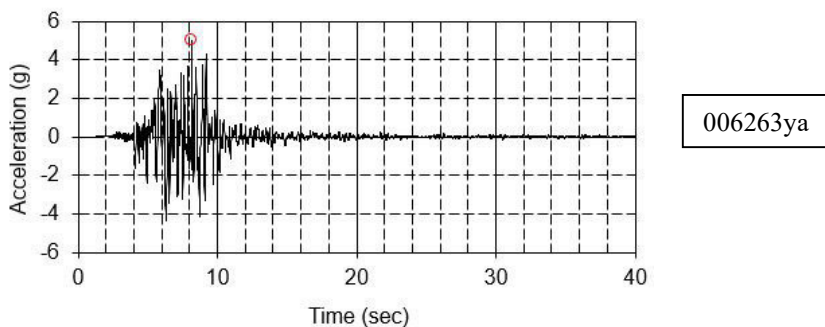
I parametri (SLV) della ricerca sono sintetizzati dalla seguente schermata di REXEL:



Accelerogrammi di riferimento

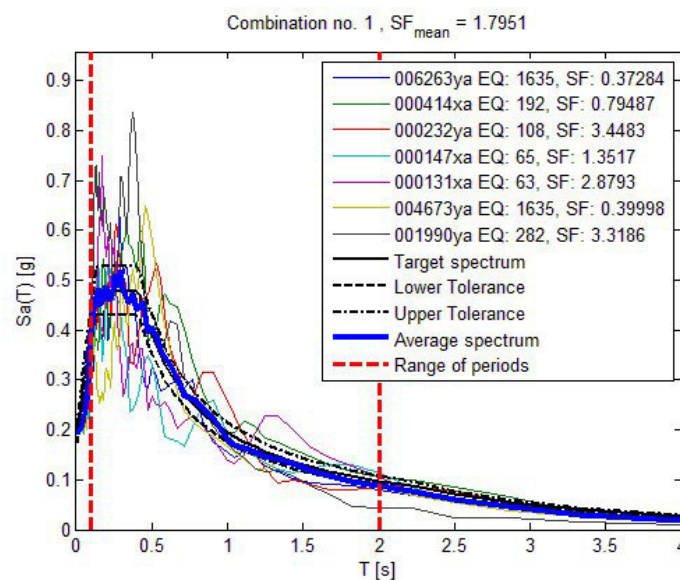
A partire dalla forma dello spettro “target” è stato possibile ricavare gruppi di accelerogrammi naturali spettro-compatibili.

L'unità di misura degli accelerogrammi in REXEL è m/s^2 .



Esempio di segnale sismico di riferimento selezionato dalla banca dati accelerometrica “European Strong Motion database”.

Di seguito si riportano graficamente i 7 spettri (SLV) derivanti dagli altrettanti accelerogrammi trovati:



Spettri di risposta elastici del moto sismico atteso ($T_r=475-50$ anni, smorzamento 5%). Spettri dei 7 segnali di input ottenuti con REXEL all'SLV.

Si tratta di accelerogrammi naturali compatibili con lo spettro di risposta al sito relativo ai valori di PSA caratterizzati da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e con le coppie magnitudo/distanza dedotte dall'analisi di disaggregazione e dall'esame della storia sismica.

4.1.7 Sismostratigrafia

Definito l'input in termini di eventi sismici da sottoporre a simulazione, i 7 accelerogrammi individuati (terremoti di input) vengono importati nel software EERA.

È necessario ora determinare le caratteristiche sismostratigrafiche del volume di terreno d'indagine ed oggetto della probabile amplificazione. Si riporta nel software il profilo sismostratigrafico del terreno, ovvero i differenti sismostrati in cui la campagna di esplorazione geologica (geofisica e geotecnica) del sottosuolo ha discretizzato il sottosuolo dell'area in esame. Si assume, trattandosi di indagini monodimensionali, che gli strati siano piano paralleli e che la propagazione del sisma sia verticale. Di seguito si riporta la sismo stratigrafia di input:

PUA Comparto 8 - Serradi Porto - Pavullo nel Frignano (Mo)												
Fundamental period (s) = 0.15												
Average shear wave velocity (m/sec) = 467.88												
Total number of sublayers = 4												
	Layer Number	Soil Material Type	Number of sublayers in layer	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus G_{max} (MPa)	Initial critical damping ratio (%)	Total unit weight (kN/m ³)	Shear wave velocity (m/sec)	Location and type of earthquake input motion	Location of water table	Depth at middle of layer (m)	Vertical effective stress (kPa)
Surface	1	5		4.1	138.07		19.00	267			2.0	38.95
	2	1		5.1	438.93		20.00	464			6.6	128.90
	3	3		7.8	710.22		21.00	576			13.1	261.80
Bedrock	4	0			2189.11	1	22.00	988	Outcrop		17.0	343.70

Visto che l'indagine sismica raggiunge un substrato con velocità > 800 m/s, il bedrock (inteso come profondità alla quale $V_{s \geq 800}$ m/s), viene estrapolato direttamente dal profilo di V_s delle Masw.

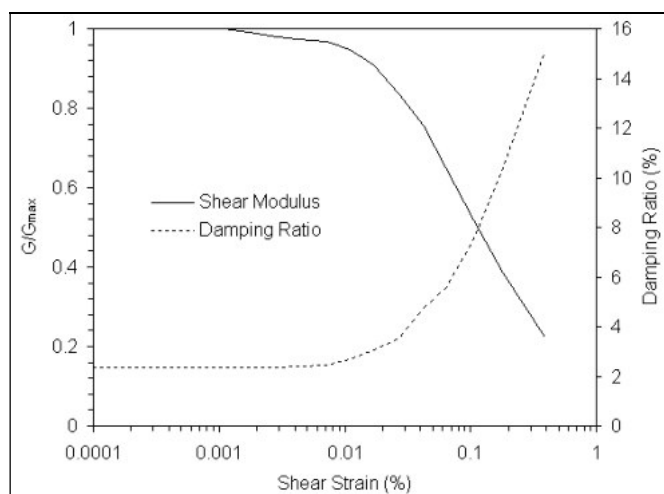
4.1.8 Proprietà geotecniche dinamiche

Tenendo conto che il comportamento del terreno non è lineare, ma varia al variare della deformazione indotta dal sisma, ad ogni tipologia di terreno individuata nella sismo stratigrafia sono associate curve di decadimento del modulo di taglio (G/G_0) e dello smorzamento (D/D_0) con la deformazione. Queste curve sono state tratte da bibliografia, facendo attenzione alla scelta in base alle caratteristiche litologiche/stratigrafiche.

Non avendo a disposizione prove di laboratorio dinamiche (colonna risonante), sono stati adottati, per le proprietà meccaniche in campo dinamico (leggi di variazione $G=G(\gamma)$ e $D=D(\gamma)$), valori di letteratura.

**Leggi di variazione del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento
con la deformazione di taglio**

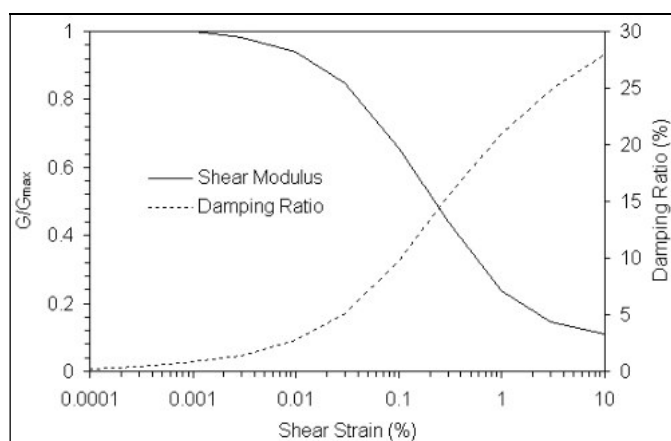
Terreni di copertura superficiale



Attenuation of argille e limi average and damping in argille e limi

Strain (%)	G/G_{max}	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	2.35
0.00044	0.99999	0.00044	2.35
0.00079	0.9999	0.00079	2.35
0.0011	0.999	0.0011	2.35
0.0017	0.99	0.0017	2.35
0.0029	0.98	0.0029	2.35
0.0042	0.975	0.0042	2.39
0.0072	0.967	0.0072	2.43
0.011	0.947	0.011	2.67
0.017	0.91	0.017	3.08
0.027	0.835	0.027	3.53
0.042	0.757	0.042	4.73
0.063	0.649	0.063	5.56
0.105	0.519	0.105	7.52
0.18	0.385	0.18	10.38
0.387	0.224	0.387	15.12

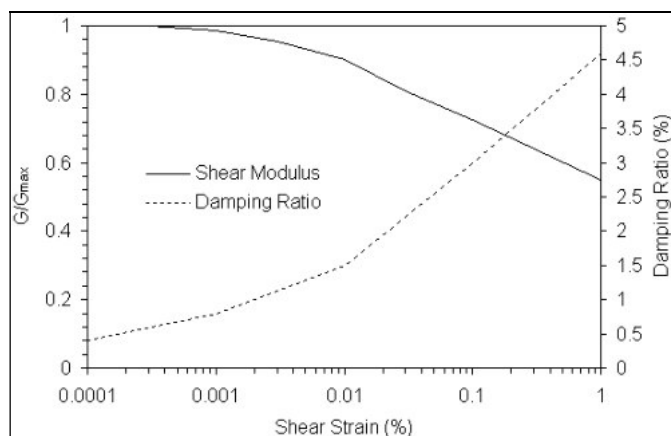
Argille alterate di copertura/primo substrato



Modulus for clay (Seed and Sun, 1989) upper range and damping for clay (Idriss 1990)

Strain (%)	G/G_{max}	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	0.24
0.0003	1	0.0003	0.42
0.001	1	0.001	0.8
0.003	0.981	0.003	1.4
0.01	0.941	0.01	2.8
0.03	0.847	0.03	5.1
0.1	0.656	0.1	9.8
0.3	0.438	0.3	15.5
1	0.238	1	21
3	0.144	3.16	25
10	0.11	10	28

Substrato roccioso marnoso



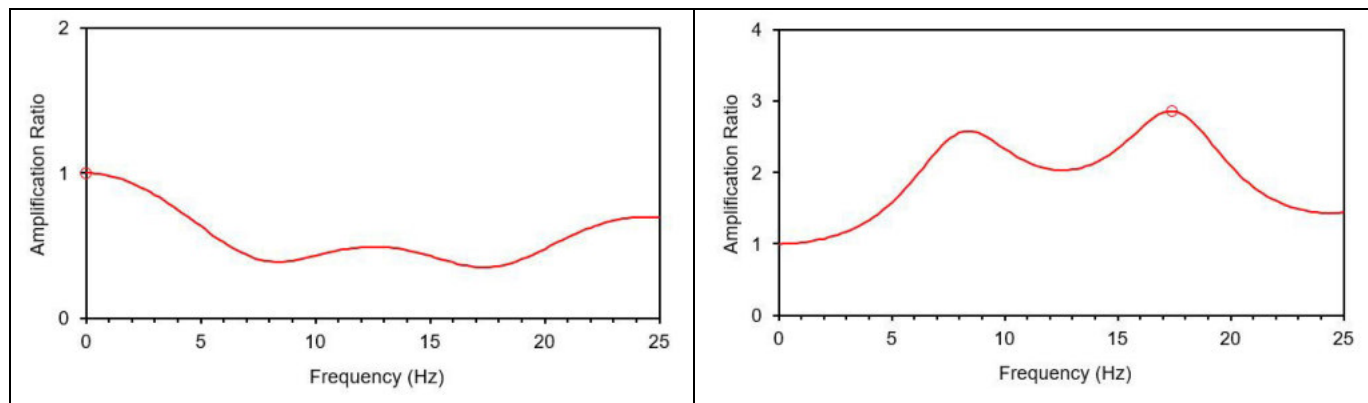
Attenuation of rock average and damping in rock

Strain (%)	G/G_{max}	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	0.4
0.0003	1	0.001	0.8
0.001	0.9875	0.01	1.5
0.003	0.9525	0.1	3
0.01	0.9	1	4.6
0.03	0.81		
0.1	0.725		
1	0.55		

4.2 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA

4.2.1 FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Per ognuno dei 7 segnali sono state ottenute le funzioni di trasferimento accelerazione in superficie/accelerazione al bedrock.



Funzioni di trasferimento bedrock-superficie ottenute dalla modellazione con il codice EERA per il modello di sottosuolo definito (§ 4.1.7)

Questa funzione è da correlare con l'amplificazione locale.

Per amplificazione si intende il rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido (a_{maxr}) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito (a_{maxs}) alla frequenza " f ".

Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito.

La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ del deposito. Il moto sismico può essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali " f_n " di vibrazione del deposito; molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione: " f_1 " denominata *frequenza fondamentale*, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

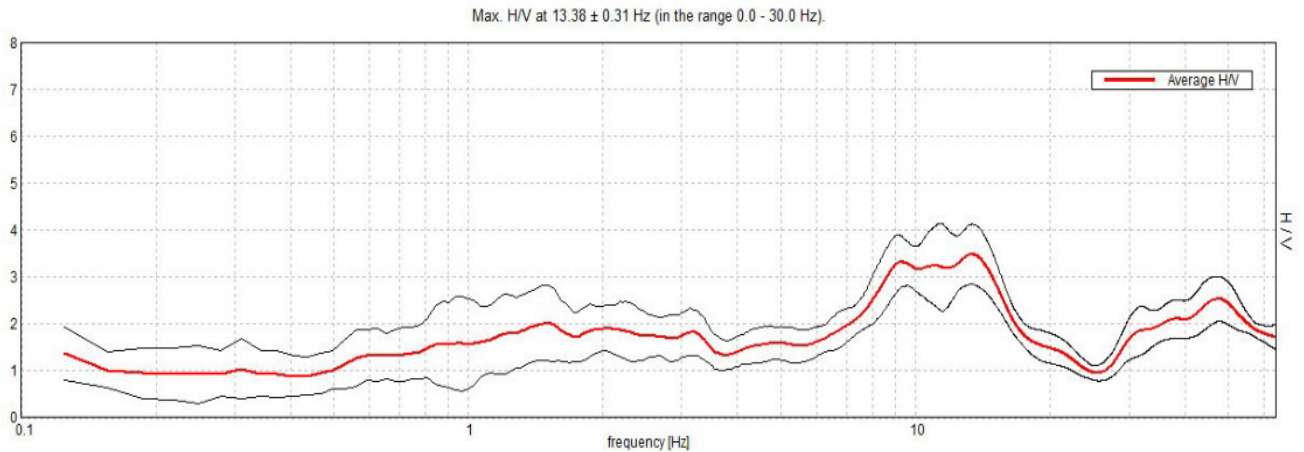
La funzione di trasferimento dell'accelerazione non viene utilizzata direttamente nelle verifiche di strutture e opere geotecniche ma è molto utile, come sopra spiegato, per definire il campo di frequenze entro il quale il sottosuolo nel sito amplifica il segnale sismico, oltre che per quantificare l'entità dell'amplificazione stessa. Ai fini della valutazione specifica della pericolosità sismica, la funzione di trasferimento può quindi essere utilizzata per valutare il possibile insorgere di fenomeni di doppia risonanza terreno-struttura, quando il modo fondamentale di vibrazione della struttura si sovrappone al modo di vibrazione del deposito di terreno, modo che corrisponde al picco principale nella figura dx precedente.

Inoltre la funzione di trasferimento può costituire un elemento di verifica dell'analisi numerica di risposta sismica, mediante opportuni paragoni tra questa e misure dirette che possono essere effettuate sul terreno, come ad esempio la misura dei microtremori mediante il metodo di Nakamura.

Dall'analisi della funzione di trasferimento ottenuta si evince come l'amplificazione assume valori massimi intorno a 8/9 e 17 Hz.

Questo andamento è discretamente confermato dall'andamento della misura diretta di microtremori eseguita in adiacenza dello stendimento della Masw.

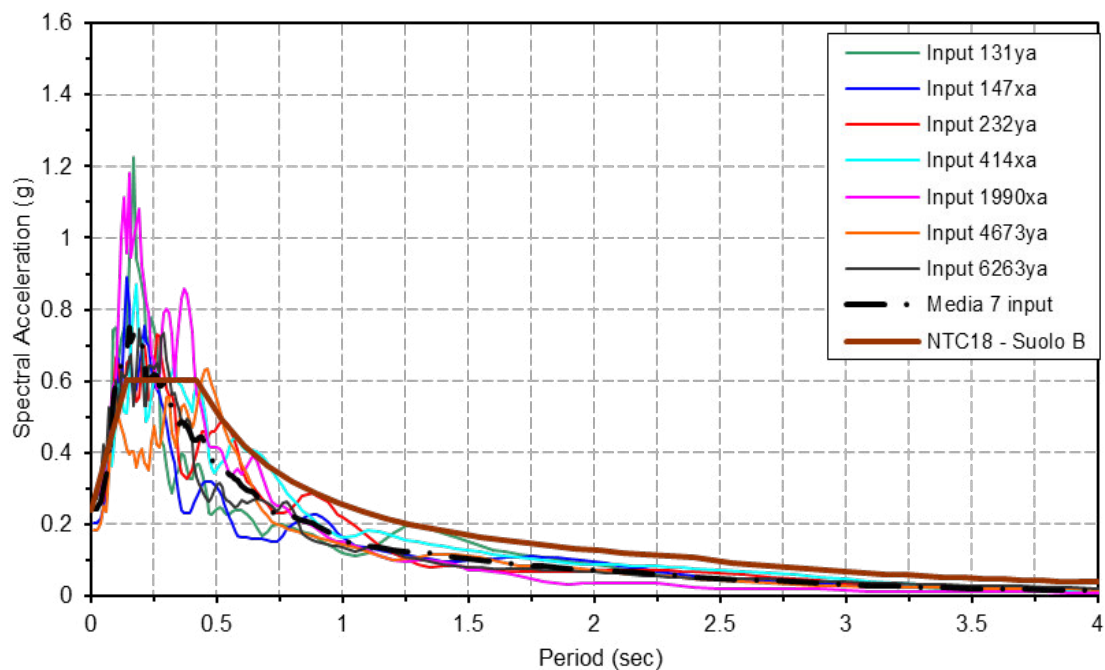
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



4.2.2 SPETTRI DI RISPOSTA

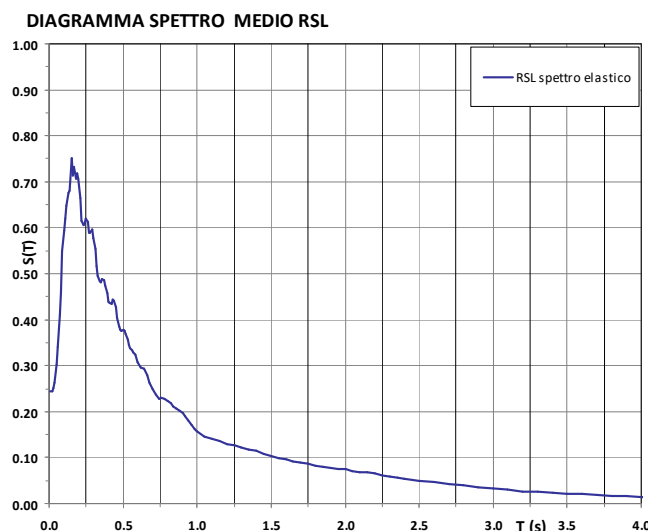
Sono stati ricavati gli spettri di risposta, ossia i valori massimi di accelerazione attesi per un oscillatore armonico semplice ad un grado di libertà (edificio tipo) in funzione della sua frequenza naturale e dello smorzamento (assunto al 5%) per lo stato SLV.

SLV



Spettri di risposta elastici all'SLV, ottenuti dalla modellazione numerica ($T_r=475$ anni, smorzamento 5%) e confronto con quello NTC18.

Lo "spettro di risposta" in PSA descrive il diverso comportamento relativo ad ogni singolo strato della colonna litologica tipo, rispetto all'input sismico utilizzato; in particolare mostra il comportamento dell'accelerazione spettrale attraverso i diversi strati che compongono la colonna litologica tipo utilizzata nella modellizzazione per diversi valori di periodo.



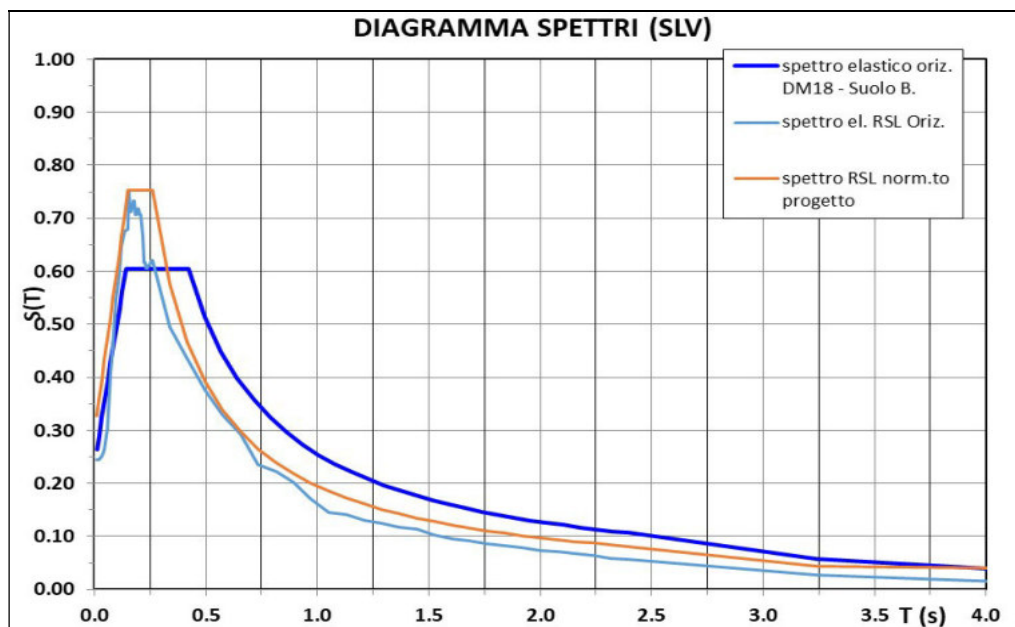
Spettri di risposta elastici medi ottenuti dai 7 spettri della modellazione numerica ($T_r=475$ anni, smorzamento 5%) – SLV

I periodi bassi (0.1-0.2 s) si riferiscono ad edifici a 1-2 piani fino ad arrivare a 2 s per le strutture molto alte e le torri.

Lo spettro sopra riportato può essere normalizzato

Questo "spettro" potrà essere utilizzato nell'ambito della progettazione per la verifica sismica della struttura in previsione.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla modellazione numerica: lo spettro medio derivante dalla RSL, il relativo spettro normalizzato e il confronto con lo spettro proposto dalle NTC18.



Spettri elastici normalizzati da RSL a confronto con lo spettro di normativa NTC2018 per **suolo B**.

Dal confronto tra gli spettri NTC18 e quelli da RSL emerge che:

- i valori dell'accelerazione derivati dalla modellazione numerica della RSL sono, per bassi periodi (0÷0.34 s) sempre superiori rispetto ai valori determinati seguendo le NTC18, fino ad un massimo del +25% tra 0.13-0.26 s
- lo spettro proposto dalle NTC18 è invece superiore per periodi più alti ($T > 0.34$ s) rispetto modellazione numerica.

5. MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

5.1 INDAGINI, MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE

5.1.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE DI CAMPAGNA

Per la caratterizzazione litostratigrafica e fisico-meccanica dei terreni di fondazione del sito sono state eseguite:

- n° 6 prove penetrometriche statiche



Figura 15 – Ubicazioni indagini su planimetria generale

● prova penetrometrica statica —▲ Masw ★ Hvsr

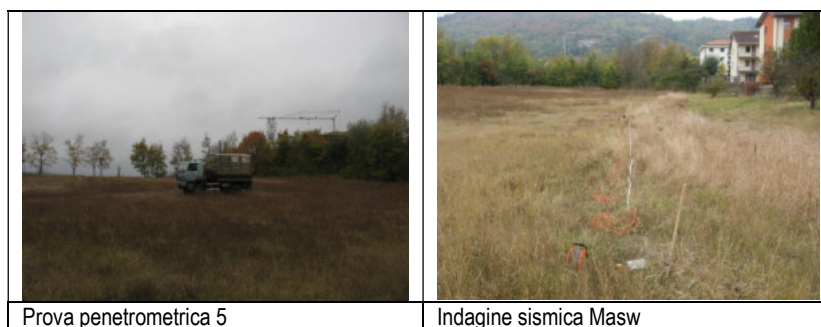


Prova penetrometrica 1

Prova penetrometrica 2

Prova penetrometrica 3

Prova penetrometrica 4



Per le prove statiche si è utilizzato un penetrometro statico montato su camion da 10 tonnellate.

Per la perforazione si è impiegata una punta "Friction Jacket Cone" avente un'area di 10 cm² ed un angolo alla punta di 60°.

La *punta conica* (di tipo telescopico) è dotata di un manicotto sovrastante per la misura dell'attrito laterale (punta/manicotto tipo "Begemann"). Le dimensioni della punta/manicotto sono standardizzate, e precisamente:

diametro di base del cono Ø =	35,7 mm
area della punta conica A_p =	10 cm ²
angolo apertura del cono B =	60°
superficie laterale manicotto A_m =	150 cm ²
costante di trasformazione C_t =	1

Sulla batteria di aste esterne è stato installato un anello allargatore per diminuire l'attrito sulle aste, facilitandone l'approfondimento.

La prova penetrometrica statica CPT (di tipo meccanico) consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($v = 2 \text{ cm/s} + 0,5 \text{ cm/s}$).

La penetrazione avviene tramite il dispositivo di spinta citato in precedenza, che agisce sulla batteria di aste e quindi sulla punta meccanica.

L'esecuzione della prova consiste, una volta posizionato lo strumento, nel far avanzare a intervalli regolari, pari a 20 cm, l'intera batteria di aste e la punta. È possibile suddividere in fasi l'avanzamento:

- fase 1: si legge per i primi 4 cm di avanzamento la resistenza alla punta (L_{punta} =lettura di campagna durante l'infissione della sola punta);
- fase 2: si legge, per i successivi 4 cm, la resistenza alla punta più quella laterale (L_{laterale} =lettura di campagna relativa all'infissione di punta e manicotto);
- fase 3: negli ultimi 12 cm si ritorna nella posizione iniziale senza alcuna lettura.

I dati letti su due distinti manometri montati su una cella di pressione, sono riportati nelle tabelle di campagna (All. 1).

Per le prove, nei tabulati di calcolo e nei diagrammi penetrometrici (Allegato 1) sono stati riportati, oltre ai valori misurati in sito ogni 20 cm di avanzamento della punta, i valori della *resistenza penetrometrica alla punta* (R_p) (grafico a sinistra), espressi in kg/cm², i valori della *resistenza laterale locale* (R_l), sempre espressi in kg/cm², nonché i valori del rapporto fra la *resistenza alla punta* e la *resistenza laterale locale* (R_p/R_l) (grafico a destra).

5.2.2 CARATTERISTICHE LITOSTRATIGRAFICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Sulla base dell'interpretazione della prova penetrometrica, è possibile, per una immediata valutazione delle caratteristiche dei terreni attraversati, ricostruire la seguente stratigrafia interpretativa.

SEQUENZE LITOSTRATIGRAFICHE – PROVE PENETROMETRICHE

PROVA 1		PROVA 2		PROVA 3	
- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario	- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario	- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario
- 0.6 ÷ 2.2 m	Argille limose compatte. Rpm=38 kg/cm ² Rp=24÷60 kg/cm ² .	- 0.6 ÷ 3.0 m	Argille limose da mediamente compatte (Rp=12÷22 kg/cm ²) a compatte (Rp=26÷48 kg/cm ²)	- 0.6 ÷ 4.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=184 kg/cm ² Rp=76÷420 kg/cm ² .
- 2.2 ÷ 4.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=208 kg/cm ² Rp=80÷360 kg/cm ² .	- 3.0 ÷ 5.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=235 kg/cm ² Rp=68÷430 kg/cm ² .		

PROVA 4		PROVA 5		PROVA 6	
- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario	- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario	- 0.0 ÷ 0.6 m	Terreno agrario
- 0.6 ÷ 3.0 m	Argille limose compatte. Rpm=41.5 kg/cm ² Rp=20÷64 kg/cm ² .	- 0.6 ÷ 1.6 m	Argille limose molto compatte. Rpm=76.8 kg/cm ² Rp=40÷120 kg/cm ² .	- 0.6 ÷ 1.6 m	Argille limose compatte. Rpm=112 kg/cm ² Rp=90÷120 kg/cm ² .
- 3.0 ÷ 5.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=157 kg/cm ² Rp=68÷380 kg/cm ² .	- 1.6 ÷ 3.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=197 kg/cm ² Rp=140÷410 kg/cm ² .	- 1.6 ÷ 3.2 m	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti. Rpm=208 kg/cm ² Rp=140÷420 kg/cm ² .

Rp/Rpm: range/valore medio della resistenza alla punta statica con valori riferiti alla superficie della punta di perforazione (10 cm²).

5.3.3 IDROLOGIA SOTTERRANEA

Per quanto riguarda la conformazione e il regime idrologico del sottosuolo, all'interno dei fori di sondaggio, al termine dell'esecuzione dell'indagine, non è stata rilevata la presenza di acqua.

L'area in oggetto insiste su terreni prevalentemente marnosi a loro volta ricoperti da una coltre detritica: pertanto può essere soggetta a filtrazione di acque in particolare nello strato più superficiale e detensionato o in corrispondenza di concentrazioni di elementi grossolani d'alterazione.

Le acque che si infiltrano dal versante a monte alimentano e generano una falda freatica sospesa e/o di fondo abbastanza superficiale tamponata dalle litologie marnose di substrato. Il campo di pressione neutra nel sottosuolo è comunque variamente influenzato dagli eventi meteorici ed il livello stesso può cambiare sensibilmente da punto a punto.

Seppur le indagini dirette svolte non abbiano rilevato, all'interno dei fori di sondaggio, la presenza di acqua, non si può quindi escludere la presenza di locali orizzonti naturali di saturazione discontinui a carattere stagionale e/o livelli di filtrazione preferenziale al contatto tra litotipi a diversa permeabilità.

6. TIPOLOGIA DELL' INTERVENTO

L'area in studio è soggetta a PUA Piano Urbanistico Attuativo relativo al Comparto 8 (parte dell'Ambito ANS 1.8).

Si tratta di un nuovo intervento di sviluppo residenziale con inserimento di un'attrezzatura di carattere comunale, più precisamente la nuova sede della "Casa del Volontariato".

L'ipotesi progettuale oggetto della presente proposta riguarda un intervento relativamente semplice e non particolarmente esteso, che prevede la creazione di un nuovo insediamento residenziale a bassa densità con aree di verde pubblico e un'ampia area per parcheggi quali dotazioni territoriali, in linea con quanto previsto dalla Scheda d'Ambito del PSC per l'Ambito in questione, con l'inserimento, in prossimità del confine Nord-Est dell'area in oggetto, a ridosso della Via Serra di Porto, di un'attrezzatura collettiva di carattere comunale (Opera di Urbanizzazione Secondaria) denominata "Casa del Volontariato", promossa dalle sedi territoriali di AVIS e AVAP – CROCE VERDE.

Nel PUA sono previsti n° 6 nuovi lotti privati edificabili residenziali a cui si aggiunge il Lotto per l'attrezzatura comunale.

L'insediamento residenziale si compone per lo più di ville uni/bifamiliari di due piani fuori terra più sottotetto, villette a schiera e/o eventualmente edifici in linea plurifamiliari con massimo n. 3-4 alloggi, a morfologia articolata, di tre piani fuori terra. A piano terra i garage potranno essere anche realizzati in confine tra due lotti adiacenti.

7. CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE GENERALI

Analizzando le indagini il sottosuolo dell'area di PUA risulta caratterizzato da terreni di copertura argilloso-limosi da compatti a molto compatti di spessore variabile e compreso mediamente tra 2-3 m, passanti ad una litologia di primo substrato da molto compatto a consistente di natura marnosa-siltosa che ha determinato il rifiuto strumentale delle perforazioni.

Per una dettagliata modellazione litostratigrafica e meccanico-resistiva dei terreni di fondazione dei singoli lotti, sarà necessario integrare le investigazioni svolte in questa fase preliminare, con un adeguato numero di indagini tese a definire, lotto per lotto, un particolareggiato quadro litostratigrafico e litotecnico.

7.1 SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI FONDAZIONE

In questa fase è possibile ipotizzare l'adozione di fondazioni dirette superficiali del tipo a trave rovescia o platea con quote di posa variabili e dipendenti dalle quote di progetto.

Nella scelta della profondità fondale andrà tenuto conto che le NTC2018 prescrivono che il piano di fondazione deve essere situato sotto la coltre di terreno vegetale nonché sotto lo strato interessato dal gelo e da significative variazioni stagionali del contenuto d'acqua (strato attivo). Fondazioni non adeguatamente approfondite possono nel tempo subire cedimenti differenziali tra le varie parti della struttura.

Nel caso in esame, una idonea quota d'imposta è quella che permette di oltrepassare i terreni di copertura più superficiali e alterati ed innestarsi possibilmente sui primi terreni di substrato con caratteristiche omogenee o in prossimità di essi.

Le fondazioni verranno a contatto con terreni medio-fini da compatti a molto compatti e determineranno carichi d'esercizio compatibili con le caratteristiche fisico-meccaniche e resistive delle litologie presenti.

In fase esecutiva, l'esecuzione di indagini geognostiche puntuali all'interno dei singoli lotti permetterà di qualificare la natura dei terreni e quantificarne precisamente i caratteri lito-tecnici e di conseguenza dettagliare puntualmente la profondità, la tipologia, il carico di progetto e il dimensionamento delle fondazioni.

7.2 STABILITÀ DELLE PARETI DI SBANCAMENTO

I progetti edificatori non prevedono la realizzazione di piani interrati, pertanto gli sbancamenti saranno ridotti e influenzati dalla sola morfologia dei singoli lotti.

Tra gli obiettivi della progettazione geotecnica dell'intervento vi dovrà essere quello di prevedere i dovuti accorgimenti per garantire che i terreni interessati nonché quelli nell'intorno conservino le attuali condizioni di resistenza e che mantengano le attuali caratteristiche di stabilità.

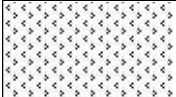
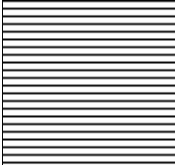
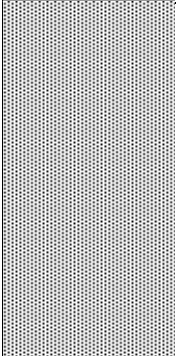
Laddove verranno eseguiti sbancamenti ne andranno verificate le condizioni di stabilità in tutte le condizioni.

7.3 MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

Lo studio eseguito ha permesso di definire un modello geologico-geotecnico medio del terreno di fondazione.

I parametri geotecnici di seguito riportati, rappresentativi delle litologie individuate, sono ottenuti dall'elaborazione ponderata delle indagini eseguite.

MODELLO GEOTECNICO - PARAMETRI GEOTECNICI NOMINALI MEDI

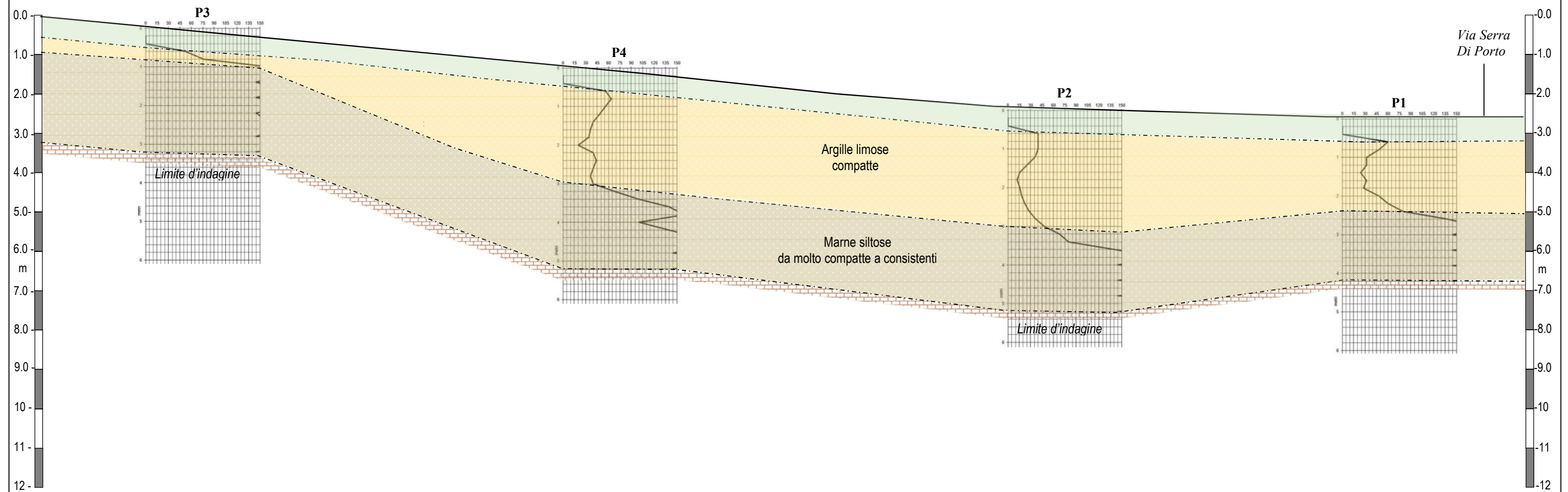
Stratigrafia	Strati prof. in m	Descrizione litologica	Parametri geotecnici
	0.0– 0.6	Terreno agrario	-
	0.6 – 1.6/3	Terreni di copertura Argille limose compatte	$\gamma = 1.9-2.0 \text{ t/m}^3$ $\phi = 24^\circ-26^\circ$ $c' = 12-15 \text{ kPa}$ $c_u = 120-200 \text{ kPa}$ $E_d = 8000-20000 \text{ kPa}$
	>1.6/3	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	$\gamma = 2.1 \text{ t/m}^3$ $\phi = 30-32^\circ$ $c' = 20-30 \text{ kPa}$ $c_u = 250-600 \text{ kPa}$ $E_d = 40000-60000 \text{ kPa}$

Legenda: parametri nominali: γ peso di volume; C' coesione efficace, ϕ angolo d'attrito; C_u coesione non drenata; E_d modulo edometrico.

Nella pagina seguente si riporta una sezione litostratigrafica che rappresenta il modello geologico dell'area di PUA in studio.

A (Sud/Ovest)

A' (▲Nord/Est)



Legenda

- | | | | |
|---|--|---|--------------------------------|
|  | Terreno agrario
 |  | Falda non rilevata |
|  | Argille limose compatte
γ : 1.9 t/m ³ - ϕ : 24/26° - C': 10/15 kPa – Cu: 120/200 kPa | P2 | Prove penetrometriche statiche |
|  | Marne siltose da molto compatte a consistenti
γ : 2.0/2.1 t/m ³ - ϕ : 30/32° - C': 20/30 kPa – Cu: 300/400 kPa |  | Traccia Sezione |

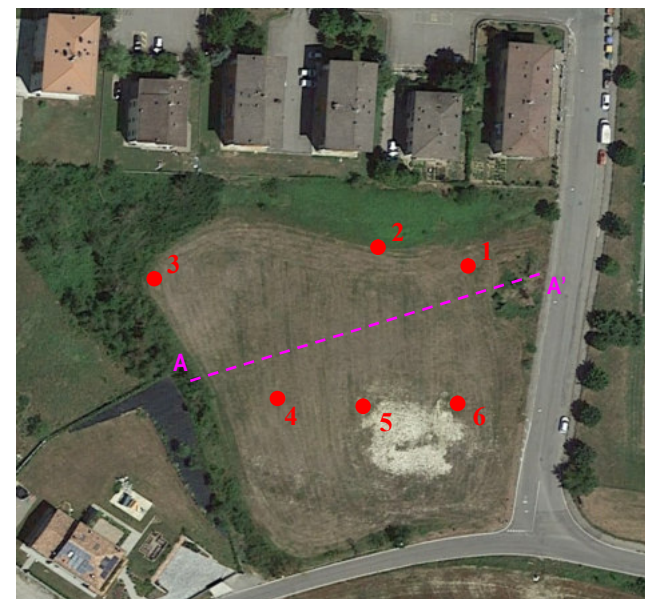


FIGURA - MODELLO GEOLOGICO – GEOTECNICO scala H/D: 1:100/250

8. CONSIDERAZIONI FINALI

A corredo del PUA Piano Urbanistico Attuativo relativo al Comparto 8 (parte dell'Ambito ANS 1.8) in Via Serra di Porto a Pavullo (Mo) è stato eseguito il presente studio volto alla ricostruzione degli aspetti geologici e sismici che ha permesso di definire una modellazione geologica dell'area in esame attraverso la ricostruzione dei caratteri geomorfologici, idrogeologici, litologici, stratigrafici, e, più in generale, di pericolosità geologica del sito.

Lo studio è sviluppato in modo da costituire utile elemento di riferimento generale per le fasi successive della progettazione e per definire gli ulteriori programmi di indagini geognostiche di dettaglio nei futuri singoli lotti.

Le indagini svolte hanno messo in evidenza i seguenti aspetti:

- Il quadro litostratigrafico dell'area è caratterizzato da terreni di copertura argilloso-limosi da compatti a molto compatti di spessore variabile e compreso mediamente tra 2-3 m, passanti ad una litologia di primo substrato da molto compatto a consistente di natura marnosa-siltosa.
- Per quanto riguarda la conformazione e il regime idrologico del sottosuolo, all'interno dei fori di sondaggio, al termine dell'esecuzione dell'indagine, non è stata rilevata la presenza di acqua. L'area in oggetto insiste su terreni prevalentemente marnosi a loro volta ricoperti da una coltre detritica: pertanto può essere soggetta a filtrazione di acque in particolare nello strato più superficiale e detensionato o in corrispondenza di concentrazioni di elementi grossolani d'alterazione. Le acque che si infiltrano dal versante a monte alimentano e generano una falda freatica sospesa e/o di fondo abbastanza superficiale tamponata dalle litologie marnose di substrato. Il campo di pressione neutra nel sottosuolo è comunque variamente influenzato dagli eventi meteorici ed il livello stesso può cambiare sensibilmente da punto a punto.
- Il sito in studio si colloca in posizione subpianeggiante nella piana di Pavullo alla base di un pendio che anche a monte non presenta alcuna forma e/o processo di degradazione significativo.
- In un adeguato intorno non si rilevano fenomeni geodinamici e/o segnali di azione morfogenetica che possono influire direttamente sul sito in studio.
- Non si rilevano processi erosivi da parte delle acque di corrivazione.
- La morfologia praticamente subpianeggiante dell'area permette di affermare che anche lo stato di progetto non determinerà significative alterazioni degli equilibri statici del sito.
- La caratterizzazione sismica dell'area, con approccio semplificato, permette di classificare il suolo di fondazione nella categoria B.
- L'accelerazione massima su suolo rigido e pari a $a_g = 0.159$ ($C_u=1$) – 0.199 ($C_u=2$).
- Allo stato limite ultimo (SLV) l'ampl. stratigrafica $S_s=1,20$ l'ampl. topografica $S_t=1.0$.
- Per gli effetti di sito, si escludono fenomeni quali instabilità e liquefazione. Si avrà invece amplificazione sismica per caratteristiche litologiche ($S_s=1.2$).
- Nelle Carte dello Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Pavullo l'area di PUA rientra nelle zone stabili.
- I coefficienti di amplificazione FA ottenuti con le tabelle regionali (DGR 630/2019) che aggiornano quelle della DAL RER 112/2007 sono riportate nel Cap 3.8.

Come richiesto dallo studio di Microzonazione Sismica del Comune di Pavullo sono stati condotti gli opportuni approfondimenti di terzo livello.

Si è condotta una valutazione della risposta sismica locale (RSL), mediante l'esecuzione di indagini sismiche sito specifiche (Masw e Hvsr), utilizzo di 7 segnali sismici di riferimento (Rexel) e codice di calcolo (Software EERA) con determinazione degli spettri elastici normalizzati. I risultati sono riportati nel Capitolo 4.

Le caratteristiche fisico-meccaniche e resistive delle litologie investigate risultano compatibili con carichi d'esercizio di tipologie residenziali comuni. In fase progettuale andrà valutata l'idonea soluzione fondale, garante della corretta interazione tra sollecitazioni prodotte dalle strutture e le caratteristiche del terreno di fondazione.

La modellazione geologica generale dell'area di PUA, pur rimandando alle singole fasi progettuali l'individuazione della scelta fondale definitiva, permette di ipotizzare l'utilizzo di fondazioni dirette superficiali.

Nella scelta della profondità fondale andrà tenuto conto che le NTC2018 prescrivono che il piano di fondazione deve essere situato sotto la coltre di terreno vegetale nonché sotto lo strato interessato dal gelo e da significative variazioni stagionali del contenuto d'acqua (strato attivo). Fondazioni non adeguatamente approfondite possono nel tempo subire cedimenti differenziali tra le varie parti della struttura.

Nel caso in esame, una idonea quota d'imposta è quella che permette di oltrepassare i terreni di copertura più superficiali e alterati ed innestarsi possibilmente sui primi terreni di substrato con caratteristiche omogenee o in prossimità di essi.

In fase esecutiva dovranno essere approfondite e verificate le condizioni litostratigrafiche e geomeccaniche dei terreni di fondazione con indagini geognostiche puntuali all'interno di ogni singolo lotto al fine di verificare la presenza di eventuali disomogeneità latero-verticali non evidenziate dalle prove eseguite in questa fase e qualificare la natura dei terreni e quantificarne precisamente i caratteri litotecnici e di conseguenza affinare le scelte progettuali.

Dalle considerazioni sopra esposte, e nel rispetto delle prescrizioni indicate e delle verifiche da condursi nei singoli lotti, si ritiene il PUA in progetto compatibile con le caratteristiche geologiche e sismiche dell'area.

Redatta a Pavullo il 06/02/2020

Dott. Geol. Marco Santi Bortolotti



ALLEGATO - 1 -

PROVE PENETROMETRICHE STATICHE

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

1

Prova n°: **1** Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI (kg/cmq)	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	60	76	60.00	1.07	56.25	1.78	-	-		
0.8	48	80	48.00	2.13	22.50	4.44	38.0	-	Argille limose compatte	
1.0	32	48	32.00	1.07	30.00	3.33		-		
1.2	32	48	32.00	1.07	30.00	3.33		-		
1.4	24	44	24.00	1.33	18.00	5.56		-		
1.6	32	50	32.00	1.20	26.67	3.75		-		
1.8	28	48	28.00	1.33	21.00	4.76		-		
2.0	48	80	48.00	2.13	22.50	4.44		-		
2.2	60	110	60.00	3.33	18.00	5.56		-		
2.4	80	160	80.00	5.33	15.00	6.67	207.8	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
2.6	140	220	140.00	5.33	26.25	3.81		-		
2.8	180	300	180.00	8.00	22.50	4.44		-		
3.0	220	340	220.00	8.00	27.50	3.64		-		
3.2	220	360	220.00	9.33	23.57	4.24		-		
3.4	240	380	240.00	9.33	25.71	3.89		-		
3.6	250	400	250.00	10.00	25.00	4.00		-		
3.8	260	440	260.00	12.00	21.67	4.62		-		
4.0	280	420	280.00	9.33	30.00	3.33		-		
4.2	360	450	360.00	6.00	60.00	1.67	-	-		
4.4			0.00	-	-	-		-		
4.6			0.00	-	-	-		-		
4.8			0.00	-	-	-		-		
5.0			0.00	-	-	-		-		
5.2			0.00	-	-	-		-		
5.4			0.00	-	-	-		-		
5.6			0.00	-	-	-		-		
5.8			0.00	-	-	-		-		
6.0			0.00	-	-	-		-		
6.2			0.00	-	-	-		-		
6.4			0.00	-	-	-		-		
6.6			0.00	-	-	-		-		
6.8			0.00	-	-	-		-		
7.0			0.00	-	-	-		-		
7.2			0.00	-	-	-		-		
7.4			0.00	-	-	-		-		
7.6			0.00	-	-	-		-		
7.8			0.00	-	-	-		-		
8.0			0.00	-	-	-		-		
8.2			0.00	-	-	-		-		
8.4			0.00	-	-	-		-		
8.6			0.00	-	-	-		-		
8.8			0.00	-	-	-		-		
9.0			0.00	-	-	-		-		
9.2			0.00	-	-	-		-		
9.4			0.00	-	-	-		-		
9.6			0.00	-	-	-		-		
9.8			0.00	-	-	-		-		
10.0			0.00	-	-	-		-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

1

Prova n°: 1 Quota (m): -

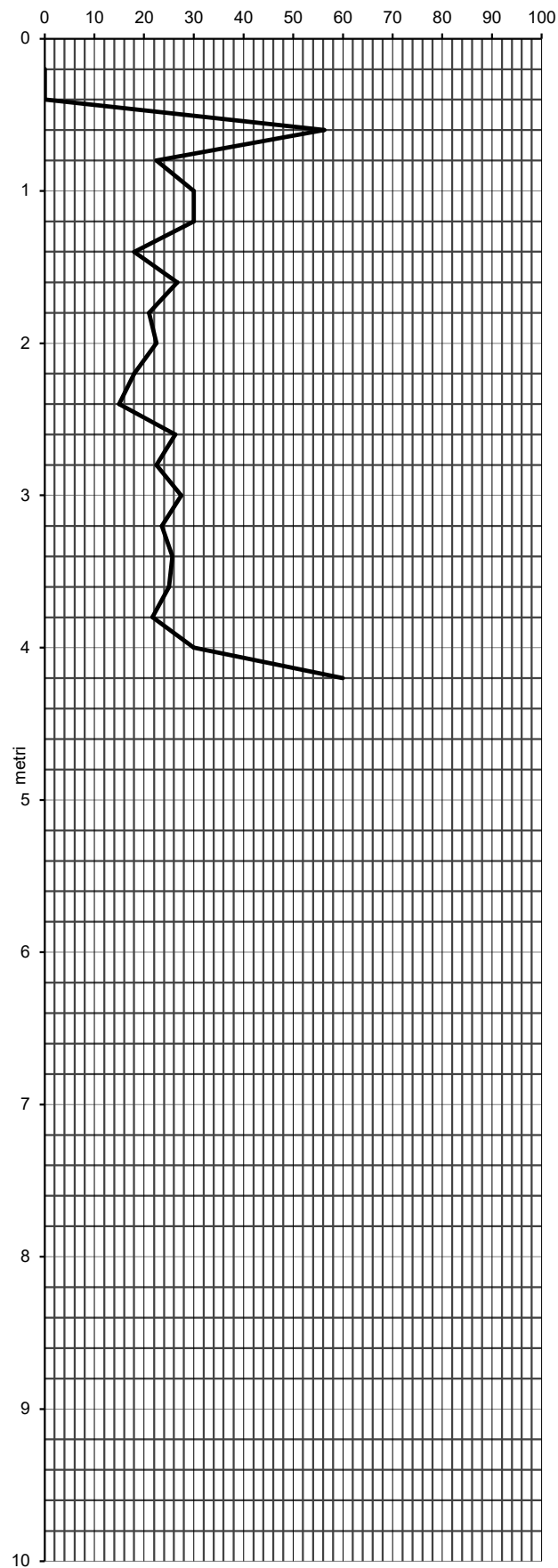
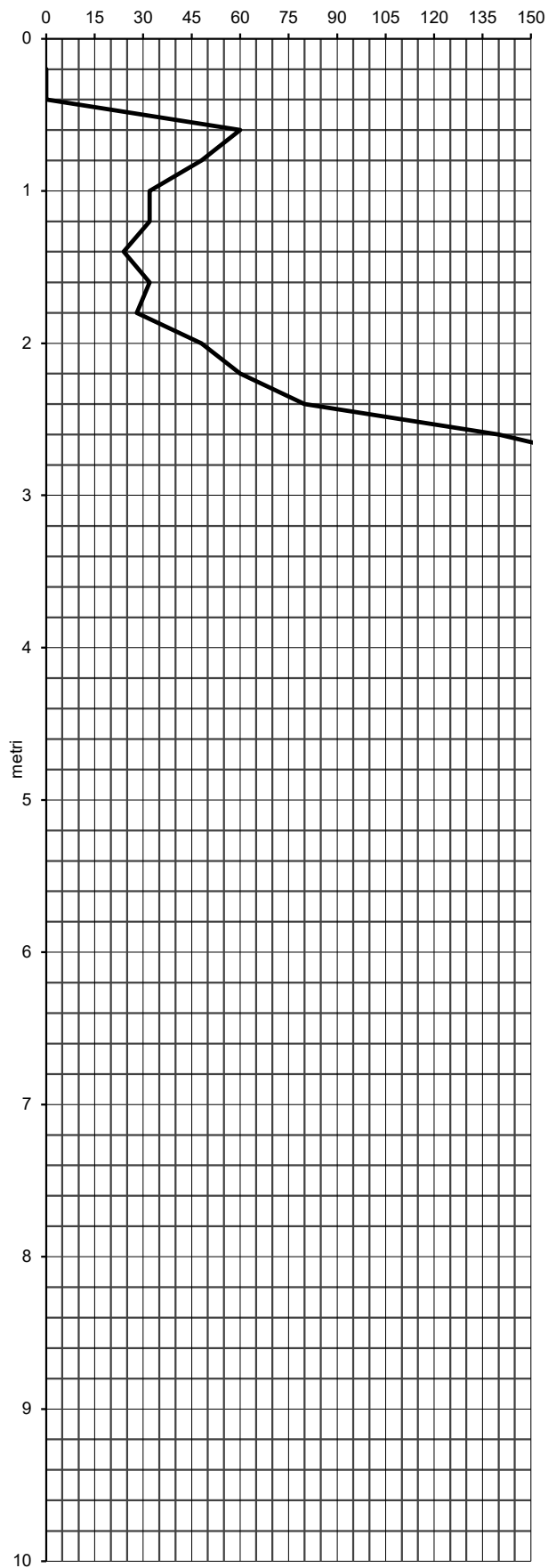
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl

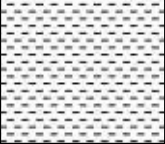
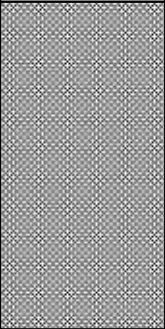


Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

2

Prova n°: 2 Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	40	68	40.00	1.87	21.43	4.67	-	-		
0.8	40	68	40.00	1.87	21.43	4.67	35.5	-	Argille limose da mediamente compatte a compatte	
1.0	40	68	40.00	1.87	21.43	4.67		-		
1.2	36	64	36.00	1.87	19.29	5.19		-		
1.4	26	52	26.00	1.73	15.00	6.67		-		
1.6	16	36	16.00	1.33	12.00	8.33	16.8	-		
1.8	12	28	12.00	1.07	11.25	8.89		-		
2.0	16	32	16.00	1.07	15.00	6.67		-		
2.2	18	38	18.00	1.33	13.50	7.41		-		
2.4	22	44	22.00	1.47	15.00	6.67		-		
2.6	28	52	28.00	1.60	17.50	5.71	37.3	-		
2.8	36	64	36.00	1.87	19.29	5.19		-		
3.0	48	88	48.00	2.67	18.00	5.56		-		
3.2	68	120	68.00	3.47	19.62	5.10	234.8	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
3.4	80	140	80.00	4.00	20.00	5.00		-		
3.6	140	220	140.00	5.33	26.25	3.81		-		
3.8	200	300	200.00	6.67	30.00	3.33		-		
4.0	380	400	380.00	1.33	285.00	0.35		-		
4.2	280	420	280.00	9.33	30.00	3.33		-		
4.4	340	500	340.00	10.67	31.88	3.14		-		
4.6	300	460	300.00	10.67	28.13	3.56		-		
4.8	280	440	280.00	10.67	26.25	3.81		-		
5.0	280	460	280.00	12.00	23.33	4.29		-		
5.2	430	460	430.00	2.00	215.00	0.47	-	-		
5.4			0.00	-	-	-	-	-		
5.6			0.00	-	-	-	-	-		
5.8			0.00	-	-	-	-	-		
6.0			0.00	-	-	-	-	-		
6.2			0.00	-	-	-	-	-		
6.4			0.00	-	-	-	-	-		
6.6			0.00	-	-	-	-	-		
6.8			0.00	-	-	-	-	-		
7.0			0.00	-	-	-	-	-		
7.2			0.00	-	-	-	-	-		
7.4			0.00	-	-	-	-	-		
7.6			0.00	-	-	-	-	-		
7.8			0.00	-	-	-	-	-		
8.0			0.00	-	-	-	-	-		
8.2			0.00	-	-	-	-	-		
8.4			0.00	-	-	-	-	-		
8.6			0.00	-	-	-	-	-		
8.8			0.00	-	-	-	-	-		
9.0			0.00	-	-	-	-	-		
9.2			0.00	-	-	-	-	-		
9.4			0.00	-	-	-	-	-		
9.6			0.00	-	-	-	-	-		
9.8			0.00	-	-	-	-	-		
10.0			0.00	-	-	-	-	-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

2

Prova n°: 2 Quota (m): -

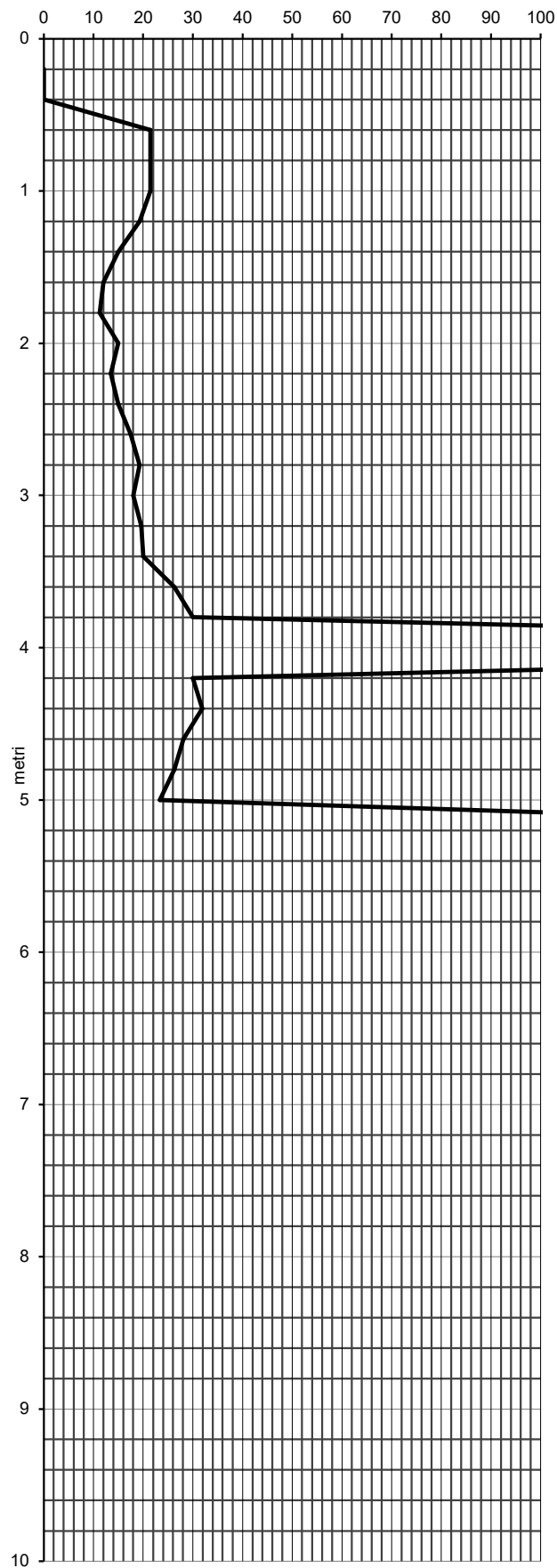
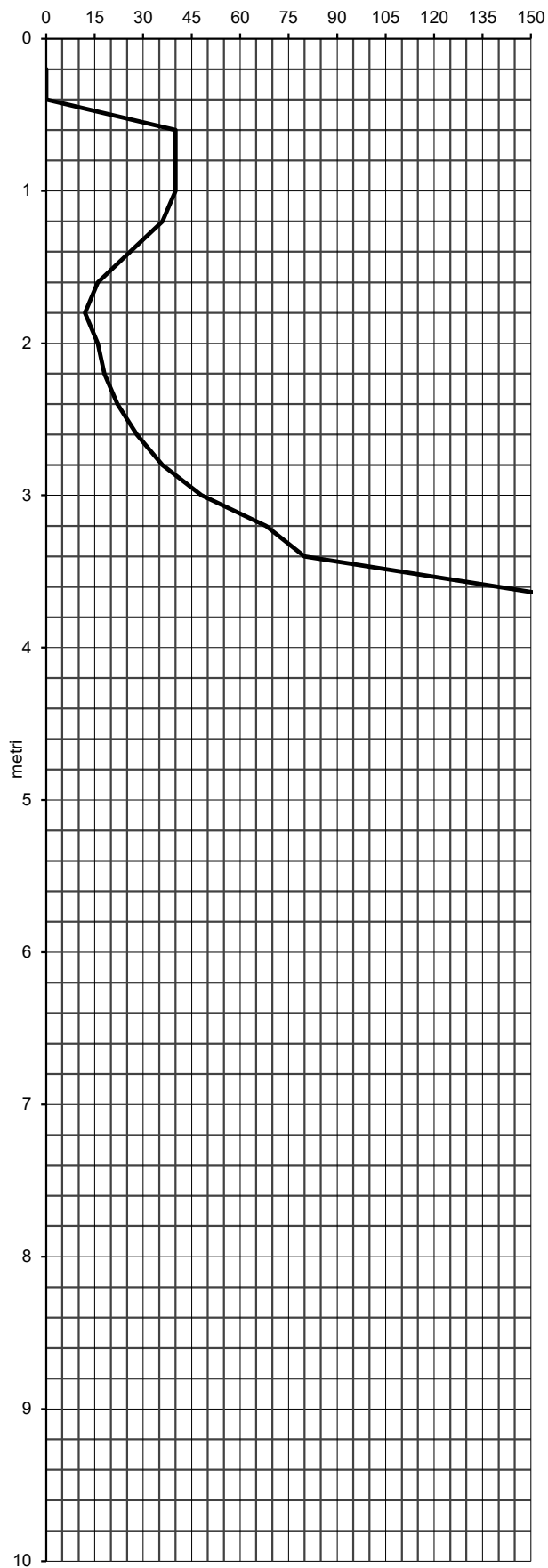
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl



Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

3

Prova n°: **3** Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	52	76	52.00	1.60	32.50	3.08	-	-		
0.8	76	110	76.00	2.27	33.53	2.98	183.8	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
1.0	160	200	160.00	2.67	60.00	1.67		-		
1.2	180	240	180.00	4.00	45.00	2.22		-		
1.4	190	280	190.00	6.00	31.67	3.16		-		
1.6	180	300	180.00	8.00	22.50	4.44		-		
1.8	180	320	180.00	9.33	19.29	5.19		-		
2.0	200	360	200.00	10.67	18.75	5.33		-		
2.2	180	340	180.00	10.67	16.88	5.93		-		
2.4	160	320	160.00	10.67	15.00	6.67		-		
2.6	180	360	180.00	12.00	15.00	6.67		-		
2.8	240	400	240.00	10.67	22.50	4.44		-		
3.0	280	440	280.00	10.67	26.25	3.81		-		
3.2	420	480	420.00	4.00	105.00	0.95	-	-		
3.4			0.00	-	-	-	-	-		
3.6			0.00	-	-	-	-	-		
3.8			0.00	-	-	-	-	-		
4.0			0.00	-	-	-	-	-		
4.2			0.00	-	-	-	-	-		
4.4			0.00	-	-	-	-	-		
4.6			0.00	-	-	-	-	-		
4.8			0.00	-	-	-	-	-		
5.0			0.00	-	-	-	-	-		
5.2			0.00	-	-	-	-	-		
5.4			0.00	-	-	-	-	-		
5.6			0.00	-	-	-	-	-		
5.8			0.00	-	-	-	-	-		
6.0			0.00	-	-	-	-	-		
6.2			0.00	-	-	-	-	-		
6.4			0.00	-	-	-	-	-		
6.6			0.00	-	-	-	-	-		
6.8			0.00	-	-	-	-	-		
7.0			0.00	-	-	-	-	-		
7.2			0.00	-	-	-	-	-		
7.4			0.00	-	-	-	-	-		
7.6			0.00	-	-	-	-	-		
7.8			0.00	-	-	-	-	-		
8.0			0.00	-	-	-	-	-		
8.2			0.00	-	-	-	-	-		
8.4			0.00	-	-	-	-	-		
8.6			0.00	-	-	-	-	-		
8.8			0.00	-	-	-	-	-		
9.0			0.00	-	-	-	-	-		
9.2			0.00	-	-	-	-	-		
9.4			0.00	-	-	-	-	-		
9.6			0.00	-	-	-	-	-		
9.8			0.00	-	-	-	-	-		
10.0			0.00	-	-	-	-	-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

3

Prova n°: 3 Quota (m): -

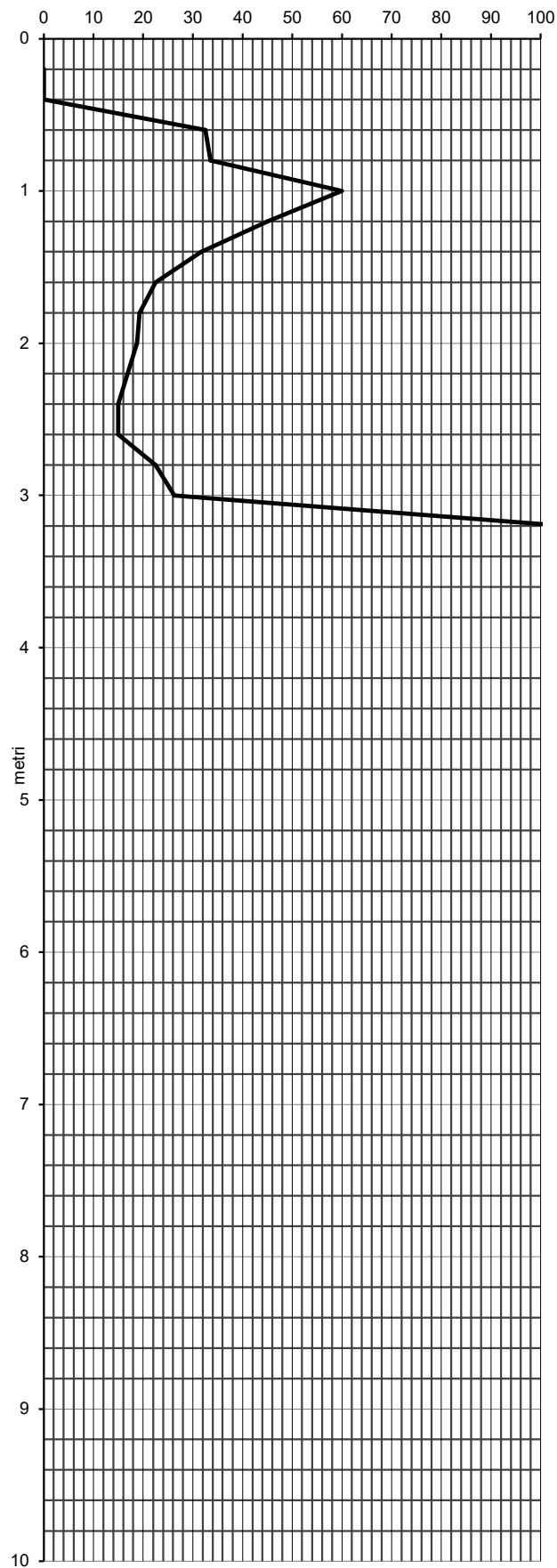
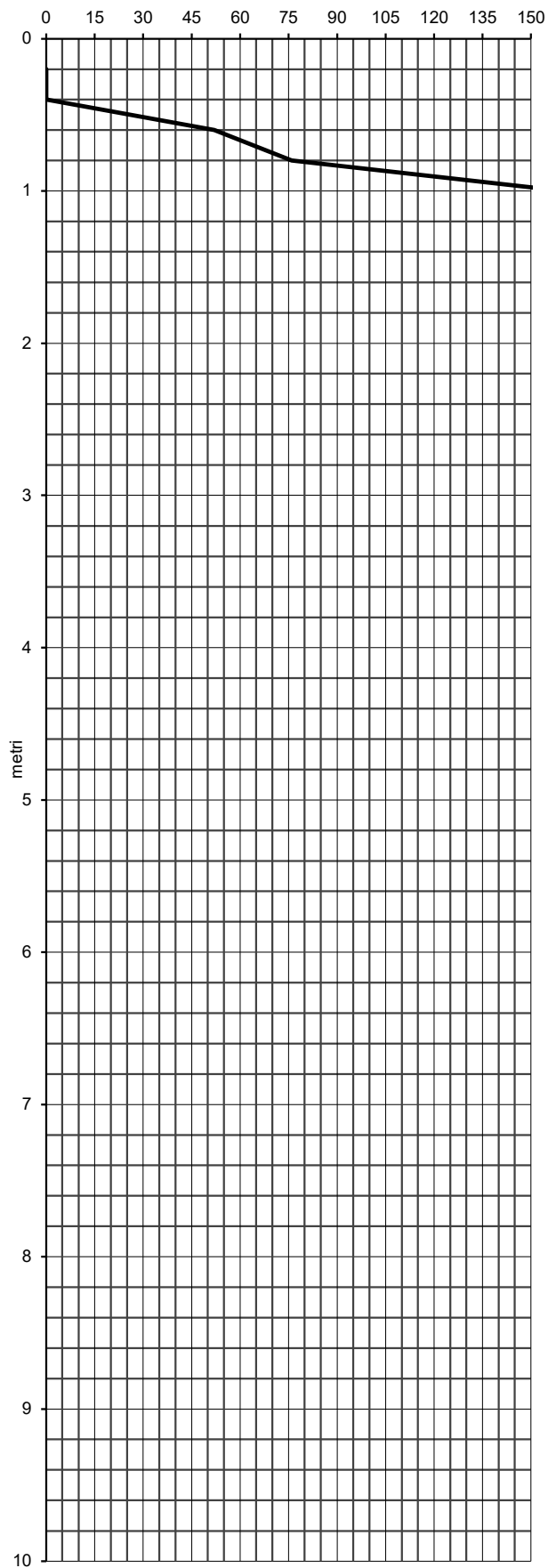
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl



Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

4

Prova n°: **4** Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	56	80	56.00	1.60	35.00	2.86	-	-		
0.8	64	84	64.00	1.33	48.00	2.08	41.5	-	Argille limose compatte	
1.0	56	110	56.00	3.60	15.56	6.43		-		
1.2	48	100	48.00	3.47	13.85	7.22		-		
1.4	40	84	40.00	2.93	13.64	7.33		-		
1.6	36	68	36.00	2.13	16.88	5.93		-		
1.8	34	60	34.00	1.73	19.62	5.10		-		
2.0	20	44	20.00	1.60	12.50	8.00		-		
2.2	40	76	40.00	2.40	16.67	6.00		-		
2.4	44	88	44.00	2.93	15.00	6.67		-		
2.6	40	88	40.00	3.20	12.50	8.00		-		
2.8	36	80	36.00	2.93	12.27	8.15		-		
3.0	40	80	40.00	2.67	15.00	6.67		-		
3.2	68	120	68.00	3.47	19.62	5.10	156.8	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
3.4	100	160	100.00	4.00	25.00	4.00		-		
3.6	140	220	140.00	5.33	26.25	3.81		-		
3.8	160	260	160.00	6.67	24.00	4.17		-		
4.0	100	200	100.00	6.67	15.00	6.67		-		
4.2	140	260	140.00	8.00	17.50	5.71		-		
4.4	180	320	180.00	9.33	19.29	5.19		-		
4.6	200	360	200.00	10.67	18.75	5.33		-		
4.8	220	380	220.00	10.67	20.63	4.85		-		
5.0	260	420	260.00	10.67	24.38	4.10		-		
5.2	380	430	380.00	3.33	114.00	0.88	-	-		
5.4			0.00	-	-	-	-	-		
5.6			0.00	-	-	-	-	-		
5.8			0.00	-	-	-	-	-		
6.0			0.00	-	-	-	-	-		
6.2			0.00	-	-	-	-	-		
6.4			0.00	-	-	-	-	-		
6.6			0.00	-	-	-	-	-		
6.8			0.00	-	-	-	-	-		
7.0			0.00	-	-	-	-	-		
7.2			0.00	-	-	-	-	-		
7.4			0.00	-	-	-	-	-		
7.6			0.00	-	-	-	-	-		
7.8			0.00	-	-	-	-	-		
8.0			0.00	-	-	-	-	-		
8.2			0.00	-	-	-	-	-		
8.4			0.00	-	-	-	-	-		
8.6			0.00	-	-	-	-	-		
8.8			0.00	-	-	-	-	-		
9.0			0.00	-	-	-	-	-		
9.2			0.00	-	-	-	-	-		
9.4			0.00	-	-	-	-	-		
9.6			0.00	-	-	-	-	-		
9.8			0.00	-	-	-	-	-		
10.0			0.00	-	-	-	-	-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

4

Prova n°: 4 Quota (m): -

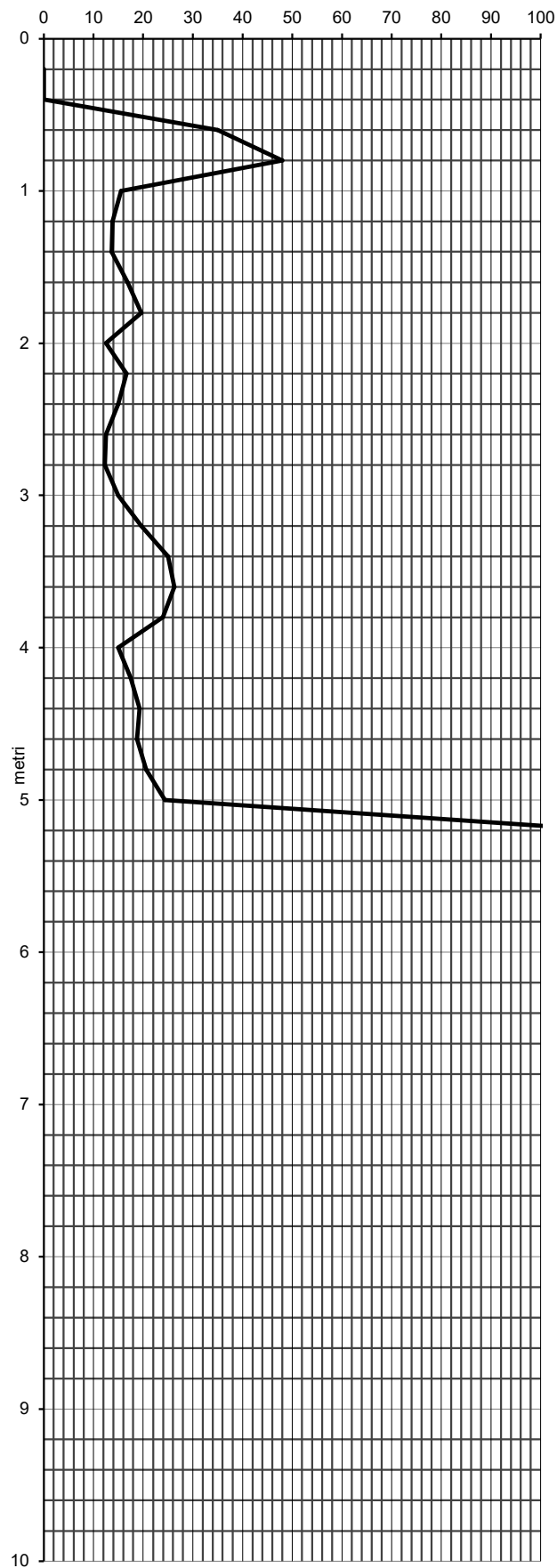
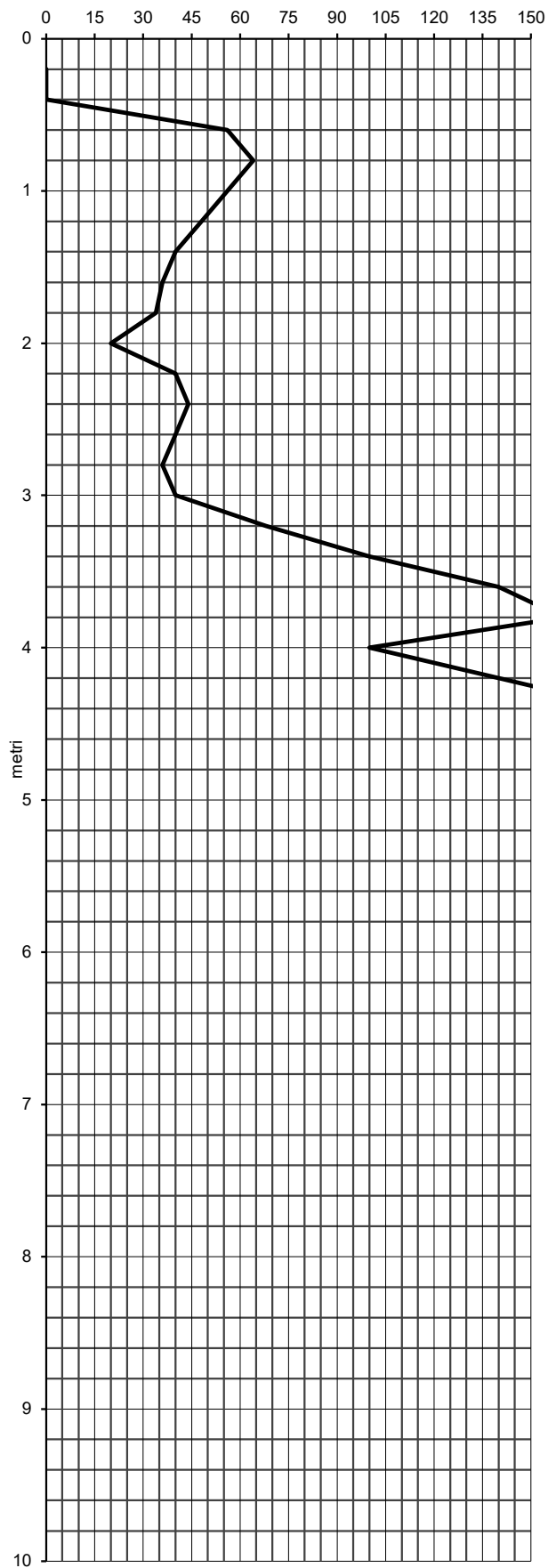
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl



Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

5

Prova n°: **5** Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	44	60	44.00	1.07	41.25	2.42	-	-		
0.8	40	62	40.00	1.47	27.27	3.67	76.8	-	Argille limose molto compatte	
1.0	60	100	60.00	2.67	22.50	4.44		-		
1.2	120	180	120.00	4.00	30.00	3.33		-		
1.4	100	180	100.00	5.33	18.75	5.33		-		
1.6	64	120	64.00	3.73	17.14	5.83		-		
1.8	140	220	140.00	5.33	26.25	3.81	197.1	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
2.0	200	280	200.00	5.33	37.50	2.67		-		
2.2	180	300	180.00	8.00	22.50	4.44		-		
2.4	200	320	200.00	8.00	25.00	4.00		-		
2.6	190	320	190.00	8.67	21.92	4.56		-		
2.8	220	380	220.00	10.67	20.63	4.85		-		
3.0	250	410	250.00	10.67	23.44	4.27		-		
3.2	410	440	410.00	2.00	205.00	0.49	-	-		
3.4			0.00	-	-	-	-	-		
3.6			0.00	-	-	-	-	-		
3.8			0.00	-	-	-	-	-		
4.0			0.00	-	-	-	-	-		
4.2			0.00	-	-	-	-	-		
4.4			0.00	-	-	-	-	-		
4.6			0.00	-	-	-	-	-		
4.8			0.00	-	-	-	-	-		
5.0			0.00	-	-	-	-	-		
5.2			0.00	-	-	-	-	-		
5.4			0.00	-	-	-	-	-		
5.6			0.00	-	-	-	-	-		
5.8			0.00	-	-	-	-	-		
6.0			0.00	-	-	-	-	-		
6.2			0.00	-	-	-	-	-		
6.4			0.00	-	-	-	-	-		
6.6			0.00	-	-	-	-	-		
6.8			0.00	-	-	-	-	-		
7.0			0.00	-	-	-	-	-		
7.2			0.00	-	-	-	-	-		
7.4			0.00	-	-	-	-	-		
7.6			0.00	-	-	-	-	-		
7.8			0.00	-	-	-	-	-		
8.0			0.00	-	-	-	-	-		
8.2			0.00	-	-	-	-	-		
8.4			0.00	-	-	-	-	-		
8.6			0.00	-	-	-	-	-		
8.8			0.00	-	-	-	-	-		
9.0			0.00	-	-	-	-	-		
9.2			0.00	-	-	-	-	-		
9.4			0.00	-	-	-	-	-		
9.6			0.00	-	-	-	-	-		
9.8			0.00	-	-	-	-	-		
10.0			0.00	-	-	-	-	-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

5

Prova n°: 5 Quota (m): -

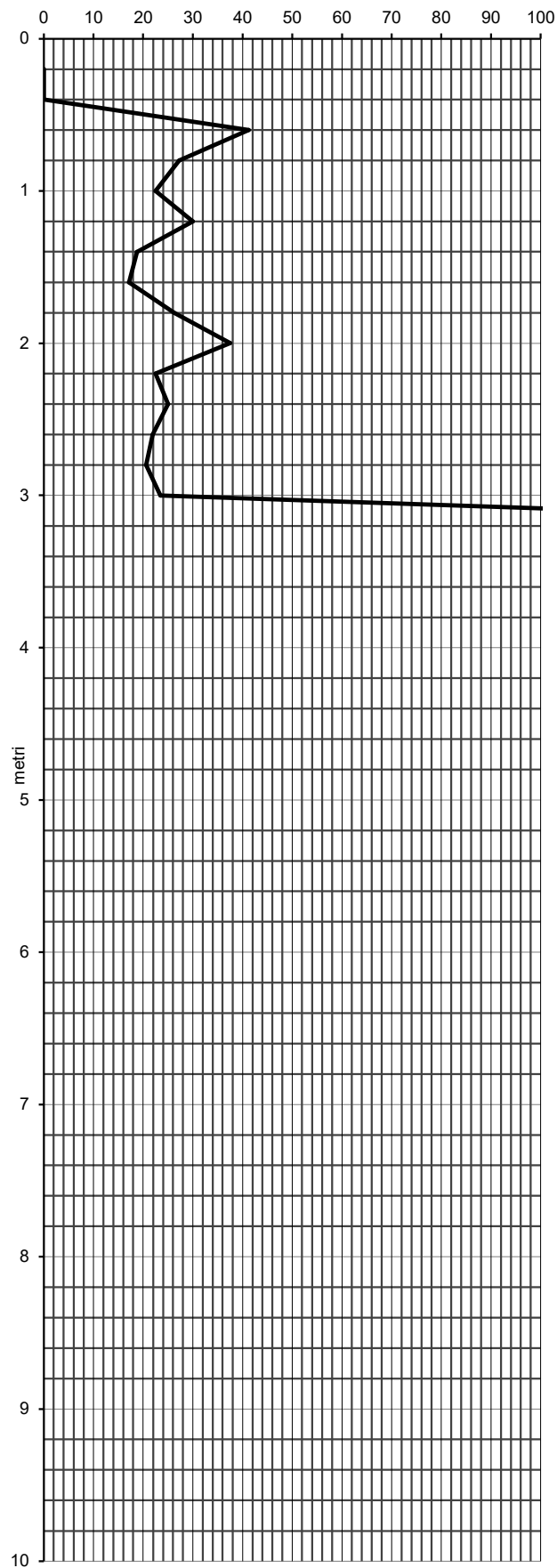
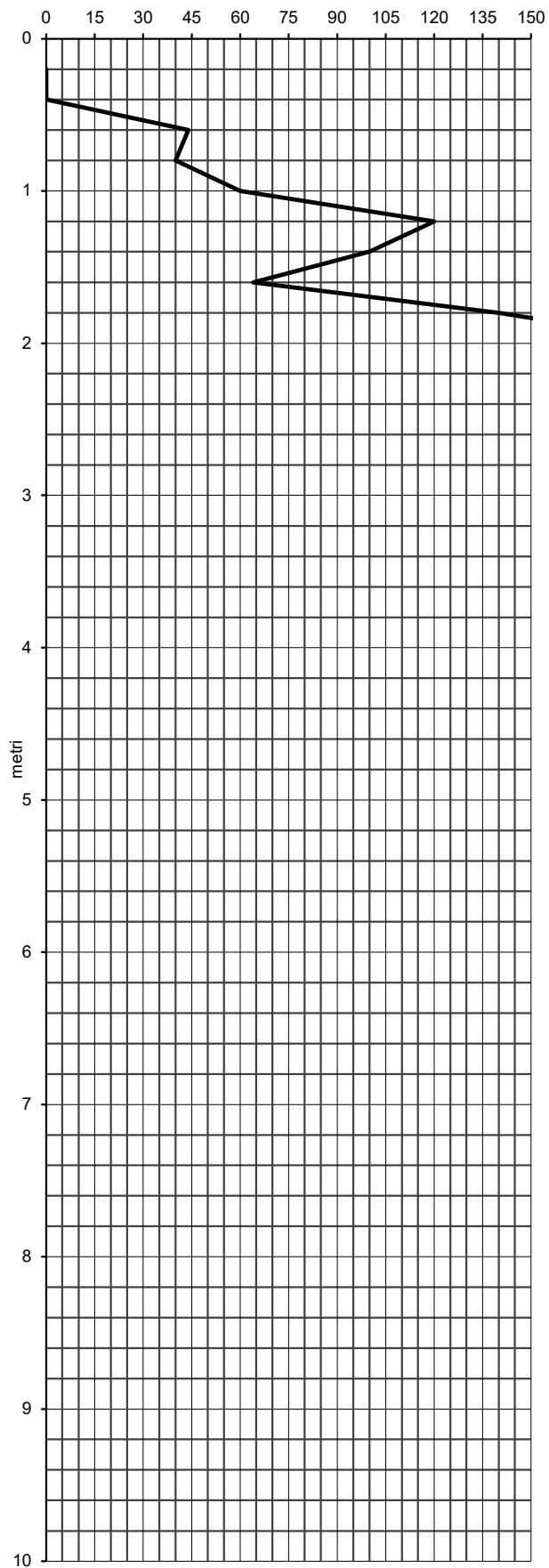
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl

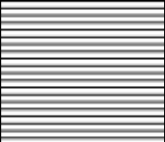
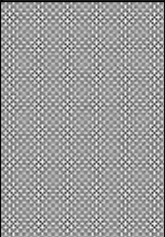


Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

TABULATO DI CALCOLO PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

6

Prova n°: **6** Quota (m): - Data: 24/10/2011
 Committenza: COO.FIN. Srl
 Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Prof. (m)	P (kg/cmq)	P+L (kg/cmq)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rp/RI	FR% (RI/Rp*100)	Rpm (kg/cmq)	Falda (m)	Descrizione litologica	Stratigrafia
0.2	0	0	0.00	-	-	-	-	-	Terreno agrario	
0.4	0	0	0.00	-	-	-	-	-		
0.6	36	60	36.00	1.60	22.50	4.44	-	-		
0.8	90	120	90.00	2.00	45.00	2.22	112.0	-	Argille limose molto compatte	
1.0	120	160	120.00	2.67	45.00	2.22		-		
1.2	120	180	120.00	4.00	30.00	3.33		-		
1.4	110	180	110.00	4.67	23.57	4.24		-		
1.6	120	180	120.00	4.00	30.00	3.33		-		
1.8	160	240	160.00	5.33	30.00	3.33	208.6	-	Argille limose molto compatte passanti a marne siltose consistenti	
2.0	220	320	220.00	6.67	33.00	3.03		-		
2.2	140	240	140.00	6.67	21.00	4.76		-		
2.4	200	320	200.00	8.00	25.00	4.00		-		
2.6	220	340	220.00	8.00	27.50	3.64		-		
2.8	240	360	240.00	8.00	30.00	3.33		-		
3.0	280	440	280.00	10.67	26.25	3.81		-		
3.2	420	450	420.00	2.00	210.00	0.48	-	-		
3.4			0.00	-	-	-	-	-		
3.6			0.00	-	-	-	-	-		
3.8			0.00	-	-	-	-	-		
4.0			0.00	-	-	-	-	-		
4.2			0.00	-	-	-	-	-		
4.4			0.00	-	-	-	-	-		
4.6			0.00	-	-	-	-	-		
4.8			0.00	-	-	-	-	-		
5.0			0.00	-	-	-	-	-		
5.2			0.00	-	-	-	-	-		
5.4			0.00	-	-	-	-	-		
5.6			0.00	-	-	-	-	-		
5.8			0.00	-	-	-	-	-		
6.0			0.00	-	-	-	-	-		
6.2			0.00	-	-	-	-	-		
6.4			0.00	-	-	-	-	-		
6.6			0.00	-	-	-	-	-		
6.8			0.00	-	-	-	-	-		
7.0			0.00	-	-	-	-	-		
7.2			0.00	-	-	-	-	-		
7.4			0.00	-	-	-	-	-		
7.6			0.00	-	-	-	-	-		
7.8			0.00	-	-	-	-	-		
8.0			0.00	-	-	-	-	-		
8.2			0.00	-	-	-	-	-		
8.4			0.00	-	-	-	-	-		
8.6			0.00	-	-	-	-	-		
8.8			0.00	-	-	-	-	-		
9.0			0.00	-	-	-	-	-		
9.2			0.00	-	-	-	-	-		
9.4			0.00	-	-	-	-	-		
9.6			0.00	-	-	-	-	-		
9.8			0.00	-	-	-	-	-		
10.0			0.00	-	-	-	-	-		

PROVA PENETROMETRICA STATICA (C.P.T.)

6

Prova n°: 6 Quota (m): -

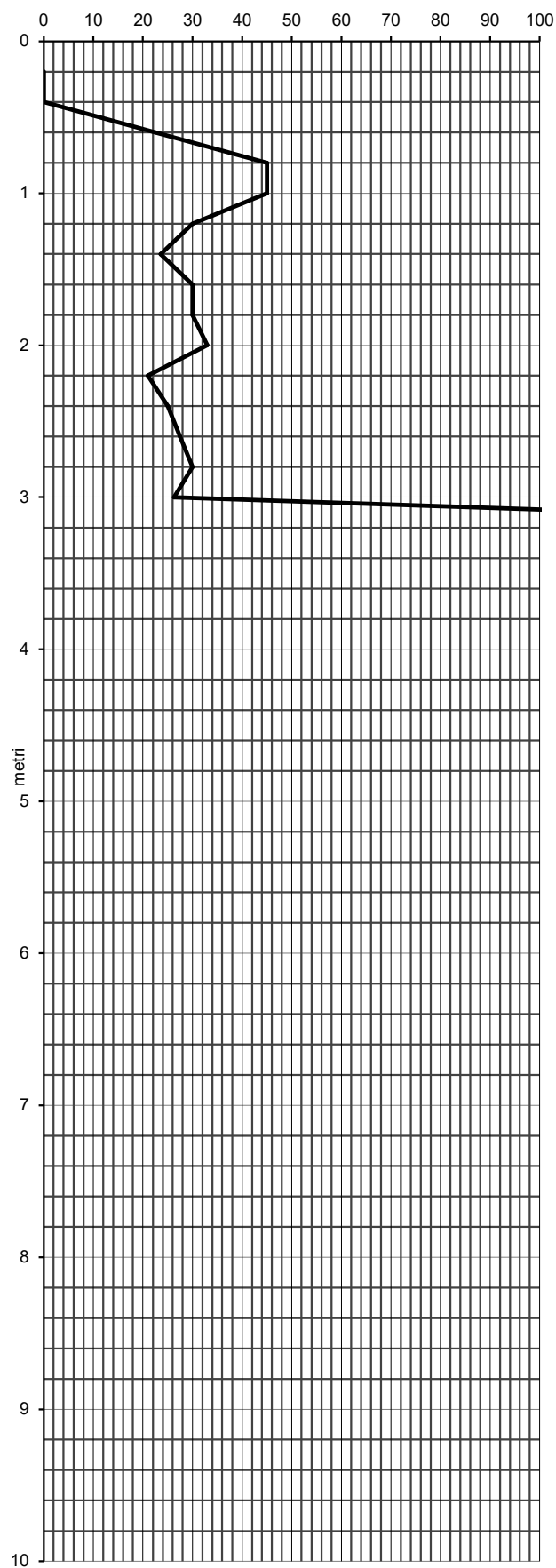
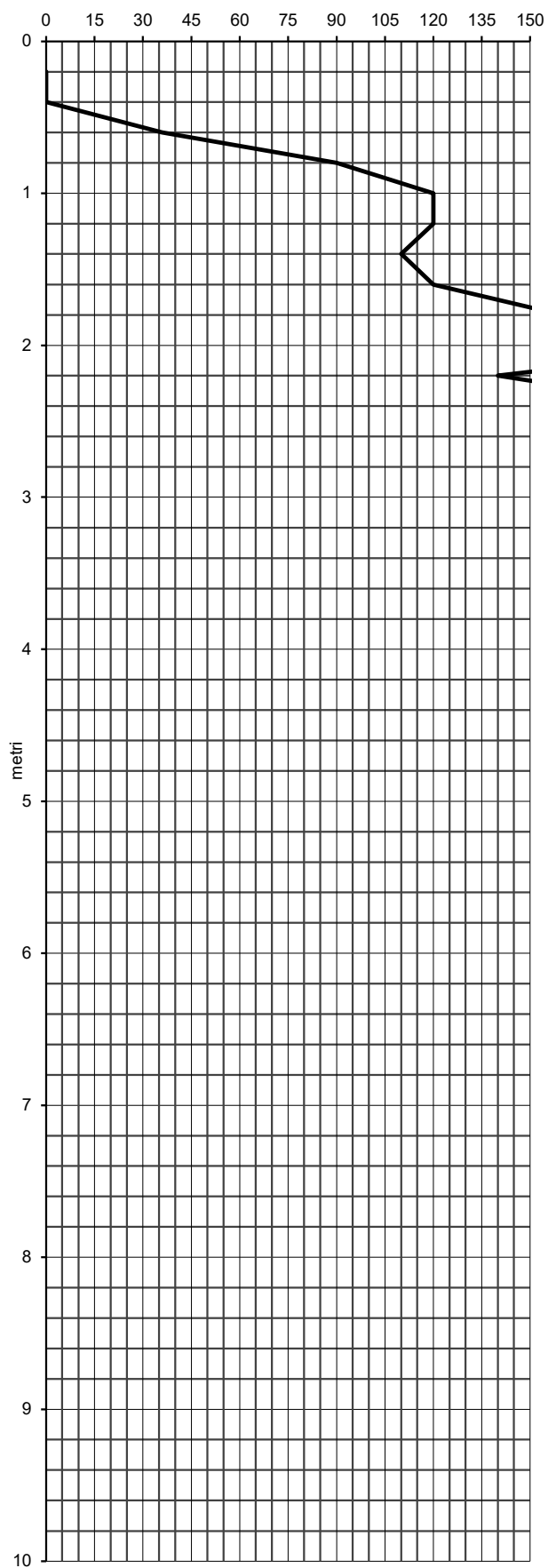
Data: 24/10/2011

Committente: COO.FIN. Srl

Località: PUA Comparto 8 (Parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)

Resistenza alla Punta (Rp) - (kg/cmq)

Rp/Rl



Legenda: Ao argille organiche; A argille; Al argille limose; La-L limi argillosi - limi; Ls-S limi sabbiosi-sabbie; S sabbie

ALLEGATO - 2 -

INDAGINE GEOFISICA - MASW

DOTT. SANTI BORTOLOTTI MARCO
GEOLOGO

Via Montorso, 19 - 41026 Pavullo nel Frignano (Mo)
Tel./Fax 0536 324233 - Cell. 339 4679008 – E Mail sb.marco@libero.it

PROSPEZIONE SISMICA DI SUPERFICIE
MASW

Committente: Coo.Fin Srl
Località: PUA Comparto 8 (parte Ambito ANS 1.8) - Via Serra di Porto, Pavullo n/F. (Mo)
Data prova 29/01/2020

Attrezzatura utilizzata

- Sismografo PASI SG 24 16S-U a 24 canali
- n° 24 geofoni verticali Pasi da 4.5 Hz con clip singola
- geofono starter
- n° 1 cavo schermato su rullo, 100 m, trasmissione geofono starter-Sismografo
- n° 2 cavi sismici su rullo, 75 m, 12 tracce, intervallo 5 m, connettori e attacchi singoli
- mazza di battuta kg 8
- piattello di battuta in alluminio (20x20x5 cm)
- pc portatile
- Software Winmasw Pro 7.3

Finalità d'indagine

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*, analisi della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) utili a definire il profilo verticale della VS (velocità di propagazione delle onde di taglio).

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche NTC 2018

Queste acquisizioni, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio (VS).

La classificazione del sottosuolo è stata svolta sulla base del valore della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad \text{m/s}$$

h_i = spessore dello strato i-esimo

$V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nello strato i-esimo

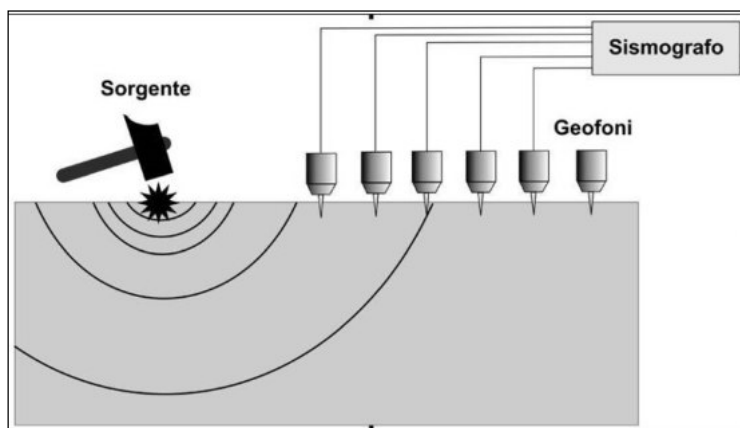
N = numero strati considerati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s

Metodologia ed elaborazione d'indagine

Lunghezza stendimento: 46 m
N° geofoni: 24
Spaziatura geofoni: 2 m
Offset energizzazione: 2-5 m

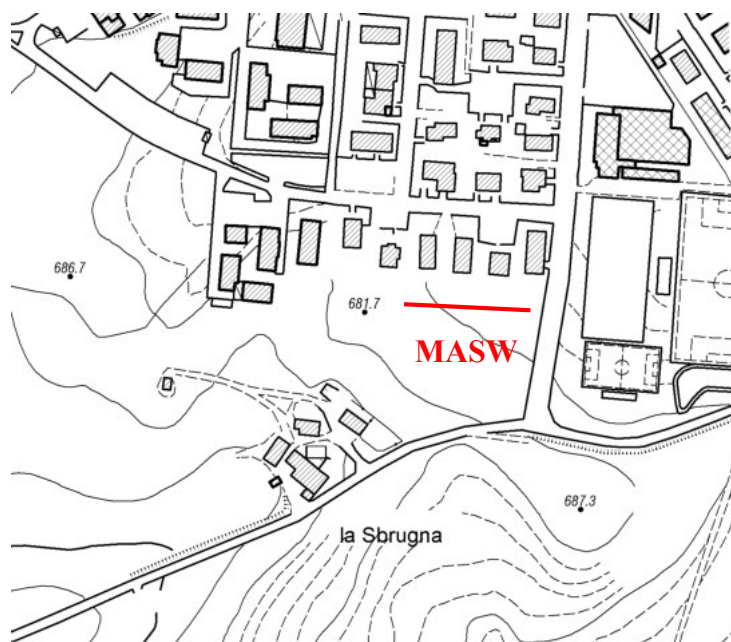
Per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_S), i dati acquisiti sono stati elaborati tramite i seguenti passaggi: determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime.



DOTT. SANTI BORTOLOTTI MARCO
GEOLOGO

Via Montorso, 19 - 41026 Pavullo nel Frignano (Mo)
Tel./Fax 0536 324233 - Cell. 339 4679008 - E Mail sb.marco@libero.it

MASW - UBICAZIONE

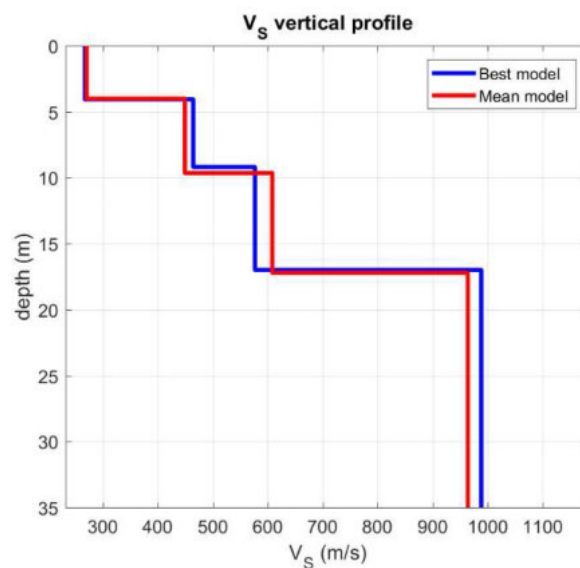
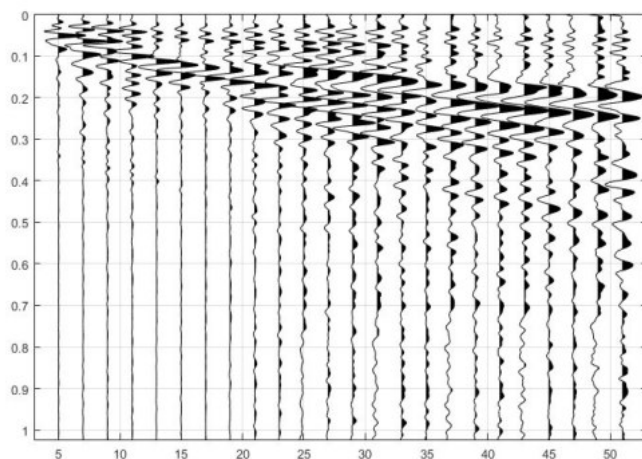


Tratta da Elemento Ctr n° 236061 a scala 1:5.000



SnapShot e modelli del profilo di velocità

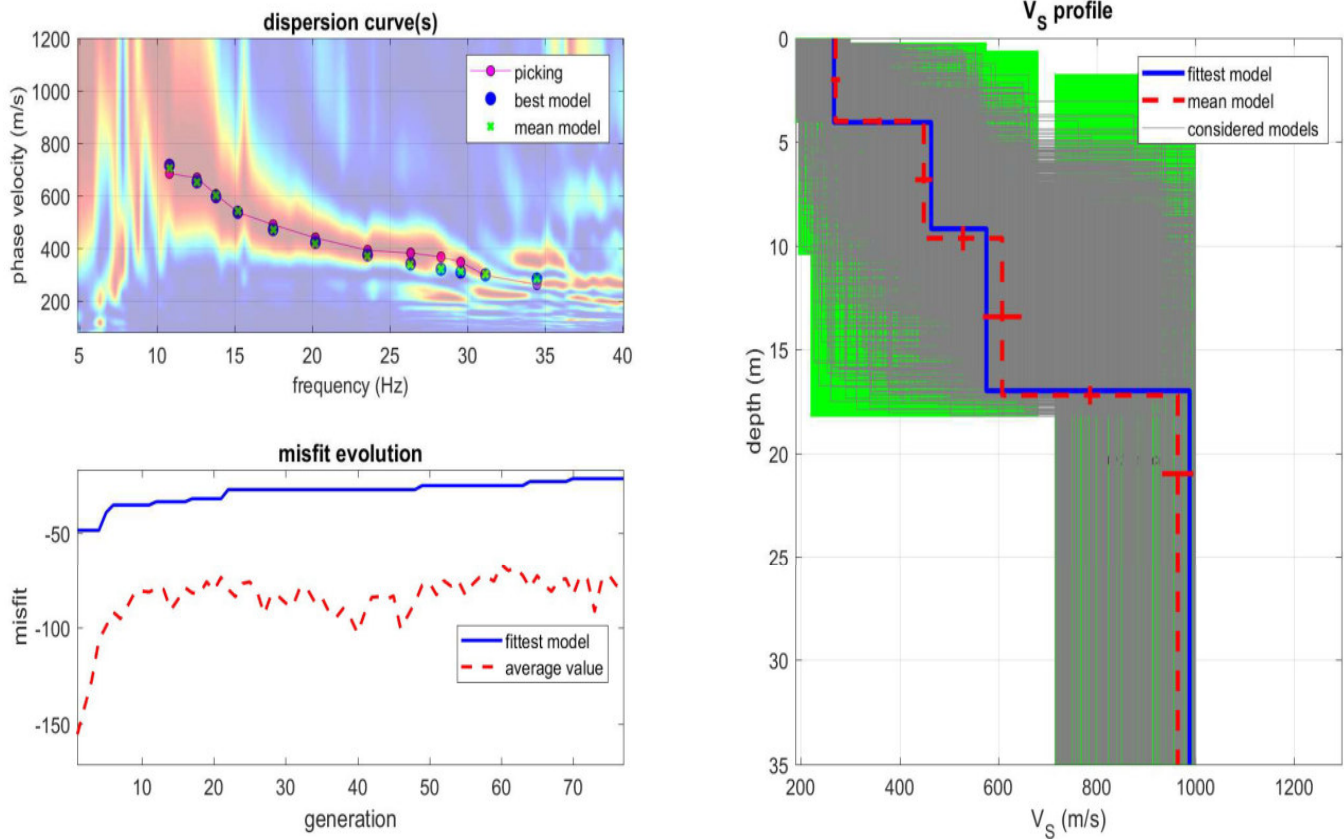
dataset: vserrap-5m-20#1.DAT
sampling: 0.25 ms
minimum offset: 5 m
geophone spacing: 2 m



DOTT. SANTI BORTOLOTTI MARCO
GEOLOGO

Via Montorso, 19 - 41026 Pavullo nel Frignano (Mo)
Tel./Fax 0536 324233 - Cell. 339 4679008 – E Mail sb.marco@libero.it

MASW



MASW

Profondità (m)		Spessore (m)	Vs (m/s)
da	a		
0.0	4.1	4.1	267
4.1	9.2	5.1	464
9.2	17.0	7.8	576
17.0			988

CATEGORIA DI SUOLO: B (NTC18)

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 equivalentemente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

$V_{s,eq} (H: 17 \text{ m}) = 426 \text{ m/s}$

ALLEGATO - 3 -

INDAGINE GEOFISICA - HVSR

INDAGINE SISMICA - HVSR

PUA Comparto 8 – Via Serra di Porto, Pavullo nel Frignano (Mo)

Instrument: TRZ-0162/01-11

Start recording: 29/01/20 14:53:57 End recording: 29/01/20 15:13:57

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 87% trace (manual window selection)

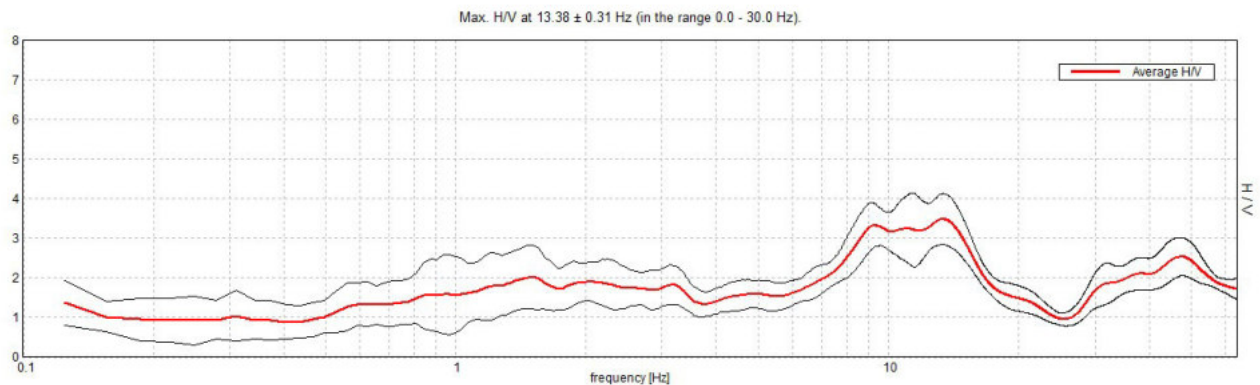
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

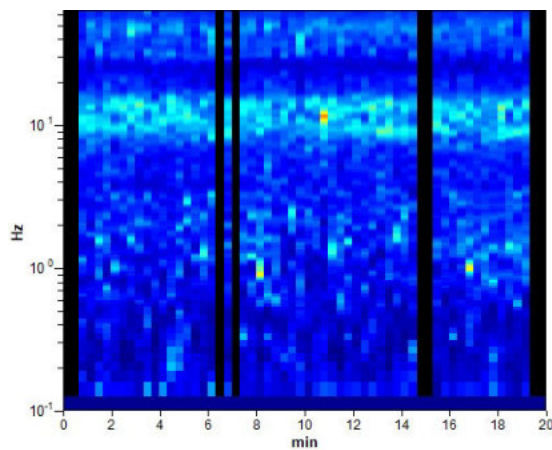
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

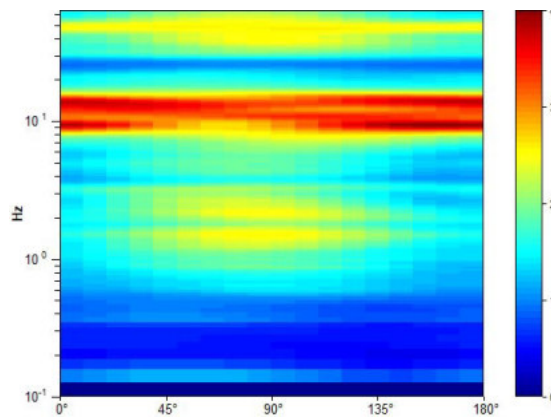
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



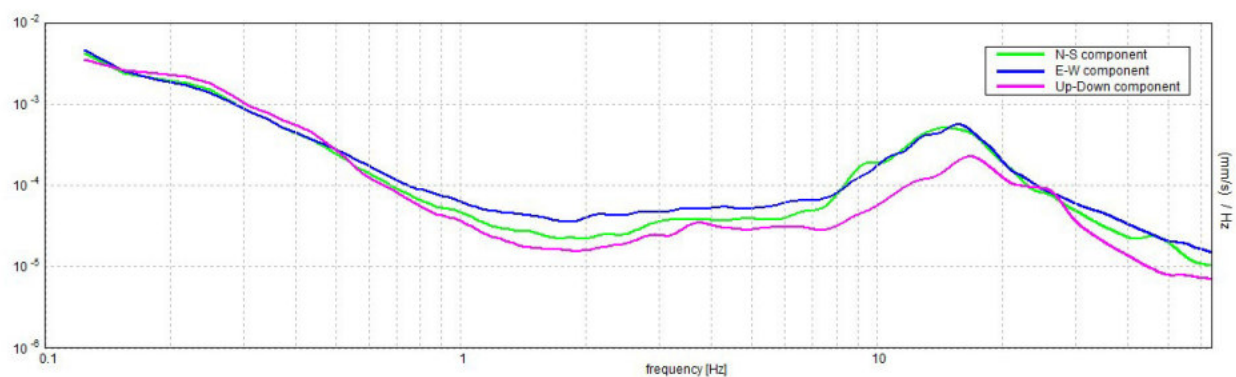
H/V TIME HISTORY



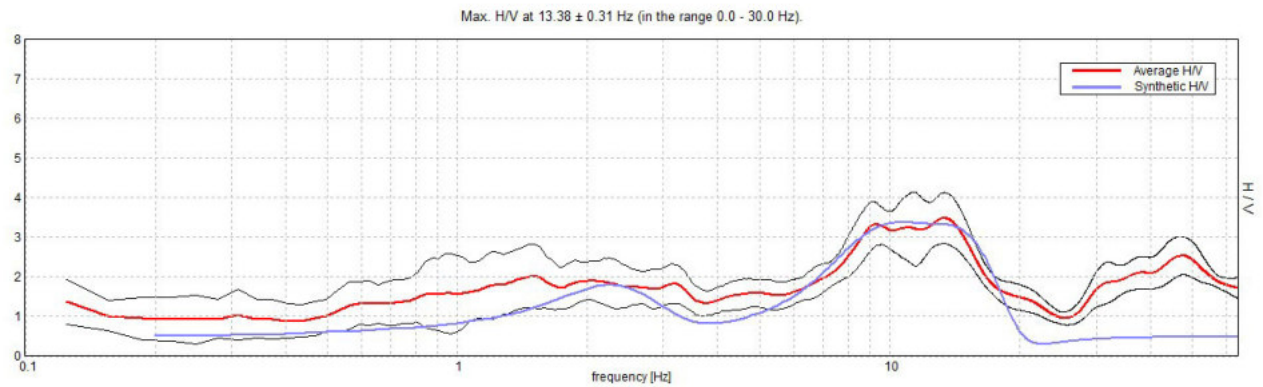
DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

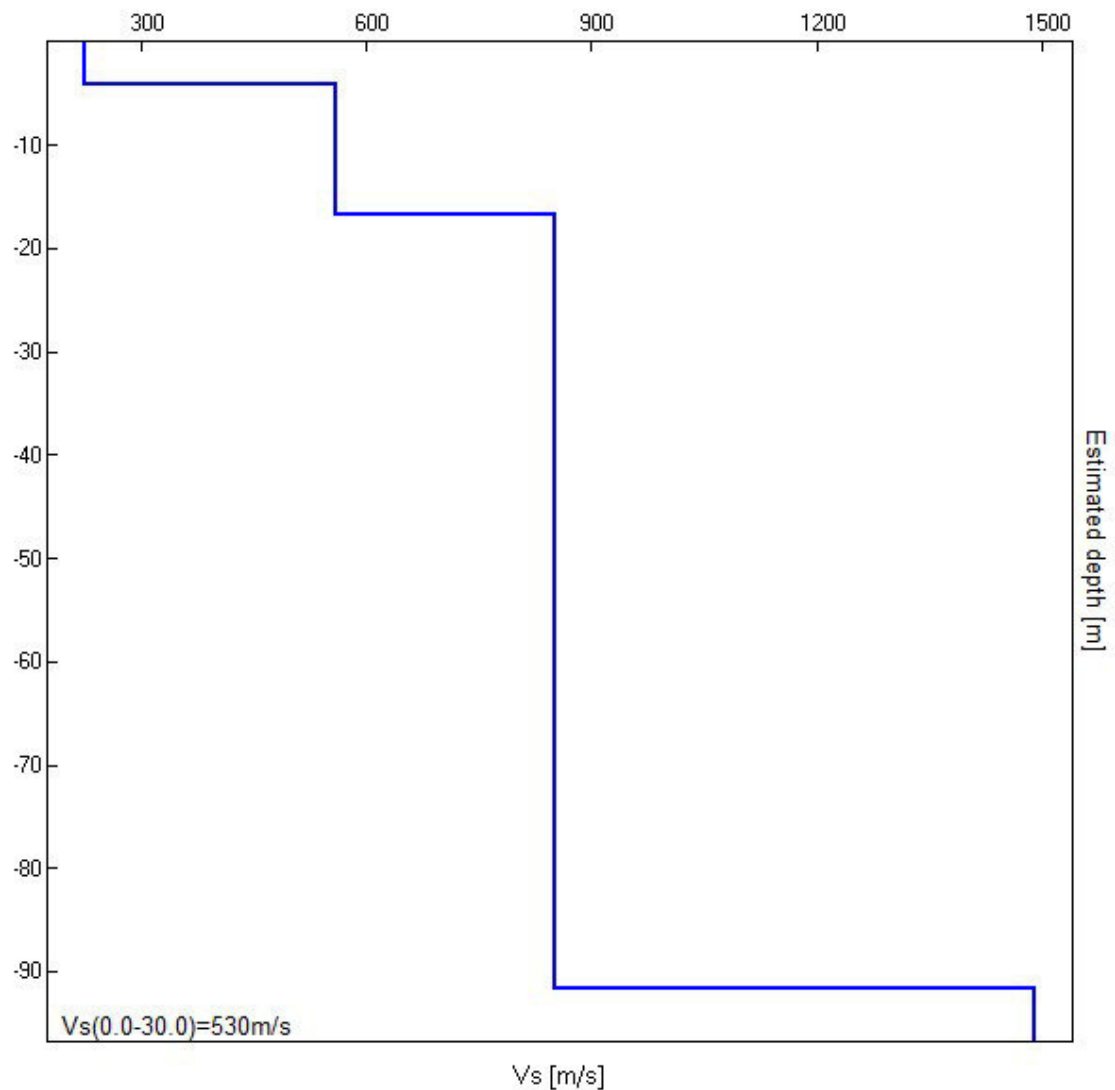


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
4.20	4.20	225	0.35
16.70	12.50	560	0.35
91.70	75.00	850	0.35
inf.	inf.	1490	0.35

$VsEq=408$ m/s (H: 16.7 m)



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 13.38 ± 0.31 Hz (in the range 0.0 - 30.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$13.38 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$13910.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 643 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	6.375 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	17.594 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.48 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01134 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.15166 < 0.66875$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3153 < 1.58$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20