



REALIZZAZIONE CENTRO INTERCOMUNALE DI PROTEZIONE CIVILE MULTIFUNZIONALE.
LOCALITÀ STAZIONE NUOVA IN AULLA (MS)

PROGETTO ESECUTIVO

REL
C

Relazione geologica

Data emissione: Novembre 2024	CODICE ELABORATO	Anno	Commissa	Progetto	Tipologia	Elaborato n°
		2023	20	E	REL	C
LIVELLO		Numero	Data	Stesura	Controllo	Approvazione
Prima emissione		01	28/11/2024	EM	EM	SN

Tecnico incaricato
Dott.Ing. Stefano NADOTTI

Geologo incaricato
Dott. Geol. Emanuele MICHELUCCI

GOPLANSTUDIO
Architettura Ingegneria Geologia

Via Carducci 72 - 54100 Massa
Sede operativa Via Fermi 21 - 54100 Massa
cell. 328 - 4066037
Fax 0585 - 793451
E-mail stefano.nadotti@gmail.com

Gruppo di lavoro
Ing. Alessandra FRUZZETTI
Ing. Marta PACIFICO
Dott. Geol. Osvaldo TURBA

INDICE

1 - PREMESSA	2
2 - QUADRO NORMATIVO	4
3 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO E IDROGRAFICO	5
3.1 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOMORFOLOGICO.....	5
3.2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	7
3.3 - IDROGRAFIA ED IDROGEOLOGIA	8
3.4 - DATI PLUVIOMETRICI	9
4 - VINCOLI E PERICOLOSITA' DELL'AREA IN ESAME	11
4.1 - VINCOLI DELL'AREA IN ESAME.....	11
4.2 - PERICOLOSITA' DELL'AREA IN ESAME.....	11
5 - FATTIBILITA' DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO	15
6 - MODELLO GEOLOGICO	17
6.1 - INDAGINI IN SITU.....	17
6.2 - INDAGINI SISMICHE	18
6.2.1 - Prospezione sismica in foro tipo DOWN-HOLE	18
6.2.2 - Prospezione sismica a rifrazione con onde P e SH.....	19
6.2.3 - Prospezione sismica con metodologia MASW.....	21
6.4 - SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO.....	22
6.5 - SPT IN FORO.....	24
6.6 - INDAGINI PENETROMETRICHE.....	25
6.6.1 - Prova penetrometrica statica (CPT).....	25
6.6.2 - Prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH).....	26
6.7 - CARATTERIZZAZIONE LITOSTRATIGRAFICA.....	29
6.8 - LIVELLO DI FALDA.....	30
6.9 - CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	30
7 - MODELLO SISMICO	36
7.1 - STORIA SISMICA E PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE.....	36
7.2 - DETERMINAZIONE DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO.....	36
7.3 - AZIONE SISMICA	37
8 - STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	41
9 - ANALISI DI STABILITA'	42
10 - CONSIDERAZIONI TECNICHE E REGIMAZIONE ACQUE	43
11 - CONCLUSIONI	44

1 - PREMESSA

Per incarico dell'Unione di Comuni Montana della Lunigiana sono stati condotti studi ed indagini di carattere geologico e sismico a supporto del progetto per la realizzazione del Centro Intercomunale di Protezione Civile Multifunzionale in località Nuova Stazione in Aulla, nel Comune di Aulla (MS).

Il lotto su cui insisterà il fabbricato in progetto risulta rappresentato all'Agenzia delle Entrate - Direzione Provinciale di Massa Carrara, Ufficio Provinciale - Territorio Servizi Catastali, nel foglio 17 dai mappali 1700 e 1705.

Il progetto prevede la realizzazione di un edificio di moderna concezione finalizzato alla gestione e supporto delle attività di Protezione Civile e dei servizi attuati e promossi dall'Unione dei Comuni della Lunigiana e dai Comuni afferenti.

La struttura avrà forma compatta ad un solo piano utile, inscrivibile in pianta in un rettangolo di lati pari a circa 26m e 12m; la dimensione minima disponibile sul lotto è circa di 22m.

La struttura sarà composta da due corpi principali uguali, disposti in maniera antisimmetrica collegati tramite un corpo più basso, avente funzione di corridoio; l'altezza netta interna media sarà di 3.8m nei corpi principali, variando da un massimo di 4.7m ad un minimo di 2.8m circa.

Per quanto riguarda il corpo di collegamento l'altezza interna è pari a 2.4m; la copertura sarà inclinata a falda singola.

Per una descrizione più dettagliata di quanto sopra descritto si rimanda alla visione degli elaborati grafici e tecnici redatti a cura dell'Ing. Stefano Nadotti (vd. fig. n.1).



Figura n.1 - Estratto modellazione grafica dello Stato di Progetto (vd. tavole grafiche e relazione tecnica redatti a cura dell'Ing. Stefano Nadotti).

Il lavoro è stato svolto attraverso un'indagine geologica, geomorfologica ed idrogeologica di superficie supportata dai risultati di un sondaggio a carotaggio continuo con prove SPT in foro e di n.5 prove penetrometriche, di cui una statica (CPT) e n.4 dinamiche superpesanti (DPSH).

Per parametrizzare dal punto di vista dinamico i terreni di fondazione, così come richiesto dal D.M. 17 Gennaio 2018, sono state realizzate n.1 prospezione sismica in foro di tipo DOWN-HOLE, n.1 stendimento di sismica a rifrazione acquisito sia con onde P che con onde SH e n.1 profilo sismico acquisito con metodologia MASW.

L'elaborazione dei dati ricavati ha consentito di ricostruire il modello geologico e sismico di riferimento per l'area in esame e di redigere la presente relazione geologico - geotecnica.

TAVOLE

Tav. n.1	Inquadramento geografico (C.T.R. 10k Regione Toscana, Fogli n.233160)	(Scala 1:10.000)
Tav. n.2	Carta geologica - geomorfologica (Estratto della "Carta geologica regionale CARG - sezione 233160" da Servizio Geologico Regionale - Regione Toscana)	(Fuori scala)
Tav. n.3.1	Ubicazione indagini geognostiche (Tavola Stato di Progetto)	(Scala 1:250)
Tav. n.3.2	Ubicazione indagini geognostiche (Stato di Progetto in sovrapposizione Ortofoto 2k Regione Toscana, Sezione 24C60)	(Scala 1:250)
Tav. n.4	Sezione geologico-tecnica interpretativa A-A' (Stato di Progetto)	(Scala 1:150)

ALLEGATI

All. n.1	Tablelle e grafici penetrometrici (Prova statica CPT1 e prove dinamiche DIN1 e DIN2 realizzate a cura della Geognostica Apuana S.r.l.)
All. n.2	Report indagini geognostiche (a cura della EnGeo Progetti S.r.l.)
All. n.3	Log sondaggio a carotaggio continuo / Documentazione fotografica cassette catalogatrici

2 - QUADRO NORMATIVO

Il presente studio è stato realizzato tenendo conto delle normative vigenti in materia ed in particolare:

- D.M. 11.3.1988 (Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione);
- L.R. 65/2014 "Norme per il Governo del Territorio" - Regione Toscana;
- P.I.T. (Piano di Indirizzo Territoriale) della Regione Toscana, adozione ed integrazione n.28 pubblicata sul BURT_16 luglio 2014;
- D. Lgs n.152 del 03/04/2006 - "Norme in materia ambientale";
- L.n.183/1989, L.n.267/1998, L.n.365/2000 (Progetto di Piano Assetto Idrogeologico - PAI, approvato con D.C.R.T. n.11 del 25/01/2005);
- Direttiva 2007/60/CE, D. Lgs n.152 del 03/04/2006, D. Lgs n.49 del 23/02/2010 (Piano di Gestione del Rischio Alluvioni - Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale, approvato con Delibera n.235 relativo alla seduta del C.I. del 03/03/2016);
- L.R. n.39/2000 "Legge forestale della Toscana", s.m.i. e Regolamento di Attuazione D.P.G.R. n.48/R del 08.08.2003;
- D.M. 17/01/2018 (Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni) e relativa circolare applicativa del 21/01/2019 n.7;
- D.P.G.R.T. n.1/R del 19/01/2022 "Regolamento di attuazione dell'art.181 della L.R. 10 novembre 2014, n.65 (norme per il governo del territorio). Disciplina sulle modalità di svolgimento dell'attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico";
- L.R. n.41 del 24/07/2018 "Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni)" - Testo aggiornato al 12/08/2022 e s.m.i.;
- D.P.G.R.T. n.5/R del 30/01/2020 "Regolamento di attuazione dell'art.104 della L.R. n.65/2014", (Norme per il Governo del Territorio) contenente disposizioni in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche;
- D.P.R. n. 120/2017, "Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'art.8 del D.L. n. 133 del 12/09/2014 convertito con modificazioni dalla L. n.164 del 11/11/2014";
- Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Lunigiana, approvato con Delibera di Consiglio Comunale n.4 del 27/02/2021.

3 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO E IDROGRAFICO

3.1 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOMORFOLOGICO

L'area in esame è posta lungo una propaggine collinare che si sviluppa nella porzione centro occidentale del territorio comunale di Aulla, che risulta delimitato a N/NW dall'Appennino Tosco - Emiliano e a SE dalla finestra tettonica delle Alpi Apuane.

In particolare, il sito in oggetto è ubicato in corrispondenza della Stazione Nuova di Aulla, lungo la zona pedecollinare del versante compreso tra il Canale di Cagina a S / SE ed il Torrente Taverone a N, ad una quota media compresa tra 72.5 e 73.0m s.l.m. (vd. tav. n.1, fig. n.2).

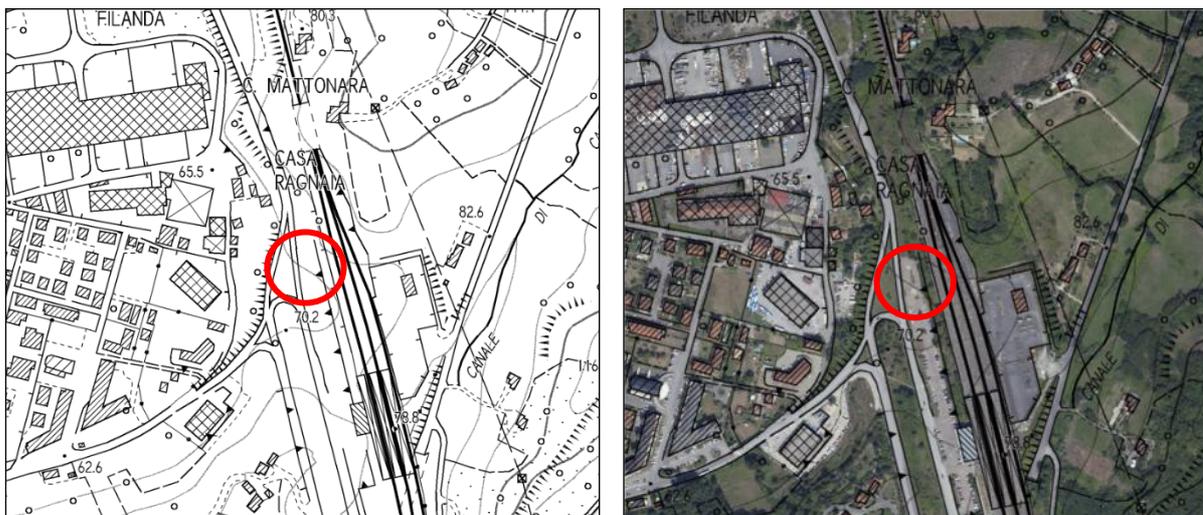


Figura n.2 - (Da sx a dx) Georeferenziazione dell'area in esame sulla C.T.R regionale in scala 1.10.000 e sulla C.T.R regionale in sovrapposizione con ortofoto (©Regione Toscana - SITA - dati A.d.t. SIGMATER).

L'area oggetto di studio risulta antropizzata, essendo delimitata dalla linea ferroviaria Parma - La Spezia a monte e da Via Giovanni Paolo II a valle; spostandoci ancora più a valle si ritrovano anche il nucleo abitato e l'area industriale - artigianale di Aulla.

In generale la pendenza media del versante in cui si colloca il sito in esame non risulta elevata, essendo caratterizzata da un valore pari al 30%, cui corrisponde un angolo del pendio di 16.9°.

I valori di pendenza possono variare localmente a seconda degli interventi antropici che si sono resi necessari per la realizzazione delle viabilità, dell'area parcheggio in cui verrà realizzata l'opera in progetto e della linea ferroviaria sopra menzionata; alla scala del fabbricato in progetto i valori di pendenza diminuiscono notevolmente e si attestano a circa il 5%, cui corrisponde un angolo del versante di circa 3°.

La rimodellazione antropica risulta facilmente osservabile anche dall'analisi e dalla comparazione della Carta Tecnica Regionale e delle Ortofoto relative all'area in esame, che sono state aggiornate nel tempo. In prima analisi è stata fatta una sovrapposizione in ambiente Gis della planimetria dello Stato di Progetto alla C.T.R. 5k (Sezione n.233162, anno 1976) ed all'Ortofoto 10k (Sezione n.233160, anno 1978), estratte dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana, dalla quale si evince come l'area in esame, alla fine degli anni '70, si attestasse ad una quota media di circa 66.0m s.l.m. (vd. fig. n.3).

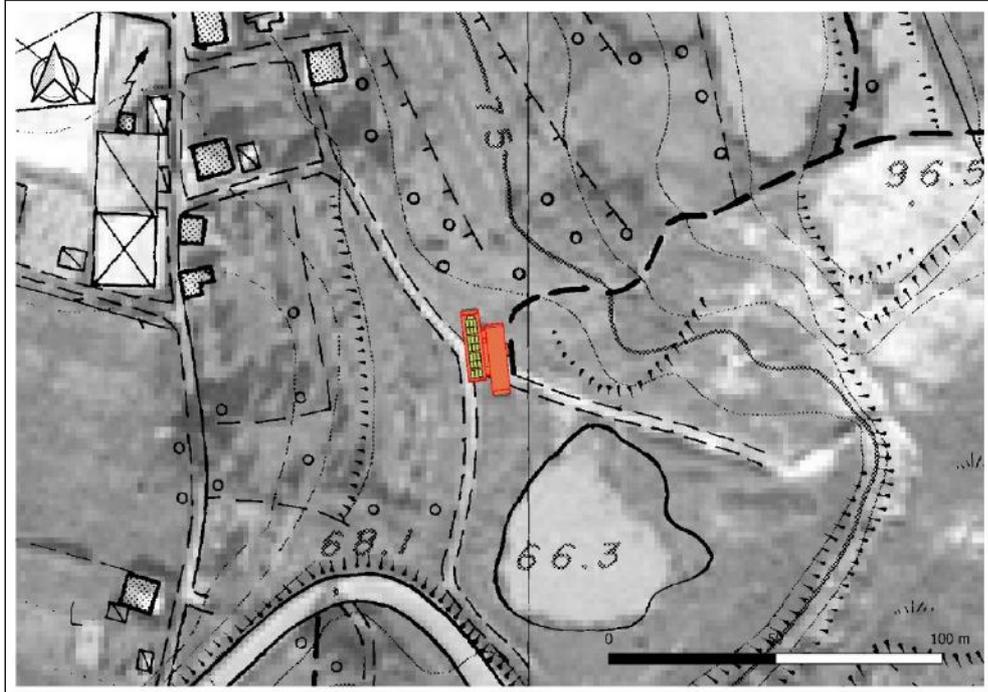


Figura n.3 - Immagine relativa alla sovrapposizione della planimetria dello Stato di Progetto (evidenziata dalla campitura di colore giallo ed arancione) alla C.T.R. 5k (Sezione n.233162, anno 1976) all'Ortofoto 10k (Sezione n.233160, anno 1978), estratte dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana.

In seconda analisi sono stata prese invece a riferimento la C.T.R. 2k (Sezione 24C60 liv.4, anno 2019) su Ortofoto 2k (Sezione 24C60, anno 2023), estratte sempre dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana; dalla sovrapposizione si evince come il sito oggetto di interventi ad oggi si attestati invece ad una quota media compresa tra 72.5m e 73.0m s.l.m. circa (vd. fig. n.4).



Figura n.4 - Immagine relativa alla sovrapposizione della planimetria dello Stato di Progetto (evidenziata dalla campitura di colore giallo ed arancione) alla C.T.R. 2k (Sezioni 24C60 liv.4, anno 2019) su Ortofoto 2k (Sezione 24C60, anno 2023), estratte dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana.

Dalla comparazione delle due immagini precedenti emerge quindi una notevole differenza di quota in m s.l.m., la quale è da ricondurre ad interventi di rimodellazione antropica con riporti di terreno, che hanno portato alla variazione della morfologia originaria con una configurazione più recente che ha consentito la realizzazione dell'attuale area parcheggio.

In definitiva l'area in esame risulta stabile e non sono stati rilevati segni precursori di fenomeni gravitativi quiescenti o in atto, concordemente a quanto riportato nella carta geomorfologica allegata al Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Lunigiana ed al Database Geomorfologico della Regione Toscana.

Si rileva invece un movimento franoso collocato a N del sito di interesse, non interferente con l'area oggetto di studio, classificato come inattivo / quiescente con tipo di movimento indeterminato.

3.2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

In termini generali, dal punto di vista geologico, l'area in esame è delimitata da elementi orografici importanti, quali il crinale appenninico toscano - emiliano a N/NW e le Alpi Apuane a SE.

L'evoluzione di questa regione è dunque strettamente collegata a quella dell'Appennino Settentrionale ed è il prodotto di una complessa storia tettonica riconducibile a due fasi distinte (Elter, 1975; Raggi, 1988; Bernini, 1991; Benini e Papani, 2002; Mantovani et alii., 2012):

- una prima fase, in cui vari stadi compressivi hanno coinvolto prima le unità più interne (Dominio Ligure Interno) fino alle unità più esterne (Dominio Ligure Esterno, Dominio Subligure e Dominio Toscano) in un arco di tempo compreso tra il Miocene Sup. e il Pliocene, con la conseguente strutturazione a falde;
- una seconda fase distensiva che ha modificato tale edificio strutturale, determinando la formazione di depressioni tettoniche, delimitate da sistemi di faglie dirette antiappenniniche in cui si sono deposte potenti successioni sedimentarie continentali (Depositi fluvio lacustri villafranchiani Auctt. dei bacini di Aulla - Olivola - Villafranca in Lunigiana, Pontremoli e Sesta Godano).

Come ampiamente descritto nel paragrafo precedente e sulla base di quanto emerso dai risultati delle indagini geognostiche realizzate, con particolare riferimento al sondaggio a carotaggio continuo che ha consentito di ricostruire in maniera dettagliata la stratigrafia dell'area di intervento, è stato rilevato un orizzonte superficiale costituito da materiale eterogenico ed eterometrico (al di sotto della pavimentazione stradale e di una soletta in c.a.), riportato antropicamente per modificare la morfologia concava di versante originaria con una morfologia a spianata attualmente adibita a parcheggio.

Per una maggiore comprensione di quanto sopra descritto si rimanda alla visione del paragrafo n.6 del presente studio.

Al di sotto dei terreni di riporto, sono stati rilevati terreni che derivano dall'alterazione sia del substrato in posto che da facies alluvionale, costituiti da elementi litoidi di dimensioni da decimetriche a centimetriche immersi in matrice limo sabbiosa e argillosa, posti al di sopra argille con caratteristiche pseudo-litoidi.

Sotto il profilo litotecnico, le formazioni che sono presenti nell'area in esame sono riconducibili a:

Terreno di riporto: terrapieno, rilevato autostradale, rilevato ferroviario.

Depositi alluvionale attivo e inattivo (GM): ghiaie limose; miscela di ghiaia, sabbia e limo. Frazione fine abbondante. Sedimenti fluviali all'interno degli alvei di piena ordinaria e depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati.

Età: OLOCENE.

Argille e argille sabbiose lignitifere lacustri e fluvio-lacustri (VILc): depositi prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni di livelli argilloso sabbiosi, sabbiosi e ghiaiosi, riconducibili ad una

litofacies argillosa comprendente argille e argille siltose grigie, grigio-azzurre, grigio-scure e nere, a luoghi laminate e ricche di lignite. I livelli ricchi di sostanza organica, spessi da pochi a qualche decina di centimetri, contengono abbondanti frammenti di lignite (da centimetrici a decimetrici) e rari micro resti vegetali. Gli intervalli argilloso-sabbiosi e sabbiosi, da grigi ad ocra sono spessi da qualche centimetro a qualche decimetro e con estensione massima di qualche metro. All'interno degli intervalli argilloso-sabbiosi e sabbiosi sono intercalate rare lenti di conglomerati clasto-sostenuti, con spessore da decimetrico a metrico ed estensione di qualche metro.

Età: RUSCINIANO SUP. - VILLAFRANCHIANO SUP. P.P.

Le "argille e argille lignifere lacustri e fluvio-lacustri (VIL_c)" sono riconducibili ai depositi fluvio-lacustri villafranchiani del bacini di Aulla - Olivola.

La successione di Aulla-Olivola comprende dal basso verso l'alto depositi lacustri del Rusciniense p.p.-Villafranchiano inferiore p.p. (Peliti di Aulla) sormontati da conglomerati fluviali con clasti derivanti da Unità Liguri e dai termini più recenti della Falda Toscana, privi di clasti derivanti dall'"Autoctono" Aucct. (Conglomerato di Collecchia). Quest'ultima formazione, attribuita ad un generico Villafranchiano p.p., è a sua volta sormontata in disconformità da conglomerati poligenici contenenti elementi della successione metamorfica (Conglomerato di Olivola) del Villafranchiano superiore (PUCCINELLI et alii, 2015, cum biblio).

La successione descrive bene un'accelerazione nel Villafranchiano del sollevamento del nucleo apuano che ha determinato un'energica erosione prima delle coperture liguri e toscane non metamorfiche per arrivare poi, con i Conglomerati di Olivola, ad erodere anche il complesso metamorfico

3.3 - IDROGRAFIA ED IDROGEOLOGIA

Dal punto di vista idrografico, l'asta idrica di maggiore importanza della zona è sicuramente rappresentata dal Fiume Magra, che scorre ad una distanza di circa 1.0km in direzione W.

Come già accennato in precedenza, il sito in esame è ubicato in corrispondenza della Stazione Nuova di Aulla, lungo la zona pedecollinare del versante compreso tra il Canale di Cagina a S / SE ed il Torrente Taverone a N ad una quota media compresa tra 72.5 e 73.0m s.l.m.

Il Canale di Cagina prende origine dall'omonima località tra le quote 90.0 e 100.0m s.l.m. e confluisce a S nel Canale del Rovinello, affluente in destra idrografica del Torrente Aulella, a sua volta affluente in sinistra idrografica del Fiume Magra.

Il Torrente Taverone, affluente in sinistra idrografica del Fiume Magra, prende origine in direzione NE rispetto all'area in esame, dalle pendici del Monte Alto (1895.1m s.l.m.) dell'Appennino Tosco - Emiliano,

La regimazione idraulica delle acque meteoriche è garantita da una rete idrica bassa che copre l'intera area a parcheggio su cui è prevista la realizzazione del fabbricato in progetto.

Sotto il profilo idrogeologico, per la propria natura mineralogica e petrografica, le *Argille e argille sabbiose lignitifere lacustri e fluvio-lacustri (VIL_c)* presentano una permeabilità secondaria per fessurazione / fratturazione.

I depositi alluvionali soprastanti, costituiti da una frazione granulometrica grossolana (ghiaie) immersa in una matrice sabbiosa-limosa e argillosa, consentono invece una buona infiltrazione delle acque meteoriche.

Al di sopra, il terreno di riporto, costituito principalmente da una frazione granulometrica fine (limo sabbioso ed argilloso / sabbia limosa con rari elementi di ghiaia), presenta invece una limitata capacità di infiltrazione solo laddove prevale la frazione risulta più grossolana.

Per tale configurazione idrogeologica, è presumibile che durante periodi di intensa piovosità, la locale presenza di una circolazione idrica sotterranea possa verificarsi all'interno dei livelletti più marcatamente grossolani del terreno di riporto, all'interno dei depositi alluvionali, al contatto tra la i depositi alluvionali ed il substrato roccioso e più probabilmente all'interno delle fratture dell'orizzonte più superficiale di quest'ultimo.

Di seguito sono riassunte le proprietà idrogeologiche della copertura e del substrato roccioso rilevati nell'area in esame, basate sui caratteri litologici primari (porosità), su quelli acquisiti (scistosità, fessurazione, degradazione chimico-fisica, etc.) e sui dati idrochimici ed idrologici.

In particolare, sono state individuate tre unità idrogeologiche a diverso grado di permeabilità:

- Terreni a medio - bassa permeabilità ($10^{-6}\text{m/s} < K < 10^{-9}\text{m/s}$): materiale costituito da limo sabbioso e argilloso e sabbia limosa con rari elementi di ghiaia.
Terreno di riporto.
- Terreni ad alta permeabilità ($K > 10^{-4}\text{m/s}$) ghiaie limose; miscela di ghiaia, sabbia e limo.
Depositi alluvionale attivo e inattivo (GM).
- Terreni a bassa permeabilità ($K > 10^{-9}\text{m/s}$) unità litostratigrafica argillitica litoide.
Argille e argille sabbiose lignitifere lacustri e fluvio-lacustri (VILC)

3.4 - DATI PLUVIOMETRICI

Per avere dati certi sulle quantità di precipitazioni sono state utilizzate le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP- aggiornamento al 2012), disponibili sul sito www.sir.toscana.it.

Come stazione pluviografica di riferimento è stata considerata quella di Licciana Nardi (Cod. TOS09000021), Comune di Licciana Nardi (MS).

Per il calcolo dell'intensità pluviometrica può essere utilizzata la seguente equazione:

$$h = a \times t^n$$

dove:

h = altezza della pioggia (in mm)

t = durata (in ore)

a e n = parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

Per la stazione pluviografica suddetta vengono forniti, per un tempo di ritorno ventennale ($Tr = 20$ anni) e duecentennale ($Tr = 200$ anni), i seguenti parametri:

Tr (anni)	a	n
20	80.611	0.28835
200	130.039	0.31192

Per i vari tempi di ritorno considerati, la curva pluviografica fornisce valori cui corrispondono le intensità pluviometriche orarie riassunte nella seguente tabella (Durata pioggia 1h).

Tr (anni)	Pioggia critica oraria (mm)	Intensità pluviometrica (l/s/m ²)
20	80.611	0.022391
200	130.039	0.036121

Per una corretta progettazione delle opere idrauliche necessarie allo smaltimento delle acque meteoriche si consiglia di utilizzare i suddetti valori.

4 - VINCOLI E PERICOLOSITA' DELL'AREA IN ESAME

4.1 - VINCOLI DELL'AREA IN ESAME

Tra le cartografie consultabili nel Geoportale Geoscopio, è possibile valutare gli aspetti legati al Vincolo Idrogeologico, istituito con R.D. n.3267/1923 e le aree vincolate ai sensi del PIT con valenza di Piano Paesaggistico.

Nel primo caso, l'area in esame non rientra tra quelle sottoposte a vincolo idrogeologico (vd. fig. n.5); nel secondo caso l'area non rientra tra quelle tutelate, né in aree boscate, pertanto non si rilevano vincoli idrogeologico-ambientali (vd. fig. n.6).

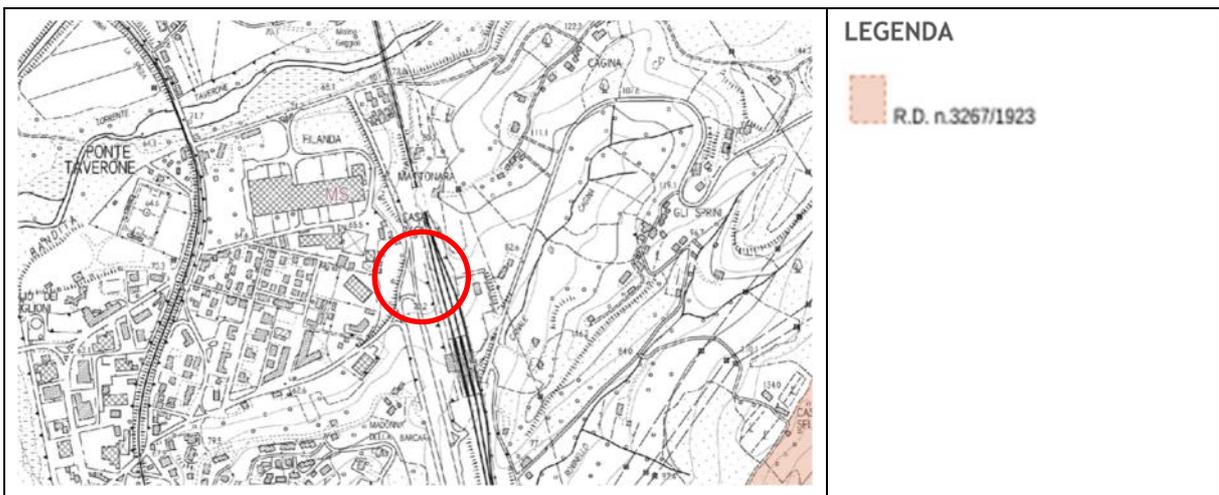


Figura n.5 - Estratto fuori scala della "Cartografia del Vincolo Idrogeologico" estratta dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.



Figura n.6 - Estratto fuori scala della "Cartografia del PIT con valenza del Piano Paesaggistico" estratta dal Geoportale Geoscopio della Regione Toscana; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

4.2 - PERICOLOSITA' DELL'AREA IN ESAME

Con la Legge Regionale 24 dicembre 2013 n.77 sono state soppresse le Autorità di Bacino Regionali, pertanto l'area in esame, che ricadeva sotto la pianificazione dell'Autorità di Bacino Toscana Nord, è stata

ricompresa nel Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale, individuato con il D.L. 152/2006, ai sensi delle indicazioni della Direttiva 2000/60/CE.

In attuazione della direttiva 2007/60/CE e del D. Lgs. 23 febbraio 2010, n.49 è stato adottato, con deliberazione n. 231 del 17 dicembre 2015 del Comitato Istituzionale integrato (C.I. Integrato), il "Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) del Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale" (comprendente i bacini idrografici dell'Arno (bacino nazionale), Magra, Fiora, Marecchia-Conca, Reno (bacini interregionali), Toscana Nord, Toscana Costa e Ombrone (bacini regionali).

A partire dal 19 giugno 2016, sono scaduti i 180 giorni dalla data di adozione del PGRA dell'Appennino Settentrionale, avvenuta con Delibera di Comitato Istituzionale Integrato n.231, per cui le disposizioni della Disciplina di Piano di PGRA hanno assunto carattere vincolante per le amministrazioni, gli enti pubblici nonché per i privati. Conseguentemente, in coerenza con gli indirizzi dettati dalla D.C.R. n.84 del 1 dicembre 2015, risulta decaduta la parte idraulica del PAI e risultano vigenti la nuova Disciplina di piano allegata alla Delibera n.231 e le nuove mappe di pericolosità e rischio alluvioni di cui al suddetto piano. Con Conferenza Istituzionale Permanente (CIP), delibera n. 26 del 20 dicembre 2021, è stato adottato il primo aggiornamento del PGRA (2021-2027).

Dalle nuove "Mappe della pericolosità da alluvione fluviale" redatte dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, l'area in oggetto non ricade tra quelle classificate a pericolosità da alluvione fluviale (vd. fig. n.7).

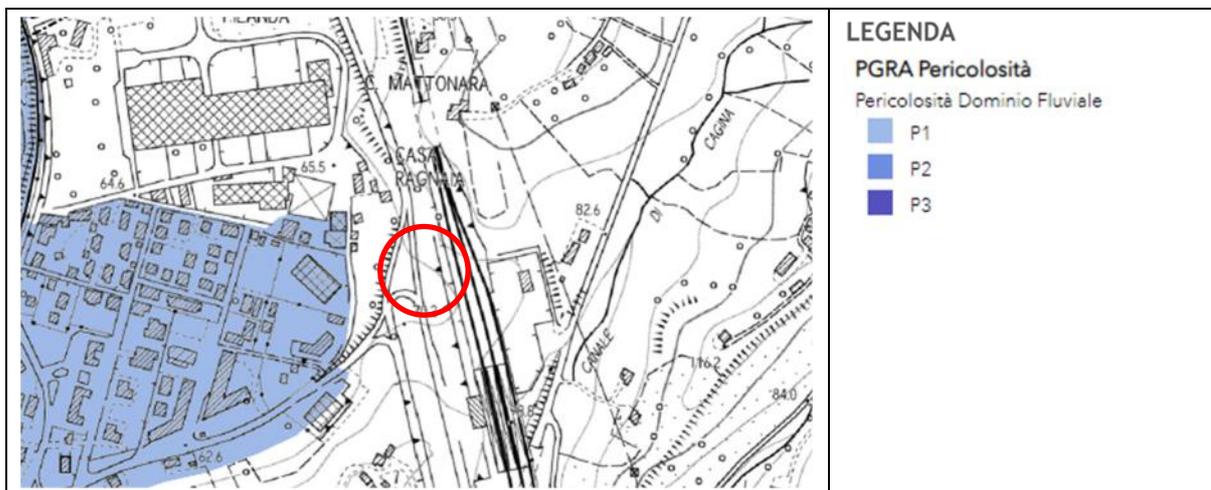


Figura n.7 - Estratto fuori scala della carta del Piano di Gestione Rischio Alluvioni e relativa legenda allegata; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

Con Conferenza Istituzionale Permanente (CIP), delibere n.39 e n.40 del 28 marzo 2024, sono stati adottati in via definitiva il "Progetto PAI Dissesti geomorfologici" (Piano stralcio di distretto per l'Assetto Idrogeologico previsto all'art. 67 del D.Lgs. 152/06; sostituisce interamente i vari PAI elaborati secondo le disposizioni della legge 183/89) e le relative misure di salvaguardia.

Dall'osservazione delle nuove "Mappe di pericolosità e rischio da dissesti di natura geomorfologica" redatte dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, il sito di interesse risulta inserito tra le aree perimetrate aree a media propensione al dissesto "P2b" (vd. fig. n.8):

P2b "Pericolosità media": aree stabili con suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica moderata.

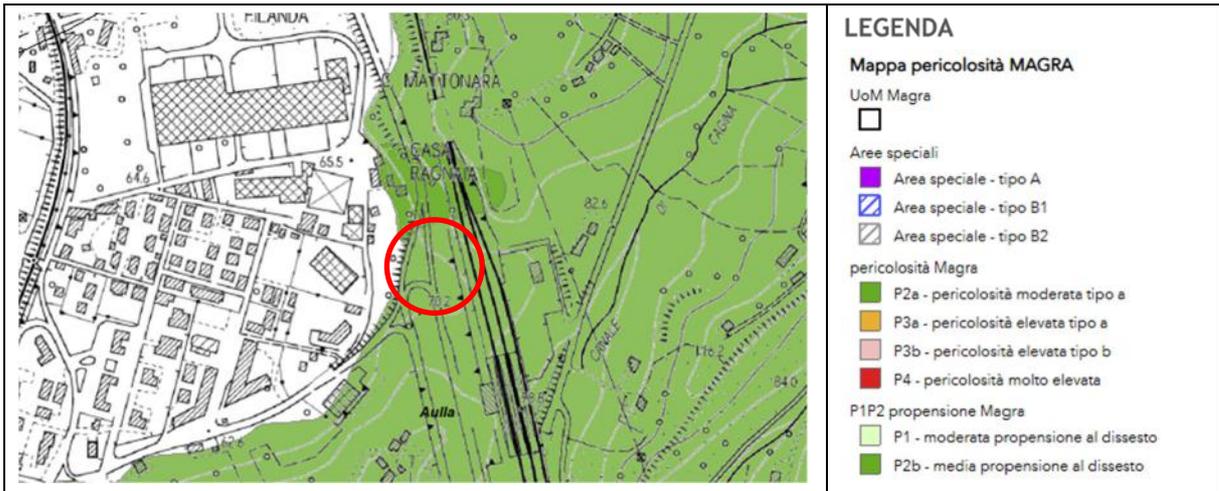


Figura n.8 - Estratto fuori scala della cartografia web-gis del Progetto PAI "Dissesti geomorfologici" e relativa legenda allegata; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

Per avere un quadro completo delle condizioni di pericolosità dell'area in esame, vengono prese a riferimento la "Carta della pericolosità geologica", la "Carta della pericolosità idraulica" e la "Carta della pericolosità sismica" redatte ai sensi del D.P.G.R.T. 53/R del 2011 ed allegate al Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Lunigiana, approvato con Delibera di Consiglio Comunale n.4 del 27/02/2021.

Dall'esame della "Carta della pericolosità geologica" (tavola QG.6 AU), si osserva che l'area in esame ricade all'interno della classe (vd. fig. n.9):

G2 "Pericolosità geomorfologica media": aree in cui sono presenti fenomeni franosi inattivi e stabilizzati (naturalmente o artificialmente); aree con elementi geomorfologici, litologici e giaciturali dalla cui valutazione risulta una bassa propensione al dissesto; corpi detritici su versanti con pendenze inferiori al 25%.



Figura n.9 - Estratto fuori scala della Tavola QG.6 AU "Carta della pericolosità geologica" allegata al P.S.I. dell'Unione dei Comuni della Lunigiana; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

Dall'esame della "Carta della pericolosità idraulica" (tavola QG.7 AU), si osserva che l'area edificatoria non ricade all'interno della classe (vd. fig. n.10):

P11 "Pericolosità idraulica bassa": aree collinari o montane prossime ai corsi d'acqua per le quali ricorrono le seguenti condizioni: non vi sono notizie storiche di inondazioni; sono in situazioni favorevoli

di alto morfologico, di norma a quote altimetriche superiori a metri 2 rispetto al piede esterno dell'argine o, in mancanza, al ciglio di sponda.



Figura n.10 - Estratto fuori scala della Tavola QG.7 AU "Carta della pericolosità idraulica" allegata al P.S.I. dell'Unione dei Comuni della Lunigiana; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

Dall'esame della "Carta della pericolosità sismica" (tavola QG.8 AU), si osserva che l'area in esame ricade all'interno della classe (vd. fig. n.11):

S2 "Pericolosità sismica media": zone suscettibili di instabilità di versante inattiva e che pertanto potrebbero subire riattivazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici; zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (che non rientrano tra quelli previsti per la classe S3).

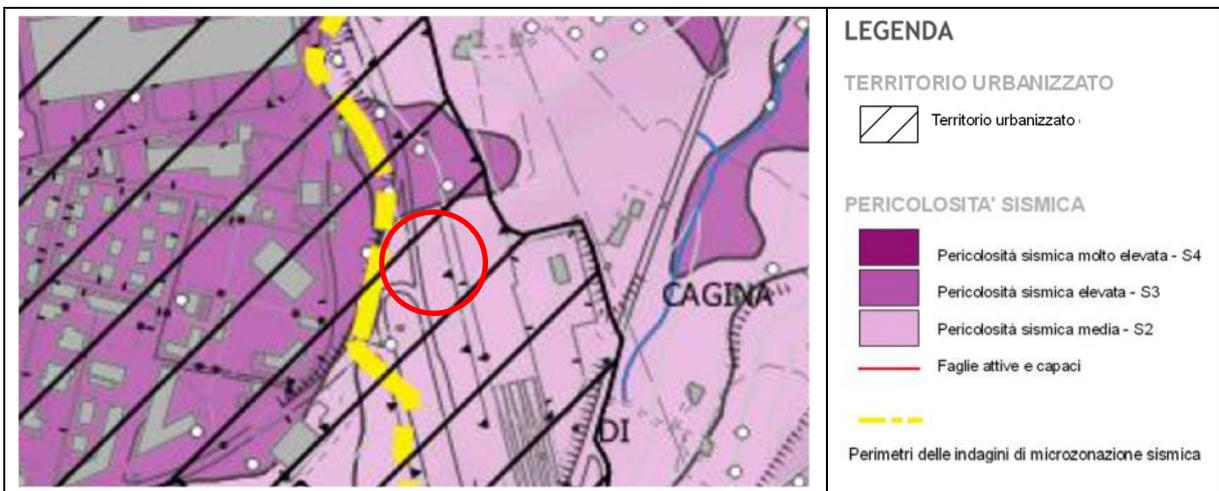


Figura n.11 - Estratto fuori scala della Tavola QG.8 AU "Carta della pericolosità sismica" allegata al P.S.I. dell'Unione dei Comuni della Lunigiana; l'area in esame viene evidenziata nel cerchio di colore rosso.

5 - FATTIBILITA' DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

Da un punto di vista urbanistico al momento il Comune di Aulla si trova nella condizione di avvenuta decadenza della validità del Regolamento Urbanistico ed è in assenza del nuovo POC.

L'unico strumento vigente è il Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Lunigiana.

Si ricorda che il sito in esame ricade in area a pericolosità geologica media (G.2), pericolosità sismica media (S.2) ed in aree a pericolosità idraulica bassa (P11), definite ai sensi del D.P.G.R.T. 53/R del 25/10/2011 "Regolamento di attuazione dell'articolo 62 della legge regionale 3 gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche".

In prima analisi viene dunque eseguita una valutazione delle condizioni di fattibilità ai sensi del decreto sopra menzionato, nel quale vengono riportati i criteri di fattibilità in relazione agli aspetti geologici, idraulici e sismici di cui si riporta un breve estratto:

(...)

3.2.1 Criteri generali di fattibilità in relazione agli aspetti geologici

(...)

Nelle situazioni caratterizzate da pericolosità geologica media le condizioni di attuazione sono indicate in funzione delle specifiche indagini da eseguirsi a livello edificatorio al fine di non modificare negativamente le condizioni ed i processi geomorfologici presenti nell'area.

(...)

3.5 Criteri generali in relazione agli aspetti sismici

(...)

Nelle situazioni caratterizzate da pericolosità sismica media (S2) e da pericolosità sismica bassa (S1) non è necessario indicare condizioni di fattibilità specifiche per la fase attuativa o per la valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.

(...)

Con D.P.G.R.T. n.5/R del 30/01/2020 "Regolamento di attuazione dell'art.104 della L.R. n.65/2014", (Norme per il Governo del Territorio) contenente disposizioni in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche, il D.P.G.R.T. 53/R è stato abrogato.

Pertanto, la valutazione della fattibilità viene valutata anche sulla base delle disposizioni indicate nel D.P.G.R.T. n.5/R del 2020, mantenendo inalterate le condizioni di pericolosità riscontrate.

Nell'Allegato A "Direttive tecniche per lo svolgimento delle indagini geologiche, idrauliche e sismiche" esplicativo del decreto sopra menzionato, vengono riportati i criteri di fattibilità in relazione agli aspetti geologici, idraulici e sismici di cui si riporta un breve estratto:

(...)

3.2 Criteri generali di fattibilità in relazione agli aspetti geologici

(...)

3.2.3. Nelle aree caratterizzate da pericolosità geologica media (G2), le condizioni di attuazione sono indicate in funzione delle specifiche indagini da eseguirsi a livello edificatorio, al fine di non modificare negativamente le condizioni ed i processi geomorfologici presenti nell'area.

(...)

3.6 Criteri generali di fattibilità in relazione agli aspetti sismici

(...)

3.6.5. Nelle aree caratterizzate da pericolosità sismica media (S2) non è necessario indicare condizioni di attuazione per la fase attuativa o progettuale degli interventi. Limitatamente a quelle connesse con contrasti di impedenza sismica attesa oltre alcune decine di metri dal piano campagna e con frequenza fondamentale del terreno indicativamente inferiore ad 1herz, la fattibilità degli interventi di nuova edificazione tiene conto dell'analisi combinata della frequenza fondamentale del terreno e del periodo proprio delle tipologie edilizie,

.....
al fine di verificare l'eventuale insorgenza di fenomeni di doppia risonanza terreno-struttura nella fase della progettazione edilizia.

(...)

Pertanto, tenuto conto delle condizioni di pericolosità individuate e delle prescrizioni di fattibilità fornite dal regolamento Regionale, non si rilevano limitazioni circa la fattibilità degli interventi edilizi in progetto.

In merito alla fattibilità derivante ai sensi della Disciplina di Piano dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale e delle norme di attuazione del Piano Stralcio Assetto Idrogeologico dell'ex Bacino del Fiume Magra e del Torrente Parmignola, si rileva quanto segue.

Secondo i dettami della disciplina di "Piano di bacino stralcio assetto idrogeologico del distretto idrografico dell'appennino settentrionale per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica (pai dissesti)", edizione marzo 2024, gli interventi in progetto risultano ammessi ai sensi del Capo 2, art. 12:

Art. 12 – Aree a pericolosità media (P2) e moderata (P1) – Indirizzi per gli strumenti di governo del territorio

1. Nelle aree P2 e P1 sono da privilegiare le tipologie di intervento previste dagli strumenti di governo del territorio che non determinino condizioni di instabilità e non modifichino negativamente le condizioni ed i processi geomorfologici nell'area e nelle zone potenzialmente interessate dagli interventi e dalle loro pertinenze.

Secondo i dettami delle norme di attuazione del Piano Stralcio Assetto Idrogeologico dell'ex Bacino del Fiume Magra e del Torrente Parmignola costituito ai sensi dell'art. 17, comma 6 ter, della L. 18 maggio 1989, n. 183, definita una pericolosità geomorfologica media (PG2) in analogia a quanto individuato dalla cartografia webgis dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, gli interventi in progetto risultano ammessi ai sensi del punto 2, comma 4, lett b), punto 2:

(...)

Aree a pericolosità geomorfologica media (PG2) - In tali aree si applica la seguente disciplina:

(...)

b) sono consentiti, ove ammessi dallo SUG, i seguenti interventi di carattere edilizio – infrastrutturale:

(...)

2. nuova edificazione, nuove infrastrutture e reti dei servizi, purché i relativi progetti siano corredati da indagini geologico - tecniche a livello di area complessiva, redatte secondo i criteri di cui all'Allegato n. 7, e prevedano la realizzazione di eventuali opere di miglioramento delle condizioni di stabilità in relazione alla natura dell'intervento ed a quella del dissesto.

I Comuni, nell'ambito dell'esercizio delle competenze in materia di pianificazione territoriale e urbanistica, sulla base delle conoscenze e degli elementi tecnici acquisiti a seguito delle indagini geologico - tecniche a livello di area complessiva di cui alla lettera b), punto 2, possono regolamentare le attività consentite prevedendo eventuali limiti e/o divieti per gli interventi infrastrutturali e urbanistico-edilizi per i territori ricompresi in tali aree.

6 - MODELLO GEOLOGICO

6.1 - INDAGINI IN SITU

L'area d'intervento è posta in quella parte del territorio comunale di Aulla, ormai ampiamente indagata e conosciuta nei suoi tratti generali sia da un punto di vista geologico che geotecnico.

Pertanto, oltre ad un rilevamento geomorfologico dell'area edificatoria e del suo intorno, per la caratterizzazione litostratigrafica è stata realizzata una campagna di indagini geognostiche consistente in n.1 sondaggio a carotaggio continuo con n.7 prove penetrometriche dinamiche (SPT) eseguite in foro e n.5 prove penetrometriche, di cui n.1 statica (CPT) e n.4 dinamiche superpesanti (DPSH).

Per parametrizzare dal punto di vista dinamico i terreni di fondazione e per la determinazione della categoria di sottosuolo, così come richiesto dalle NTC 2018, sono state realizzate n.1 prospezione sismica in foro di tipo DOWN-HOLE, n.1 stendimento di sismica a rifrazione acquisito con onde P ed SH e n.1 profilo sismico acquisito con metodologia MASW.

L'opera in progetto presenta una volumetria compresa tra 150 e 1500m³, ma anziché ricadere in classe di indagine 2 in base alla sola volumetria, risulta ascrivibile alla classe superiore (classe di indagine 3) dal momento che la struttura in progetto assume carattere strategico e rilevante, secondo quanto definito nel D.P.G.R.T. n.1/R.

Infatti, come riportato nel Paragrafo n.3 p.to 2 del regolamento esplicativo di tale legge, *“le opere da realizzare nelle classi di pericolosità geomorfologia molto elevata (G4) di cui all'allegato A del D.P.G.R. 5/R/2020 e le opere di carattere strategico e rilevante (classi d'uso III e IV) ricadono nella classe d'indagine superiore a quella individuata in base al volume o all'altezza ai sensi del punto 1”*.

Di seguito si riporta un breve estratto del p.to 1.3 del paragrafo 3 *“Classi di indagine geologiche, geofisiche e geotecniche”*, relativo all classe di indagine 3:

(...)

1.3. Classe d'indagine 3, riferita alle opere di volume totale inferiore a 6000 metri cubi e altezza in gronda inferiore a 20 metri. Nell'ambito di tale classe, sono effettuate le seguenti indagini:

a) Per la determinazione dell'azione sismica una campagna d'indagine sismica di superficie, ai sensi di quanto definito al paragrafo 2, punto 2, lettera b);

b) Per la parametrizzazione del volume geotecnico significativo, ai sensi di quanto definito al paragrafo 2, punto 2, lettere a) e c), almeno 2 verticali di indagine di cui una è rappresentata da un sondaggio geognostico a carotaggio continuo dotata di piezometro per la misura della falda e con prelievo di campione/i indisturbato/i su cui realizzare idonee prove sulle terre e sulle rocce presso laboratori compresi nell'elenco di cui al servizio tecnico centrale del Consiglio superiore dei lavori pubblici. Nel caso in cui la litologia non permetta di prelevare campioni indisturbati, sono eseguite almeno prove penetrometriche in foro di tipo SPT. In presenza di problematiche di versante sono altresì prodotte verifiche di stabilità del pendio e del complesso opera-pendio.

(...)

Le indagini geognostiche, la cui ubicazione è riportata nelle tavole n.3.1 e n.3.2, sono state quindi eseguite conformemente alla normativa vigente.

Sulla base delle informazioni stratigrafiche dedotte è stata ricostruita la sezione geologico-tecnica interpretativa A-A' (vd. tav. n.4).

6.2 - INDAGINI SISMICHE

6.2.1 - Prospezione sismica in foro tipo DOWN-HOLE

La prospezione sismica DH è stata eseguita EnGeo Progetti S.r.l. all'interno del foro del sondaggio a carotaggio continuo; sono state eseguite registrazioni in onde P ed SH, partendo progressivamente dal basso verso l'alto, con innalzamenti costanti pari ad 1m (vd. fig. n.12, tavv. n.3.1 e 3.2).



Figura n.12 - Fasi dell'esecuzione della Down-Hole DH; in particolare è possibile mettere in evidenza i sistemi di energizzazione sia delle onde P che delle onde S.

Lo studio delle dromocrone, ottenute diagrammando per ogni energizzazione i tempi di arrivo ai singoli geofoni (corretti in funzione della profondità), ha permesso di individuare n.2 rifrattori, per cui è stato possibile distinguere n.3 terreni a diversa risposta sismica.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione specialistica redatta dalla EnGeo Progetti S.r.l. esecutrice dell'indagine (vd. all. n.2).

Il profilo sismico verticale ricavato, espresso in termini di spessori e velocità delle onde di volume e di taglio per ciascun sismostrato, viene schematizzato nella tabella e nell'immagine successive (vd. tab. n.1 e fig. n.13).

	H (m)	γ (t/m ³)	V _s (m/s)	V _P (m/s)	ν	G	T _P (msec)	T _S (msec)
Sismostrato 1	0.0 ÷ 3.98	1.94	226.01	505.08	0.37	99.53	7.88	17.61
Sismostrato 2	3.98 ÷ 10.0	2.08	358.76	1289.08	0.46	268.50	12.55	34.39
Sismostrato 3	10.0 ÷ 15.0	2.33	818.33	2472.19	0.44	1560.55	14.64	40.5

Dove: **H** = spessore del sismostrato; γ = peso di volume naturale indicativo; **V_s** = velocità delle onde di tipo S; **V_P** = velocità delle onde di tipo P; ν = modulo di Poisson; **G** = modulo di taglio; **T_P** = tempo cumulativo dei diversi intervalli con la profondità riferito alle onde P; **T_S** = tempo cumulativo dei diversi intervalli con la profondità riferito alle onde S

Tabella n.1 - Sintesi risultati indagine Down-Hole DH.

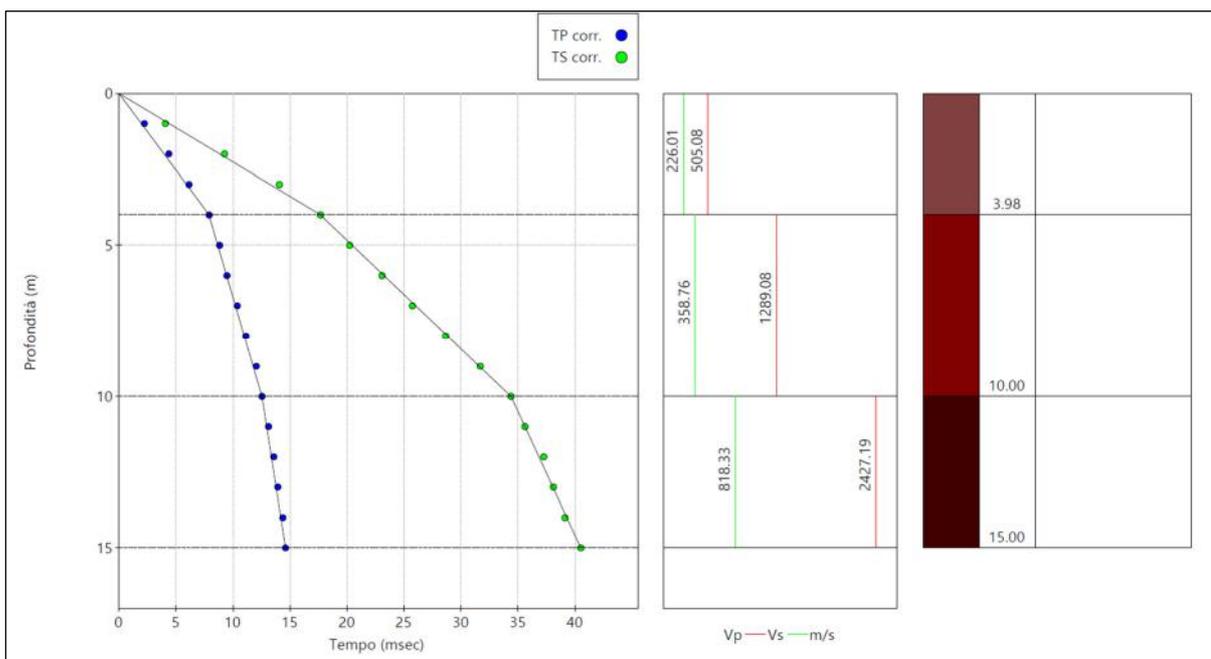


Figura n.13 - Dromocrone e log sismostratigrafico Down-Hole DH.

Dall'analisi dei dati riportati nella tabella precedente, si osserva un aumento delle velocità delle onde sismiche (sia P che S) nei tre sismostrati individuati con l'aumentare della profondità.

6.2.2 - Prospezione sismica a rifrazione con onde P e SH

Il profilo sismico denominato "SR" è stato realizzato dalla EnGEo Progetti S.r.l. in corrispondenza dell'area oggetto di interventi edilizi ed è stato tracciato circa parallelamente alle curve di livello (vd. all. n.2, tavv. n.3.1 e n.3.2).

Il profilo sismico in oggetto, acquisito sia con onde P che con onde SH, è stato realizzato utilizzando n.24 geofoni (rispettivamente verticali e orizzontali) con distanza intergeofonica di 3.0m variabile in funzione della morfologia del sito, per una lunghezza complessiva, compresi i colpi agli estremi, di 72.0m.

Lungo il profilo sono state eseguite n.7 energizzazioni, di cui n.2 alle estremità dell'allineamento, n.3 internamente n.2 esternamente; in questo modo è stato possibile ottenere una ricostruzione piuttosto dettagliata della situazione stratigrafica presente nell'area di studio.

Le energizzazioni esterne allo stendimento, necessarie per ottenere informazioni a maggiore profondità, sono state realizzate a circa 16.5m dal geofono n.1 e a circa 15.0m dal geofono n.24.

Lo studio delle dromocrone ottenute diagrammando, per ogni energizzazione, i tempi di arrivo ai singoli geofoni, ha permesso di individuare con entrambe le acquisizioni n.1 rifrattore, per cui è stato possibile distinguere n.2 terreni a diversa risposta sismica (vd. all. n.2).

In particolare, per l'acquisizione con onde P (vd. figg. n.14, n.15):

- **Sismostrato 1:** orizzonte di spessore compreso entro il range 7.5m ÷ 9.2m, con velocità delle onde sismiche variabili tra la parte iniziale ($V_P=500\text{m/s}$) e la parte finale dello stendimento ($V_P=590\text{m/s}$), con velocità media pari a $V_P=555.13\text{m/s}$;
- **Sismostrato 2:** orizzonte con tetto posto a profondità compresa tra 7.5m a 9.2m dal p.c., con velocità delle onde sismiche variabili tra la parte iniziale ($V_P=2500\text{m/s}$) e la parte finale dello stendimento ($V_P=2655\text{m/s}$), con velocità media pari a $V_P=2584.63\text{m/s}$.

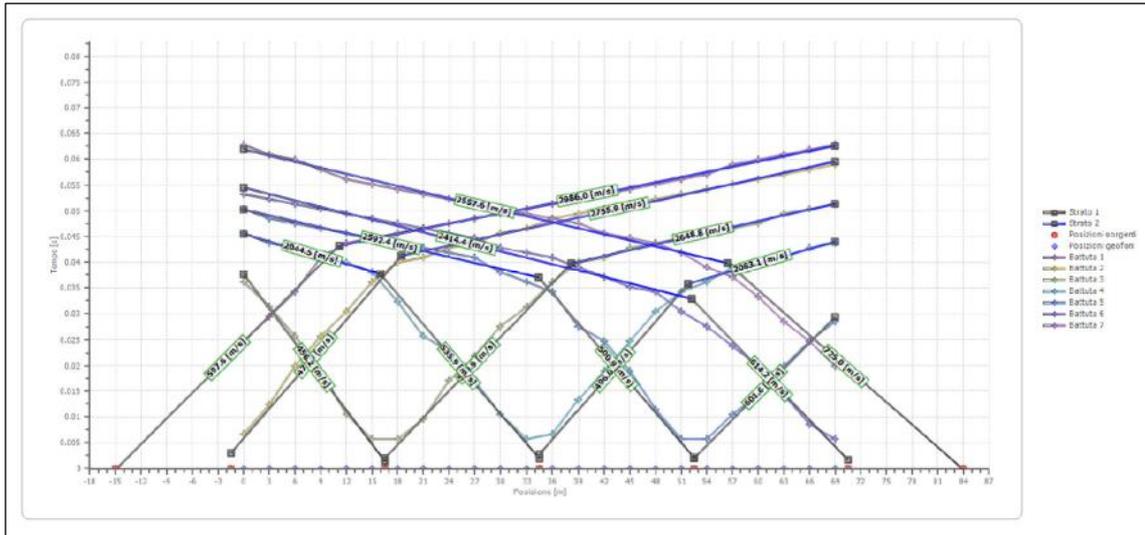


Figura n.14 - Dromocrona della sezione sismica "SR" (onde P), ottenuta utilizzando i dati del rilevamento topografico di campagna, in cui sono evidenziate le posizioni dei singoli geofoni e le velocità medie dei terreni attraversati.

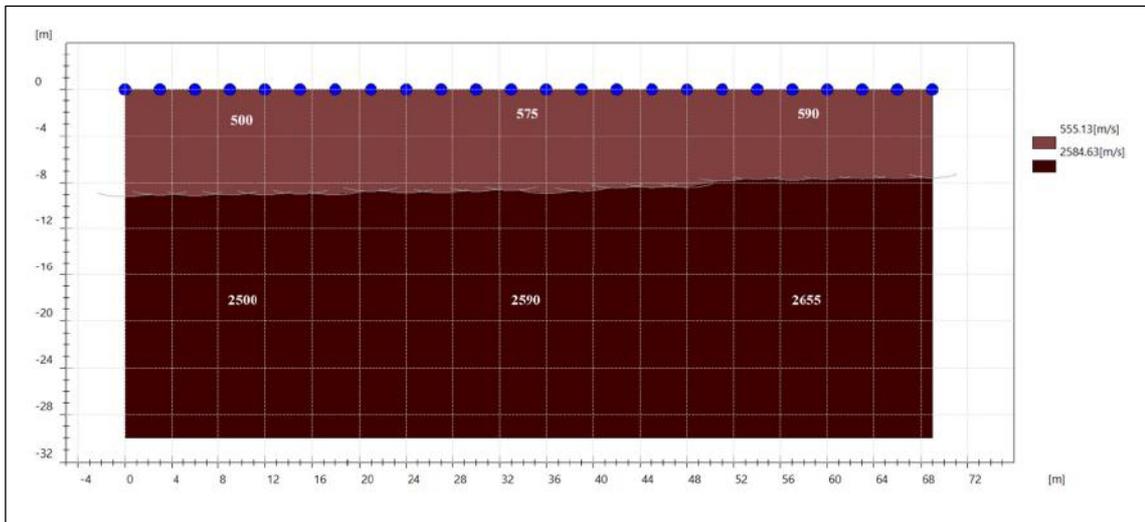


Figura n.15 - Immagine relativa alla sezione sismica-interpretativa "SR" (onde P), in cui sono evidenziate gli spessori degli orizzonti individuati e le velocità medie dei terreni attraversati.

Invece, per l'acquisizione con onde SH (vd. figg. n.16, n.17):

- **Sismostrato 1:** orizzonte di spessore compreso entro il range 6.6m ÷ 8.4m, con velocità delle onde sismiche variabili tra la parte iniziale ($V_{SH}=290\text{m/s}$) e la parte finale dello stendimento ($V_{SH}=335\text{m/s}$), con velocità media pari a $V_{SH}=309.21\text{m/s}$;
- **Sismostrato 2:** orizzonte con tetto posto a profondità compresa tra 6.6m a 8.4m dal p.c., con velocità delle onde sismiche variabili tra la parte iniziale ($V_{SH}=950\text{m/s}$) e la parte finale dello stendimento ($V_{SH}=1075\text{m/s}$), con velocità media pari a $V_{SH}=1003.15\text{m/s}$.

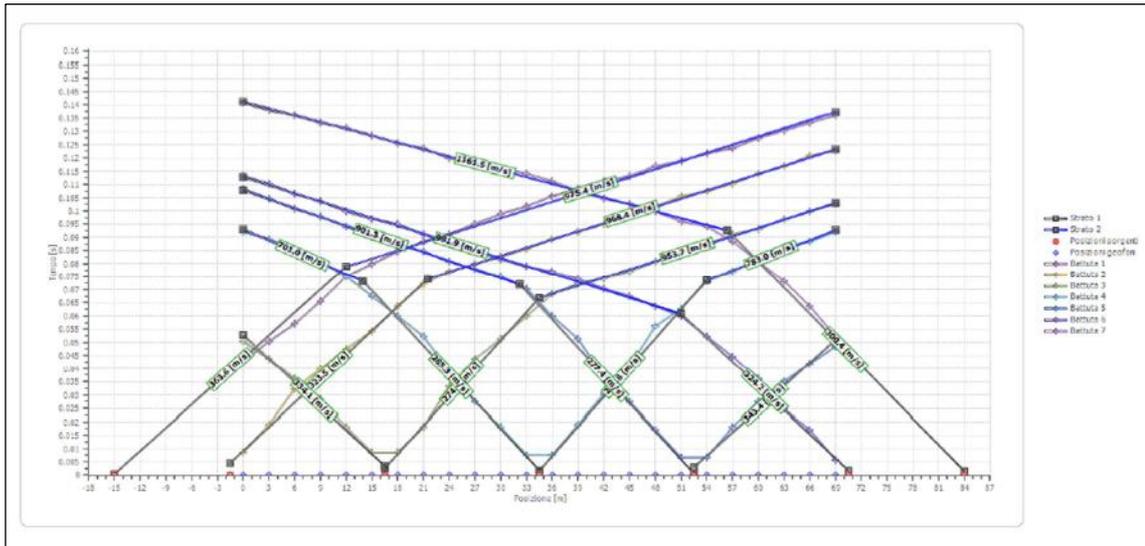


Figura n.16 - Dromocrone della sezione sismica "SR" (onde SH), ottenuta utilizzando i dati del rilevamento topografico di campagna, in cui sono evidenziate le posizioni dei singoli geofoni e le velocità medie dei terreni attraversati.

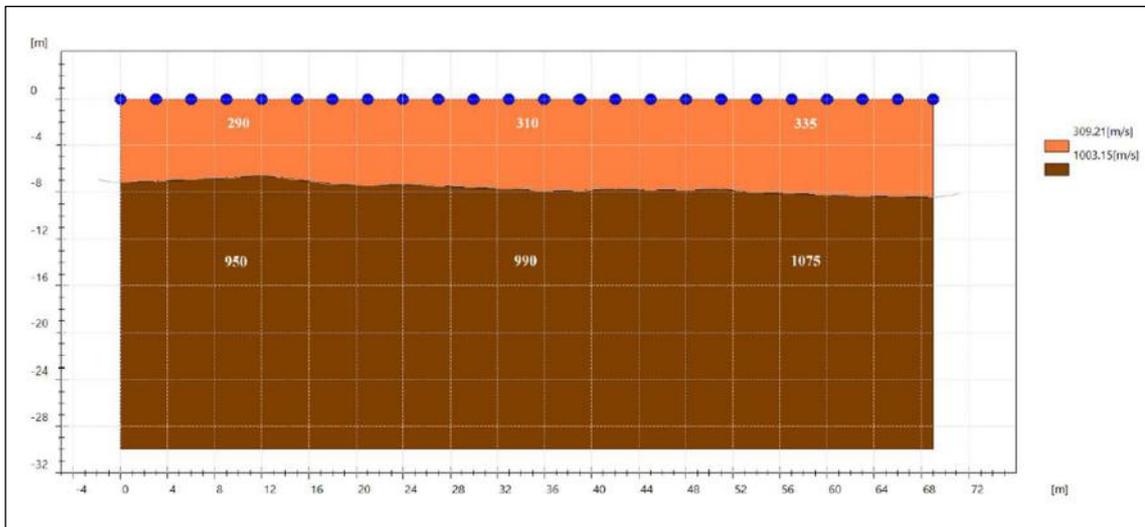


Figura n.17 - Immagine relativa alla sezione sismica-interpretativa "SR" (onde SH), in cui sono evidenziate gli spessori degli orizzonti individuati e le velocità medie dei terreni attraversati.

6.2.3 - Prospezione sismica con metodologia MASW

Il profilo sismico MASW è stato eseguito dalla EnGeo Progetto S.r.l. (vd. all. n.2, tavv. n.3.1 e n.3.2). Il profilo sismico di tipo MASW è stato realizzato in corrispondenza del sito oggetto di interventi edilizi, mediante un array composto da 24 geofoni verticali spazati di 2.5m, per una lunghezza complessiva dello stendimento di 57.5m.

Nel profilo sismico si evidenzia la presenza di sismostrati aventi velocità di propagazione crescente all'aumentare della profondità d'investigazione.

Il profilo sismico verticale ricavato, espresso in termini di spessori e velocità delle onde di taglio per ciascun sismostrato, con riferimento al modello medio, è riassunto nello schema sottostante (vd. fig. n.18):

Spessore (m)	Velocità Vs (m/s)
3.0	294.0
7.5	354.0
13.5	394.0
21.0	812.0
30.0	842.0

Figura n.18 - Schema riassuntivo del profilo MASW "MW".

La curva di dispersione ed il sismogramma sperimentale nonché la relativa sezione elaborata sono mostrate nell'immagine seguente (vd. fig.n.19).

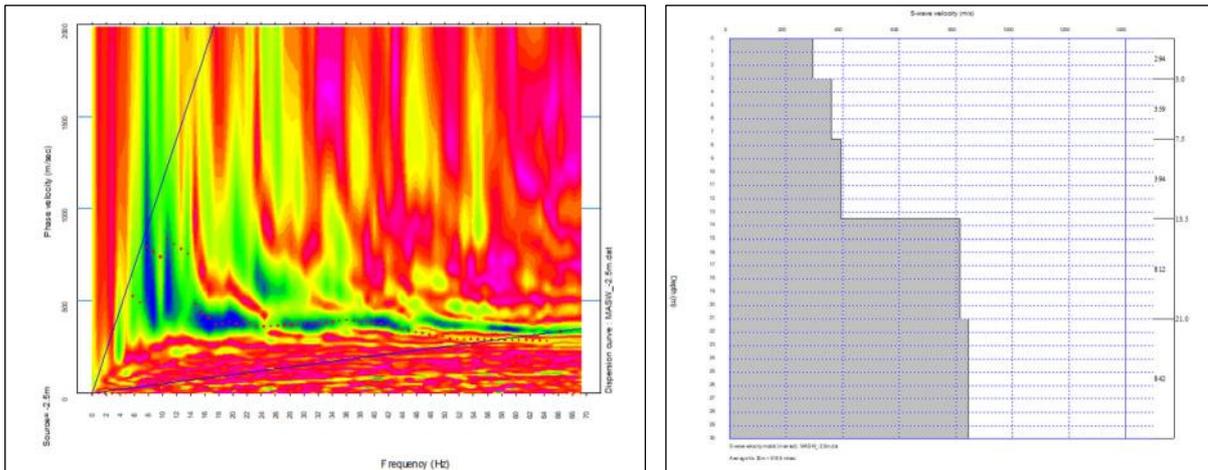


Figura n.19 - Spettro di velocità, curve di dispersione, modello e profilo verticale di Vs (a sx); modello di velocità medio in cui sono riportati Vs (m/s) e spessore (m) (a dx).

Per una maggiore comprensione di quanto sopra descritto, si rimanda alla visione dell'allegato n.2.

6.4 - SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Il sondaggio geognostico denominato SCC1 è stato eseguito in corrispondenza della porzione del lotto in cui verrà realizzata la struttura in progetto in data 27/08/2024 dalla Società Ecocantieri S.r.l., con attrezzatura mobile a rotazione con carotaggio continuo.

Per il sondaggio è stato utilizzato un carotiere semplice (Ø 101mm) e tubazione di rivestimento provvisorio (Ø 127mm esterno, Ø 111mm interno), che ha consentito di campionare carote di diametro pari a circa 80mm. La stabilizzazione del foro è stata ottenuta mediante un rivestimento metallico provvisorio infisso a rotazione con circolazione di fluido costituito da una miscela d'acqua.

Le manovre di estrazione dell'attrezzo di perforazione, campionamento, ecc, sono state eseguite a velocità ridotta per minimizzare "l'effetto pistone".

I campioni estratti sono stati sistemati in cassette catalogatrici recanti l'indicazione del cantiere e i riferimenti del sondaggio e delle quote; i campioni di terreno sono stati scorticati nelle parti visibili per metterne in evidenza la struttura e la composizione.

Contestualmente all'esecuzione del sondaggio a carotaggio continuo sono state realizzate n.7 prove SPT in foro.

In Allegato n.3 vengono riportati i risultati ottenuti dal sondaggio attraverso la rappresentazione grafica della colonna stratigrafica, la relativa descrizione dei terreni attraversati e le quote di esecuzione delle prove SPT a fondo foro.



Figura n.20 - Fasi di esecuzione del sondaggio SCC1 realizzato in corrispondenza dell'area in cui verrà realizzata la struttura in progetto.

Di seguito viene riportata la geometria, la posizione e i tempi di esecuzione (vd. tabb. n.2, 3).

Sondaggio	Coordinate Geografiche Gauss Boaga	
	Lat.	Long.
SCC1	1577992.717	4896854.604

Tabella n.2 - Coordinate geografiche del punto del sondaggio a carotaggio continuo.

Sondaggio	Profondità (m)	Carotaggio continuo (m)	Posizionamento cantiere	Esecuzione sondaggio
SCC1	15.0	0.0 ÷ 15.0	27/08/2024	27/08/2024

Tabella n.3 - Sintesi geometria e tempi di esecuzione del sondaggio.

Il sondaggio è stato eseguito internamente al parcheggio antistante la stazione ferroviaria di Aulla, circa in corrispondenza della porzione in cui sono previsti gli interventi edilizi in progetto (vd. tavv. n.3.1, 3.2), partendo dal piano campagna (quota posta a ca. 72.9m s.l.m.).

Cercando di semplificare il quadro stratigrafico desunto dal sondaggio a carotaggio continuo ed accorpare le sequenze per facies simile, può essere schematizzata e riassunta la seguente situazione litologica (vd. tab.4):

UNITA' STRATIGRAFICA PRINCIPALE	m dal p.c.	DESCRIZIONE QUALITATIVA
A - Terreno di riporto	0.0 ÷ 0.35	Pavimentazione stradale + soletta in c.a.
	0.35 ÷ 3.15	Limo sabbioso e argilloso di colore beige con rari elementi litici poligenici, eterometrici e arrotondati / spigolosi (diametro massimo 1 / 2cm)
	3.15 ÷ 6.0	Sabbia limosa argillosa di colore grigio con rari elementi litici poligenici, eterometrici e arrotondati / spigolosi (diametro massimo 1 / 2cm)
B - Deposito alluvionale attivo e inattivo (GM)	6.0 ÷ 8.0	Ghiaia poligenica (elementi arrotondati di diametro massimo 2 / 3 cm) in matrice limo sabbiosa e argillosa di colore grigio scuro, matrice sostenuta.
C - Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio lacustri (Fm_VILc)	8.0 ÷ 15.0	Argilla compatta, con caratteristiche litoidi di colore grigio, variabile da chiaro a scuro

Tabella n.4 - Sintesi stratigrafica sondaggio a carotaggio continuo SCC1.

6.5 - SPT IN FORO

Durante la perforazione sono state eseguite n.7 prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test) con punta conica a fondo foro, condotte secondo quanto previsto nelle norme ASTM 1586/68 "Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soil" e nelle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" dell'Associazione Geotecnica Italiana. L'attrezzatura usata, secondo lo standard internazionale, costituita presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

Punta conica chiusa	
Diametro esterno	Ø=51mm
Angolo di apertura	60°
Peso maglio e dispositivo di sgancio	63.5 kg a sgancio automatico
Altezza di caduta libera	76.2 cm

La prova STANDARD PENETRATION TEST consiste nel far cadere un maglio da 63.5kg da un'altezza di 76.2cm su una batteria di aste che possiedono nella parte terminale un campionatore cilindrico.

In ragione della natura dei terreni attraversati il campionatore cilindrico è stato sostituito con una punta conica chiusa avente angolo di 60° e diametro esterno di 51 mm (SCPT).

La prova consiste nel far penetrare il campionatore o la punta conica, calato/a a fondo foro, per n.3 tratti consecutivi di 15 cm, registrando ogni volta il numero di colpi (N₁, N₂ e N₃).

Con il primo tratto, detto di "avviamento", si intende superare la zona di terreno rimaneggiato in fase di perforazione.

Nel caso di un terreno molto compatto con N₁ ≥ 50 ed avanzamento minore di 15cm, l'infissione deve essere sospesa; la prova è dichiarata conclusa in base alle raccomandazioni AGI 1977 e si annota la relativa penetrazione.

Se il tratto di avviamento viene superato si conteggiano N₂ e N₃ (da 0.15 a 0.30 e da 0.30 a 0.45 m) fino ad un limite complessivo di n.100 colpi (N₂ + N₃) raggiunto il quale si sospende la prova annotando l'avanzamento ottenuto.

Pertanto, il parametro caratteristico della prova, prescindendo dai casi particolari di rifiuto, è:

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

esprime il numero di colpi per 30cm utili di penetrazione.

Nella seguente tabella sono riassunte le profondità alle quali sono state eseguite le prove e il numero di colpi N_1 , N_2 e N_3 , nonché il risultato della normalizzazione del coefficiente correttivo, mutuato alle locali condizioni al contorno.

Sondaggio	n° prova S.P.T. e profondità dal p.c.	N_1	N_2	N_3	$N_{spt} = N_2 + N_3$
SCC1	SPT1 1.5 ÷ 1.95m	15	37	11	48
	SPT2 3.0 ÷ 3.45m	2	2	3	5
	SPT3 4.5 ÷ 4.95m	3	3	5	8
	SPT4 6.0 ÷ 6.45m	16	15	19	34
	SPT5 7.5 ÷ 7.95m	18	25	27	52
	SPT6 10.5 ÷ 10.95m	25	RIFIUTO		
	SPT7 13.5 ÷ 13.95m	RIFIUTO			

In questo modo i principali parametri geotecnici dei terreni attraversati possono essere ricavati utilizzando la vasta letteratura esistente per la prova SPT, confrontati con quelli desunti dall'elaborazione della prova penetrometrica statica e delle prove penetrometriche dinamiche superpesanti; la classificazione del grado di consistenza / addensamento degli orizzonti stratigrafici indagati in base alle norme A.G.I. sarà definita all'interno dei paragrafi successivi.

6.6 - INDAGINI PENETROMETRICHE

6.6.1 - Prova penetrometrica statica (CPT)

Per ricostruire il modello fisico-meccanico dei terreni in oggetto e suddividerli in orizzonti omogenei aventi le caratteristiche conferitegli in natura, ovvero consistenza o grado di addensamento, è stata realizzata dalla Geognostica Apuana S.r.l. n.1 prova penetrometrica statica, utilizzando un penetrometro statico-dinamico PAGANI TG 63/100 KN avente le seguenti caratteristiche:

Spinta d'infissione	=	100	KN
Diametro delle aste	=	3.6	cm
Area della punta (Begemann)	=	10	cm ²
Angolo di apertura della punta	=	60	°

La prova, la cui ubicazione viene riportata nelle tavole n.3.1 e n.3.2, è stata eseguita in corrispondenza dell'area oggetto di interventi edilizi, sul margine dell'area parcheggio per garantire l'ancoraggio dello strumento vista la presenza della soletta in c.a..

La prova è stata eseguita partendo dal piano campagna fino a raggiungere una profondità sufficiente per la determinazione della capacità portante del terreno e per il calcolo di eventuali cedimenti (vd. fig. n.21).



Figura n.21 - Fasi di esecuzione della prova penetrometrica statica CPT1.

In particolare, la prova penetrometrica denominata CPT1 è stata eseguita in un'area in cui risultasse accertata l'assenza di sottoservizi ed è stata spinta fino alla profondità di 2.6 m dal p.c., dove si è registrato il rifiuto all'avanzamento. Il test penetrometrico è stato quindi approfondito in modalità dinamica fino alla profondità di 11.4m (si rimanda alla descrizione della prova penetrometrica dinamica DIN1 al paragrafo successivo).

La prova penetrometrica statica è stata realizzata allo scopo di verificare la natura e di valutare i parametri geotecnici e le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni attraversati.

La prova penetrometrica statica consiste nell'infissione nel terreno di una punta di tipo meccanico (tipo Begeman), tramite una batteria di aste.

L'infissione avviene a pressione e velocità costanti, le quali risultano per lo strumento utilizzato rispettivamente pari a 10t e 2cm/s.

Durante la prova si registrano le seguenti letture ogni 20cm di avanzamento:

- lettura di punta;
- lettura laterale.

Relativamente alla prova eseguita si allega una tabella dove sono riportate le letture di campagna ed i valori di resistenza (q_c = resistenza di punta, f_s = resistenza laterale e q_c/f_s = rapporto Begemann), ed un grafico che riporta il diagramma di resistenza (vd. all. n.1).

6.6.2 - Prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH)

Al fine di ottenere un modello fisico meccanico più dettagliato dei terreni oggetto di studio, sono state eseguite anche n.4 penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH), tutte realizzate utilizzando un penetrometro statico-dinamico PAGANI TG 63/100 KN avente le seguenti caratteristiche:

Configurazione penetrometro dinamico:

Peso del maglio	63.5	Kg
Altezza di caduta	75	cm
Area sezione punta conica	20	cm ²
Angolo di apertura della punta	60	°

In termini generali, la prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere verticalmente nel terreno una punta conica metallica posta all'estremità di un'asta d'acciaio, prolungabile con l'aggiunta di aste successive, facendo cadere sulle stesse un maglio di peso noto, da un'altezza costante.

La resistenza del terreno viene valutata contando il numero dei colpi necessari all'infissione di 20cm di aste e, successivamente, convertendo tali valori in resistenza dinamica di punta (Rpd) espressa in kg/cm². Alla presente relazione è allegata una tabella che riporta il numero di colpi ed i valori di resistenza dinamica ogni 20cm di affondamento e due diagrammi che mostrano, rispettivamente, l'andamento in funzione della profondità del numero di colpi della punta (N_P) e della resistenza dinamica di punta (Rpd). Per correlare il numero dei colpi N_P rilevato in campagna con il numero di colpi NSPT della Standard Penetration Test, è conveniente normalizzare i valori NP misurati rispetto alla tensione verticale efficace, in modo da ottenere il valore di N₁, ovvero quello che corrisponde a una σ'_{v0} di 1bar = 98.1KPa ed inoltre è necessario normalizzare i valori di N_P per un opportuno coefficiente che tiene conto del rendimento energetico del sistema di battitura, determinando (N₁)₆₀.

Le suddette normalizzazioni sono state effettuate utilizzando la seguente espressione:

$$(N_1)_{60} = N_P \times C_N \times \beta$$

Dove N_P è il valore misurato, C_N è il coefficiente che normalizza il valore misurato alla pressione verticale efficace di 1bar e pari a (98.1/ σ'_{v0}) 0.5, e β è il coefficiente correttivo del rendimento energetico, pari a 1.489 per lo strumento in oggetto.

In questo modo i principali parametri geotecnici dei terreni attraversati possono essere ricavati utilizzando la vasta letteratura esistente per la prova SPT.

Nel dettaglio, le prove penetrometriche sono state realizzate laddove fosse accertata l'assenza di sottoservizi dalla società Geognostica Apuana Srl di Massa in data 05/11/2024 (vd. All. n.1) e dalla società EnGeo Progetti in data 30/10/2024 (vd. All. n.2), tutte in corrispondenza dell'area oggetto di intervento. Per consentire l'esecuzione delle prove penetrometriche è stato necessario eseguire dei prefiori, realizzati con la sonda utilizzata per l'esecuzione del sondaggio a carotaggio continuo, al fine di attraversare la pavimentazione stradale + soletta in c.a..

Le prove sono ubicate come evidenziato nelle tavole n.3.1 e n.3.2.

La prova denominata DIN1 (eseguita dalla Geognostica Apuana S.r.l.) è stata realizzata in approfondimento alla prova penetrometrica statica descritta nel paragrafo precedente ed è stata spinta fino alla profondità di 11.4m dal piano di campagna.

La prova DIN2 (eseguita sempre dalla Geognostica Apuana S.r.l.) è stata invece spinta fino alla profondità di 7.4m dal p.c. (vd. fig. n.22, all. n.1).



Figura n.22 - Fasi di esecuzione delle prove penetrometriche dinamiche superpesanti DIN1 (a sx) e DIN2 (a dx).

Le prove dinamiche realizzate dalla EnGEo Progetti S.r.l. sono state denominate DPSH1 e DPSH2 (vd. all. n.2).

In particolare, nel primo caso il è stato registrato il rifiuto strumentale alla profondità di 0.4m dal p.c., dovuto probabilmente alla chiusura del preforo; nel secondo caso il test penetrometrico è stato realizzato in corrispondenza del margine dell'area parcheggio al fine di evitare la soletta in c.a. ed è stato spinto fino alla profondità di 7.4m del piano di campagna.

Per tale motivo in tutte le considerazioni successive la prova DPSH1, comunque riportata in allegato 2, non verrà presa in considerazione (vd. fig. n.23).



Figura n.23 - Fasi di esecuzione della prova penetrometrica dinamica superpesante DPSH2.

6.7 - CARATTERIZZAZIONE LITOSTRATIGRAFICA

L'andamento dei test penetrometrici e l'analisi dei grafici, unitamente alle conoscenze geologiche generali dell'area, hanno permesso di individuare una situazione caratterizzata dalla presenza di terreni a diverso grado di consistenza / addensamento (classificazione secondo le norme A.G.I.).

A livello stratigrafico si mette in evidenza la presenza di una soletta in calcestruzzo armata di spessore pari a 20 – 25cm presente al di sotto dell'area a parcheggio attuale, collocata ad una profondità di ca. 15/20cm dal piano campagna.

In particolare, la situazione litostratigrafica può essere di seguito schematizzata e riassunta:

UNITA' STRATIGRAFICA PRINCIPALE	SOTTO UNITA'	DESCRIZIONE QUALITATIVA
A - Terreno di riporto antropico	A₁	Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente"
	A₂	Sabbia limosa con elementi di ghiaia "poco addensata"
B - Deposito alluvionale attivo e inattivo (GM)	B₁	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata"
	B₂	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata"
C - Substrato roccioso (Fm_Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio - lacustri VILc)	--	Argille lacustri da fratturate a compatte

Nelle tabelle seguenti vengono riportati gli orizzonti ricostruiti e lo stato di consistenza / addensamento in termini di q_c e di q_c/f_s ed in termini delle resistenze dinamiche (range N_{SPT}), definiti sulla base delle indagini penetrometriche eseguite (vd. all. n.1).

CPT1			
m dal p.c.	q_c (Kg/cm ²)	q_c/f_s (Kg/cm ²)	Unità Stratigrafica
0.0 ÷ 2.6	28.0	32.0	Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente" (Sotto unità A ₁)

DIN1		
m dal p.c.	N_{SPT}	Unità Stratigrafica
2.6 ÷ 4.0	2	Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente" (Sotto unità A ₁)
4.0 ÷ 5.8	5	Sabbia limosa con elementi di ghiaia "poco addensata" (Sotto unità A ₂)
5.8 ÷ 9.8	13	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata" (Sotto unità B ₁)
9.8 ÷ 11.2	24	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata" (Sotto unità B ₂)
11.0 ÷ 11.4	48	Argille lacustri da fratturate a compatte" (Unità C)

DIN2		
m dal p.c.	N _{SPT}	Unità Stratigrafica
0.0 ÷ 3.6	5	Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente" (Sotto unità A ₁)
3.6 ÷ 6.0	7	Sabbia limosa con elementi di ghiaia "poco addensata" (Sotto unità A ₂)
6.0 ÷ 7.4	22	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata" (Sotto unità B ₁)

DPSH2		
m dal p.c.	N _{SPT}	Unità Stratigrafica
0.0 ÷ 4.0	4	Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente" (Sotto unità A ₁)
4.0 ÷ 5.8	6	Sabbia limosa con elementi di ghiaia "poco addensata" (Sotto unità A ₂)
5.8 ÷ 7.4	11	Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata" (Sotto unità B ₁)

Con quanto ottenuto dall'elaborazione delle prove penetrometriche è stato possibile ricostruire la sezione geologico-tecnica interpretativa A-A' (vd. tav. n.4).

6.8 - LIVELLO DI FALDA

Nei giorni dell'esecuzione delle indagini geognostiche, dall'ispezione visiva delle aste recuperate dai fori dei test penetrometrici e del sondaggio a carotaggio continuo, non è stata riscontrata la presenza di acqua, ma solo umidità a fondo foro da parte degli scriventi.

Nel rapporto della prova penetrometrica denominata DPSH 2 è segnalata la presenza di falda a ca. 1.6m di profondità dal piano campagna, ma il dato rilevato non trova riscontro con l'assetto stratigrafico-idrogeologico del sito, né con tutte le altre indagini condotte, tenuto conto peraltro che la quota originaria del piano campagna nel sito in esame si trovava, prima dei lavori di riporto antropico, a ca. 6m più bassa rispetto a quella attuale.

È presumibile comunque che durante periodi di intensa piovosità, possa verificarsi una circolazione idrica all'interno dei livelletti più marcatamente grossolani del terreno di riporto, all'interno dei depositi alluvionali, al contatto tra la i depositi alluvionali ed il substrato roccioso e più probabilmente all'interno delle fratture dell'orizzonte più superficiale di quest'ultimo.

6.9 - CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Di seguito sono riassunte le principali caratteristiche geotecniche dei litotipi individuati con le indagini geognostiche eseguite nel sito in esame, al fine di ottenere una caratterizzazione geotecnica del terreno di riporto e del deposito alluvionale, mentre quella geomeccanica del substrato roccioso è stata desunta utilizzando il criterio di rottura empirico di Hoek-Brown.

Si ricorda che, sulla base dei risultati delle prove penetrometriche in foro realizzate (si è registrato il rifiuto della prova in ben n.2 occasioni), della prova penetrometrica DIN1 e della velocità delle onde sismiche registrate nelle diverse indagini eseguite ($V_{SH} > 800\text{m/s}$), oltre che dalla visione diretta delle cassette

catalogatrici del sondaggio a carotaggio continuo, le argille riconducibili alla Formazione "Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio - lacustri VII_C" presentano un comportamento marcatamente litoide; pertanto, l'Unità C verrà caratterizzata come un substrato roccioso.

Unità A - Terreno di riporto

Sotto unità A₁

(Limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia da "poco consistente" a "moderatamente consistente")

PARAMETRI FISICO-MECCANICI MEDI											
γ_u (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ϕ (°)	c_u (Kg/cm ²)	E_d (kg/cm ²)	m_v (cm ² /kg)	ν	V_{SH} (m/s)	V_P (m/s)	G_{din} (kg/cm ²)	E_{din} (kg/cm ²)	E_{stat} (kg/cm ²)
1.80	1.90	27.0	0.1	40.0	0.0250	0.37	226.0	505.0	1277.0	3511.0	147.0

Dove: γ_u = peso di volume naturale indicativo; γ_{sat} = peso di volume in condizione di saturazione indicativo; ϕ = valore nominale dell'angolo di attrito efficace; c_u = valore della coesione non drenata; E_d = valore nominale del modulo edometrico per le prove dinamiche; m_v = coefficiente di compressibilità volumetrica; ν = coefficiente di Poisson; V_{SH} = valore delle onde SH da prova sismica in foro; V_P = valore delle onde P da prova sismica in foro; G_{din} = valore del modulo di taglio; E_{din} = valore del modulo elastico dinamico; E_{stat} = valore del modulo elastico statico.

Sotto unità A₂

(Sabbia limosa con elementi di ghiaia "poco addensata")

PARAMETRI FISICO-MECCANICI MEDI											
γ_u (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ϕ (°)	D_R (%)	E_d (kg/cm ²)	m_v (cm ² /kg)	ν	V_{SH} (m/s)	V_P (m/s)	G_{din} (kg/cm ²)	E_{din} (kg/cm ²)	E_{stat} (kg/cm ²)
1.85	1.95	28.5	25.0	85.0	0.0117	0.46	359.0	1289.0	3222.0	9395.0	680.0

Dove: γ_u = peso di volume naturale indicativo; γ_{sat} = peso di volume in condizione di saturazione indicativo; ϕ = valore nominale dell'angolo di attrito efficace; D_R = valore della densità relativa; E_d = valore nominale del modulo edometrico per le prove dinamiche; m_v = coefficiente di compressibilità volumetrica; ν = coefficiente di Poisson; V_{SH} = valore delle onde SH da prova sismica in foro; V_P = valore delle onde P da prova sismica in foro; G_{din} = valore del modulo di taglio; E_{din} = valore del modulo elastico dinamico; E_{stat} = valore del modulo elastico statico.

Unità B - Deposito alluvionale attivo e inattivo (GM)

Sotto unità B₁

(Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata")

PARAMETRI FISICO-MECCANICI MEDI											
γ_u (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ϕ (°)	D_R (%)	E_d (kg/cm ²)	m_v (cm ² /kg)	ν	V_{SH} (m/s)	V_P (m/s)	G_{din} (kg/cm ²)	E_{din} (kg/cm ²)	E_{stat} (kg/cm ²)
1.90	2.00	31.5	42.5	180.0	0.0055	0.46	359.0	1289.0	3222.0	9395.0	680.0

Dove: γ_u = peso di volume naturale indicativo; γ_{sat} = peso di volume in condizione di saturazione indicativo; ϕ = valore nominale dell'angolo di attrito efficace; D_R = valore della densità relativa; E_d = valore nominale del modulo edometrico per le prove dinamiche; m_v = coefficiente di compressibilità volumetrica; ν = coefficiente di Poisson; V_{SH} = valore delle onde SH da prova sismica in foro; V_P = valore delle onde P da prova sismica in foro; G_{din} = valore del modulo di taglio; E_{din} = valore del modulo elastico dinamico; E_{stat} = valore del modulo elastico statico.

Sotto unità B₂

(Ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa "moderatamente addensata")

PARAMETRI FISICO-MECCANICI MEDI											
γ_u (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ϕ (°)	D_R (%)	E_d (kg/cm ²)	m_v (cm ² /kg)	ν	V_{SH} (m/s)	V_P (m/s)	G_{din} (kg/cm ²)	E_{din} (kg/cm ²)	E_{stat} (kg/cm ²)
1.90	2.00	34.0	56.0	290.0	0.0034	0.46	359.0	1289.0	3222.0	9395.0	680.0

Dove: γ_u = peso di volume naturale indicativo; γ_{sat} = peso di volume in condizione di saturazione indicativo; ϕ = valore nominale dell'angolo di attrito efficace; D_R = valore della densità relativa; E_d = valore nominale del modulo edometrico per le prove dinamiche; m_v = coefficiente di compressibilità volumetrica; ν = coefficiente di Poisson; V_{SH} = valore delle onde SH da prova sismica in foro; V_P = valore delle onde P da prova sismica in foro.

da prova sismica in foro; G_{din} = valore del modulo di taglio; E_{din} = valore del modulo elastico dinamico; E_{stat} = valore del modulo elastico statico.

Per la determinazione dei parametri geomeccanici del substrato roccioso compatto è stato utilizzato il criterio di rottura empirico di Hoek-Brown, considerando l'ammasso stesso come un mezzo continuo, omogeneo ed equivalente.

Tale criterio (empirico) appare in grado di soddisfare le seguenti condizioni ed è definito dalla seguente relazione (vd. eq. n.1):

- risulta essere formulato mediante una semplice equazione matematica basata su un modesto numero di parametri costitutivi.
- risulta in buon accordo con i valori di resistenza determinati con prove di laboratorio triassiali su campioni di roccia intatta (matrice rocciosa).
- risulta facilmente adattabile alla descrizione del comportamento di ammassi rocciosi sia di buona qualità ed elevata resistenza che di ammassi strutturalmente complessi e molto fratturati.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (eq. n.1)$$

Dove σ_1 e σ_3 sono rispettivamente la tensione principale massima e minima a rottura, σ_c il valore di resistenza a compressione monoassiale, m_b è un valore direttamente proporzionale alle caratteristiche di resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (m_i), mentre s , a e D sono dei parametri che dipendono dalle caratteristiche dell'ammasso.

I valori delle costanti caratteristiche della roccia (σ_c e m_i), in assenza di prove di laboratorio, possono essere desunti sulla base delle seguenti tabelle ottenute da una vasta raccolta di dati ottenuti in letteratura (vd. tabb. n.5, 6).

CLASSE [*]	DESCRIZIONE	RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE (MPa)	INDICE DI RESISTENZA (POINT LOAD) (MPa)	VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN SITO	ESEMPI
R6	Resistenza estremamente elevata	> 250	> 10	Un campione può essere scheggiato solamente con un martello geologico	Basalto intatto, silice, selce, diabase, gneiss granito, quarzite
R5	Resistenza molto elevata	100-250	4-10	Un campione richiede molti colpi di un martello geologico per essere fratturato	Anfibolite, arenaria basalto, gabbro, gneiss, granodiorite calcare, marna rolite, tufi
R4	Resistenza elevata	50-100	2-4	Un campione richiede più di un martello geologico per essere fratturato	Calcare, marna, fillite, arenaria, scisto, argillite
R3	Resistenza media	25-50	1-2	Non può essere raschiato o spellato con un coltellino, un campione può essere fratturato con un solo colpo mediante un martello geologico	Argillite, carbone, calcestruzzo, scisto, siltite
R2	Resistenza bassa	5-25	[**]	Con difficoltà può essere spellato con un coltellino, una intaccatura superficiale può essere procurata con un colpo inferto mediante la punta di un martello geologico	Calcare bianco, salgemma
R1	Resistenza molto bassa	1-5	[**]	Si frantuma per effetto di alcuni colpi con la punta di un martello geologico, può essere spellato mediante un coltellino	Rocce estremamente alterate o alterate
R0	Resistenza estremamente bassa	0.25-1	[**]	Intagliato con l'unghia di un pollice	Miloniti, cataclasi

[*] In accordo a Brown E.T. Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods, pp. 171-183. Oxford, Pergamon (1981).
 [] La prova meccanica point load su rocce con resistenza a compressione monoassiale inferiore a 25 MPa fornisce risultati poco attendibili.

Tabella n.5 - Valori della resistenza a compressione monoassiale (σ_c) per i diversi tipi di rocce.

TIPO DI ROCCIA	CLASSE	GRUPPO	TESSITURA			
			GROSSOLANA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARE	Clastiche		Conglomerato (22)	Arenaria 19	Siltite 9	Argillite 4
		Organogene		Grovacche (18)		
	Non clastiche	Carbonatiche	Breccia(20)	Calcare Sparitico (10)	Calcare Micritico 8	
		Chimiche		Gesso 16	Anidride 13	
METAMORFICHE	Non foliate		Marmo 9	Hornfels (19)	Quarzite 24	
	Leggermente foliate		Migmatite (30)	Anfibolite 25-31	Miloniti (6)	
	Foliate*		Gneiss 33	Scisti 4-8	Filliti (10)	Scisti argillosi 9
IGNEE	Chiare		Granito 33		Riolite (16)	Ossidiana (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
	Scure		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalto (17)	
			Nortite 22			
	Effusive piroclastiche		Agglomerato (20)	Breccia (18)	Tufo (15)	

Questi valori sono validi per campioni di roccia intatta portati a rottura applicando il carico normale alla stratificazione o scistosità. Il valore di m_i sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza

Tabella n.6 - Valori della costante mi per i diversi tipi di rocce.

L'entità dei parametri costitutivi (s , a , m_b) può essere definita mediante le seguenti relazioni sulla base di un indice empirico (GSI_ Geological Strenght Index) correlato alle caratteristiche strutturali dell'ammasso e ad altri indici noti nell'ambito della letteratura tecnica (RMR, RQD, ecc.), il quale può essere stimato a partire dalla seguente tabella (vd. tab. n.7).

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (eq. n.2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (eq. n.3)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (eq. n.4)$$

DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA		CONDIZIONI SUPERFICIALI		DIMENSIONE DELLA QUALITÀ SUPERFICIALE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	
<p>Sulla base dell'esperienza della roccia, scegliere la categoria che si pensa che si verifichi descrivendo delle condizioni "medie" dell'ammasso indichizzato presente in sito. Da notare che la superficie visibile della roccia ottenuta da una colata con esplosivo può dare una impressione fuorviante sulla qualità della roccia sottostante. Ciononostante, congegnare opportunamente la valutazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso per tenere in conto il rischio associato dalla scarsa conoscenza. A questo riguardo può essere utile l'insieme di carteggi ottenuti da perforazioni a campione continuo con corone diametrali e l'osservazione della superficie presa da uno scavo realizzato con tecniche di stabilimento continuo. È inoltre importante ricordare che il criterio di rottura di Hoek-Brown dovrebbe essere applicato come la dimensione del "volume critico" di ammasso roccioso molto piccola in confronto alle dimensioni dello scavo in considerazione.</p>		<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>MOLTO BUONE Superfici molto lische, sane, con alterità.</p> <p>BUONE Superfici lische, leggermente alterate, sciolite.</p> <p>DEGRADATE Superfici lische, moderatamente alterate.</p> <p>SCALDATE Superfici di taglio, liscie (salsolucide), compatte e sciolite da fratture in argine.</p> <p>MOLTO SCALDATE Superficie di taglio liscia (salsolucide), liscia, molto alterata, alterata, con fratture in argine.</p>		<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>MOLTO BUONE Superfici molto lische, sane, con alterità.</p> <p>BUONE Superfici lische, leggermente alterate, sciolite.</p> <p>DEGRADATE Superfici lische, moderatamente alterate.</p> <p>SCALDATE Superficie di taglio, liscie (salsolucide), compatte e sciolite da fratture in argine.</p> <p>MOLTO SCALDATE Superficie di taglio liscia (salsolucide), liscia, molto alterata, alterata, con fratture in argine.</p>	
<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indichizzato costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutua incastatura.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disintegrato con blocchi angolari, mutualmente incasturati, con più discontinuità formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHIDISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutua incastatura formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e sferoidali.</p>		<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>MOLTO BUONE Superfici molto lische, sane, con alterità.</p> <p>BUONE Superfici lische, leggermente alterate, sciolite.</p> <p>DEGRADATE Superfici lische, moderatamente alterate.</p> <p>SCALDATE Superficie di taglio, liscie (salsolucide), compatte e sciolite da fratture in argine.</p> <p>MOLTO SCALDATE Superficie di taglio liscia (salsolucide), liscia, molto alterata, alterata, con fratture in argine.</p>		<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indichizzato costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutua incastatura.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disintegrato con blocchi angolari, mutualmente incasturati, con più discontinuità formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHIDISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutua incastatura formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e sferoidali.</p>	

Tabella n.7 - Stima dell'indice GSI sulla base dell'assetto strutturale dell'ammasso roccioso.

Le costanti empiriche m_i ed s sono rispettivamente connesse all'angolo di attrito interno ed alla coesione dell'ammasso.

UNITA' STRATIGRAFICA PRINCIPALE	DESCRIZIONE QUALITATIVA	σ_c (MPa)	GSI	m_i	D
C - Substrato roccioso (Fm. Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio - lacustri VILc)	Argille lacustri da fratturate a compatte	25	60	4	0

Dove: σ_c = valore minimo della resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta fornito per le rocce scistose; **GSI** = indice geologico di resistenza dell'ammasso roccioso stimato in base all'esperienza di Hoek & Marinos, 2000; m_i = costante di Hoek e Brown per roccia intatta, corrispondente al valore minimo per una roccia scistosa; **D** = fattore che dipende dal grado di disturbo a cui la massa rocciosa è sottoposta dal danneggiamento dell'esplosione e dal rilassamento della tensione; esso varia da 0 per masse rocciose in situ indisturbate a 1 per masse rocciose molto disturbate.

Unità C - Substrato roccioso

(Argille lacustri da fratturate a compatte_Fm. Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio - lacustri VILc)

PARAMETRI FISICO-MECCANICI MEDI									
γ_u (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ϕ (°)	c' (Kg/cm ²)	ν	V_{SH} (m/s)	V_P (m/s)	G_{din} (kg/cm ²)	E_{din} (kg/cm ²)	E_{stat} (kg/cm ²)
2.10	2.20	25.6	1.2	0.44	818.0	2427.0	16728.0	48041.0	8677.0

Dove: γ_u = peso di volume naturale indicativo; γ_{sat} = peso di volume in condizione di saturazione indicativo; ϕ = valore nominale dell'angolo di attrito efficace; c' = valore della coesione efficace; ν = coefficiente di Poisson; V_{SH} = valore delle onde SH da prova sismica in foro; V_P = valore delle onde P da prova sismica in foro; G_{din} = valore del modulo di taglio; E_{din} = valore del modulo elastico dinamico; E_{stat} = valore del modulo elastico statico.

Di seguito si riportano gli involuipi di rottura dell'ammasso roccioso, eseguiti utilizzando il codice di calcolo RocLab1 della Rocscience, nel piano delle tensioni principali $\sigma_1 - \sigma_3$ e nel piano $\sigma - \tau$ (vd. fig. n.24):

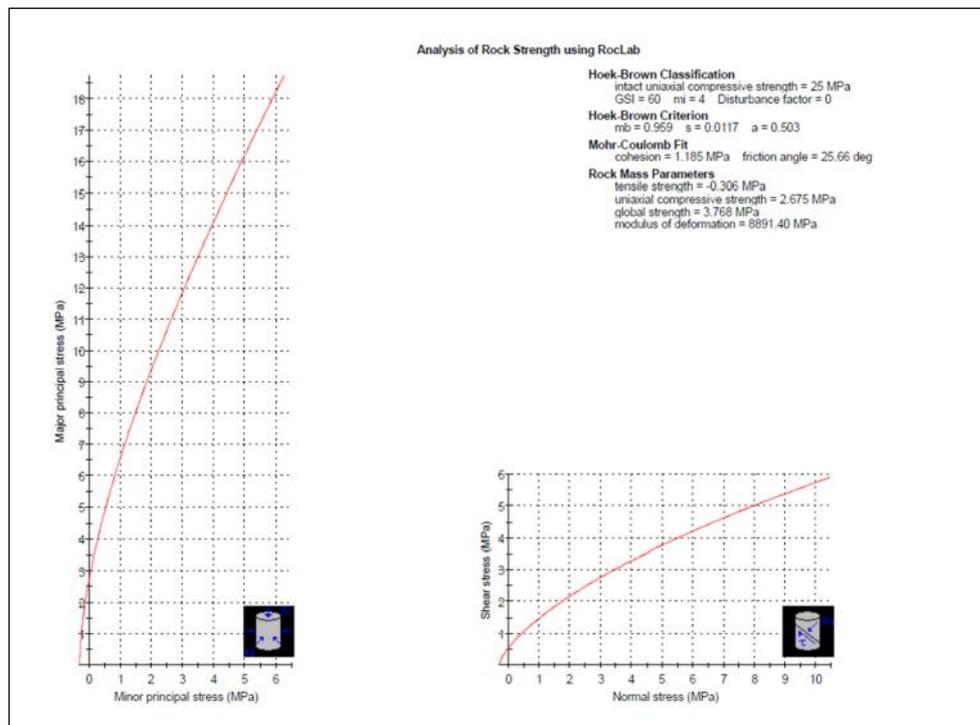


Figura n.24 - Involuipi di rottura dell'ammasso roccioso equivalente all'Unità C.

Nelle Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche", predisposte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, viene ricordato che il Progettista, nelle valutazioni che deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici dei singoli strati individuati, può fare riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti.

Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità.

Tenendo ferme le definizioni riportate, per modesti lavori va bene quanto suggerito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, di conseguenza si assume che il comportamento geomeccanico del terreno è governato dai valori medi dei parametri geotecnici e i valori caratteristici saranno assunti pari a tali valori, ipotizzando per il caso in esame la realizzazione di fondazioni dotate di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti.

7 - MODELLO SISMICO

7.1 - STORIA SISMICA E PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La riclassificazione sismica del territorio nazionale, intervenuta a seguito dell'emanazione della O.P.C.M. n.3274 del 20 Marzo 2003, pubblicata sulla G.U. n.105 dell'8 Maggio 2003, e delle successive proroghe, ha definito il territorio del Comune di Aulla Sismico di Zona 2.

Tale classificazione è stata convalidata in ambito regionale con Del. G.R. n.604/2003; questo comporta che per essa sia considerata un'accelerazione orizzontale massima compresa tra 0.15 e 0.25g.

Successivamente una nuova ordinanza, O.P.C.M. n.3519 del 28 Aprile 2006, ha stabilito i nuovi criteri per l'individuazione delle zone sismiche in ambito nazionale.

Con Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008, pubblicato sulla GU n.29 del 04/02/2008, sono state approvate le "Norme tecniche per le costruzioni" che recepiscono ed integrano le indicazioni contenute nell'O.P.C.M. n.3274, modificando l'approccio alla classificazione sismica del territorio.

Considerato quindi che i criteri introdotti dalle citate Norme Tecniche per le costruzioni, relativamente alle modalità di stima dell'azione sismica di base, non sono più vincolati alla zona sismica di appartenenza del comune in cui è collocato il progetto, ma basati su un approccio "sito-dipendente" e che di conseguenza la classificazione sismica è scollegata dalla determinazione dell'azione sismica di progetto, la Regione Toscana, con deliberazione 8 ottobre 2012, n.878, ha proposto l'aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14/01/2008 - Revoca della DGRT 431/2006.

In base a tale provvedimento, il *Comune di Aulla* è stato perimetrato in *zona sismica 2*.

Quest'ultima perimetrazione è stata confermata dalla Deliberazione GRT n. 421 del 26/05/2014, pubblicata sul BURT Parte Seconda n. 22 del 04.06.2014, in cui è stato approvato l'ultimo aggiornamento della classificazione sismica regionale, relativo all'aggiornamento dell'allegato 1 (elenco dei comuni) e dell'allegato 2 (mappa) della Deliberazione GRT n. 878 dell'8 ottobre 2012.

Con Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018, pubblicato sulla GU n.42 del 20/02/2018, è stato approvato l'aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" che mantiene il criterio di stima dell'azione sismica di base basato su un approccio "sito-dipendente" introdotto dal DM 14 gennaio 2008.

7.2 - DETERMINAZIONE DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

Dato che le condizioni del sito di riferimento non corrispondono a quelle presenti nell'area, è necessario, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, tenere conto delle condizioni stratigrafiche e topografiche del sito in oggetto, in quanto entrambi questi fattori concorrono a modificare l'azione sismica in superficie rispetto a quella attesa su suolo rigido di riferimento con superficie topografica orizzontale.

Tali modifiche, in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, sono il risultato della risposta sismica locale. La "risposta sismica locale" esprime quindi l'azione sismica quale emerge in "superficie" a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite nel percorso dal substrato rigido al sito in oggetto.

In assenza di analisi più dettagliate, per quanto riguarda l'effetto delle condizioni stratigrafiche, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione della categoria di sottosuolo del sito in oggetto.

Le Norme Tecniche prevedono le seguenti categorie di sottosuolo di riferimento (vd. tab. n.8):

Categoria	Descrizione
A	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.
B	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.
C	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
D	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.
E	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.

Tabella n.8 - Tabella 3.2.II - Categorie di sottosuolo (NTC, 2018).

Le categorie di sottosuolo sono quindi definite sulla base della velocità equivalente $V_{s,eq}$ di propagazione delle onde di taglio, calcolata a partire dalla quota di fondazione con la seguente espressione:

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

La velocità equivalente dei terreni di fondazione è stata calcolata utilizzando i risultati dell'indagine sismica in foro, che garantisce un grado d'accuratezza maggiore rispetto alle altre indagini geofisiche realizzate in situ.

In considerazione della situazione sismostratigrafica ricostruita, la velocità equivalente dei primi ca. 7.0m del complesso terreno di riporto + depositi alluvionali (al di sopra del substrato roccioso con $V_{SH} > 800\text{m/s}$), calcolata a partire dal piano campagna è risultata pari a $V_{Seq\ 7.0m} = 255.1\text{m/s}$, pertanto la velocità riscontrata è attribuibile al range della categoria di sottosuolo "C".

In ragione della presenza del substrato sismico posto al di sotto del complesso terreno di riporto / depositi alluvionali, che si attesta a profondità inferiori di 30m, caratterizzato da valori di $V_{SH} > 800\text{m/s}$ (Cfr. il Paragrafo 6.2 del presente studio), la presente situazione sismostratigrafica può essere ricondotta a quella prevista dalla *categoria di sottosuolo "E"*.

7.3 - AZIONE SISMICA

Al fine di ricavare, in riferimento al sito in esame, i valori dei parametri (ag , F_0 , T^*c etc.) necessari per la definizione degli spettri di risposta elastici, ai sensi delle NTC 18, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (cat. sottosuolo A) sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Coordinate del sito di intervento: Latitudine 44,220208; Longitudine 9,970671 (coordinate geografiche sistema ED50 - gradi sessadecimali).
- Vita nominale VN (in anni): all'opera in esame corrisponde una vita nominale (*Numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, mantenga specifici livelli prestazionali - § 2.4.1-D.M. 17 gennaio 2018*) $VN \geq 100$.
- Tipo di costruzione: l'opera di progetto rientra nella tipologia di costruzioni di tipo IV (*Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. - § 2.4.2 - D.M. 17 gennaio 2018*).
- Classe d'uso e Coefficiente Cu: l'opera in esame rientra nella classe d'uso 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. 5/11/2001, 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 - § 2.4.3-D.M. 17 gennaio 2018) alla quale corrisponde un coefficiente $C_U = 2,0$ (Tabella 2.4.II-D.M. 17 gennaio 2018).

- **Periodo di riferimento V_R (in anni):** l'opera di progetto è caratterizzata da un periodo di riferimento per l'azione sismica $V_R = V_N \times C_U = 200$ anni.

Nella seguente tabella (vd. tab. n.9) sono riportati per ciascuno degli stati limite considerati la probabilità di superamento P_{VR} (Tabella 3.2.I - NTC-2018) ed i valori del periodo di ritorno T_R dell'azione sismica per l'opera in esame, quest'ultimo ricavato mediante la seguente formula:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (\text{Eq. n.5})$$

Stati limite		Probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R	T_R (anni)
Stati limite di esercizio	SLO	81%	120
	SLD	63%	201
Stati limite ultimi	SLV	10%	1898
	SLC	5%	2475

Tabella n.9 - Probabilità di superamento P_{VR} e periodo di ritorno T_R dell'azione sismica per ciascuno degli stati limite considerati.

Per ogni stato limite considerato, i valori dei parametri a_g , F_0 e T^*C sono calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame per ciascuno dei periodi di ritorno T_R considerati, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, attraverso la seguente espressione:

$$p = \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i} \cdot \left(\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i} \right)^{-1} \quad (\text{Eq. n.6})$$

dove p è il valore del parametro di interesse nel punto in esame, p_i è il valore del parametro di interesse nell' i -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame, d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo punto della maglia suddetta.

Nella seguente tabella (vd. tab. n.10) sono riportate le coordinate e le distanze rispetto al sito analizzato dei quattro nodi del reticolo di riferimento considerati.

SITI DI RIFERIMENTO				
Sito	ID	Latitudine	Longitudine	Distanza (m)
1	17820	44,2314	9,9320	3763,772
2	17821	44,2334	10,0017	2387,863
3	18043	44,1835	10,0046	4728,868
4	18042	44,1814	9,9350	5551,910

Tabella n.10 - Nodi di riferimento.

Nella tabella n.11 vengono quindi riportati, per ogni stato limite considerato, i valori calcolati del periodo di ritorno T_R e dei relativi parametri spettrali che caratterizzano la pericolosità sismica di base del sito in esame.

Stati limite		T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
Stati limite di esercizio	SLO	120	0,102	2,424	0,266
	SLD	201	0,127	2,400	0,274
Stati limite ultimi	SLV	1898	0,274	2,405	0,307
	SLC	2475	0,297	2,407	0,314

Tabella n.11 - Parametri sismici per ciascuno degli stati limite considerati.

Risposta sismica locale

La valutazione della risposta sismica locale per il sito investigato è stata condotta utilizzando i seguenti parametri:

- Categoria di sottosuolo: E;
- Categoria Topografica: T3 (*Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ - Tabella 3.2.IV delle NTC-2018 - Tabella 3.2.IV delle NTC-2018*);
- Coeff. di amplificazione topografica S_T : per la categoria topografica T3 il valore di S_T è pari a 1.2 (*) (Tab. 3.2.V delle NTC-2018).

(*) Considerando la morfologia della zona ed in particolare analizzando il rilievo nel suo complesso, il sito di costruzione risulta essere in prossimità della porzione medio-basale del rilievo. Il coefficiente topografico varia linearmente da $S_T = 1.0$, alla base del rilievo, a $S_T = 1.2$, in cresta; di conseguenza, il valore del coefficiente da utilizzare nel caso in esame è prossimo all'unità; ma in considerazione di quanto finora argomentato e tenuto conto della complessità dell'area di intervento, cautelativamente viene preso in considerazione un valore di $S_T = 1.1$.

- Coeff. di amplificazione stratigrafica S_s , Coeff. C_c e Coeff. di riduzione dell'accelerazione massima attesa β_s : per la categoria di sottosuolo E i valori di S_s , C_c e β_s per i diversi stati limite considerati sono stati ricavati in base alla relazione indicata nella Tabella 3.2.IV e nella Tabella 7.11.I delle NTC-2018 e sono riportati nella seguente tabella (vd. tab. n.12).

Stati limite		S_s (-)	S_T (-)	C_c (-)	β_s (-)
Stati limite di esercizio	SLO	1,60	1,10	1,95	0,24
	SLD	1,60	1,10	1,93	0,24
Stati limite ultimi	SLV	1,28	1,10	1,84	0,28
	SLC	1,21	1,10	1,83	0,28

Tabella n.12 - Coefficienti S_s , S_T , C_c e β_s per ciascuno degli stati limite considerati.

Accelerazione orizzontale massima attesa al sito a_{max}

L'accelerazione orizzontale massima a_{max} attesa al sito è definita dalla seguente relazione:

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_s \cdot S_T \cdot a_g \quad (Eq. n.7)$$

utilizzando i valori di S_s ed S_T ed a_g ricavati in precedenza ed esprimendo a_g in m/s^2 ($a_g = a_g [g] \cdot 9,81 m/s^2$) si ottiene (vd. tab. n.13):

Stati limite		S _s (-)	S _T (-)	a _g (g)	a _{max} (m/s ²)
Stati limite di esercizio	SLO	1,60	1,10	0,102	1,757
	SLD	1,60	1,10	0,127	2,187
Stati limiti ultimi	SLV	1,28	1,10	0,274	3,783
	SLC	1,21	1,10	0,297	3,883

Tabella n.13 - Accelerazione massima attesa per ciascuno degli stati limite considerati.

Coefficienti sismici orizzontali k_h e verticali k_v

I coefficienti sismici orizzontali e verticali sono definiti dalle seguenti relazioni:

$$k_h = \frac{\beta_s \cdot a_{max}}{g} \quad (Eq. n.8) \qquad k_v = \pm 0.5 k_h \quad (Eq. n.9)$$

Utilizzando i valori di a_{max} e β_s ricavati in precedenza attraverso l' Eq. n.7 e la tab. n.13 si ottengono i valori di k_h e k_v per ogni stato limite ottenuti:

Stati limite		k _h (-)	K _v (-)
Stati limite di esercizio	SLO	0,043	0,021
	SLD	0,054	0,027
Stati limite ultimi	SLV	0,108	0,054
	SLC	0,111	0,055

Tabella n.14 - Coefficienti sismici per ciascuno degli stati limite utilizzati per le verifiche a lungo termine.

8 - STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Poiché i fenomeni di liquefazione interessano prevalentemente i depositi sabbiosi saturi e dipendono da alcuni fattori, tra i quali le caratteristiche geotecniche dei terreni, si specifica quanto segue, per giustificare l'omissione della verifica in esame.

Le NTC 2018 riportano le condizioni secondo cui al verificarsi di una sola delle quattro sotto riportate, la verifica possa essere omessa:

- 1) accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- 2) profondità media stagionale della falda superiore a 15m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- 3) depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100kPa;
- 4) distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella fig. n.25 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in fig. n.26 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

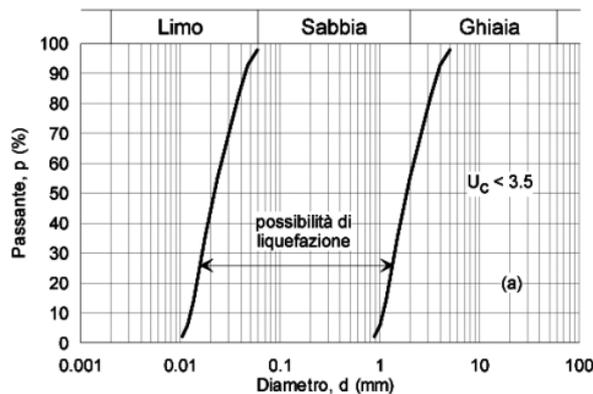


Figura n.25 - Fig. n.7.11.1.(a) NTC 2018

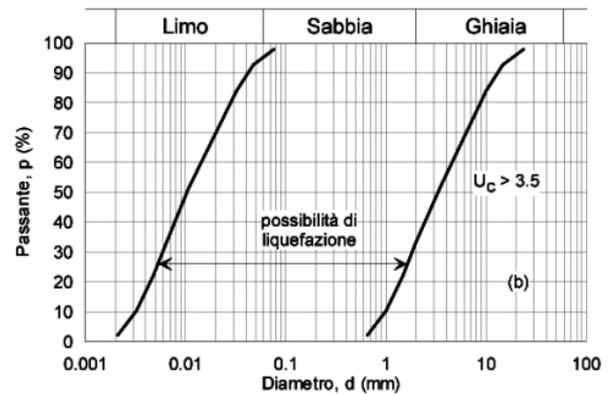


Figura n.26 - Fig. n.7.11.1.(b) NTC 2018

Si ritiene che in base alle condizioni n.1 e n.4, tale verifica possa essere omessa in quanto, durante l'esecuzione della campagna di indagini geognostiche, con particolare riferimento al sondaggio a carotaggio continuo, non è stata rilevata presenza della falda nei primi 15m dal piano di campagna.

Inoltre il complesso terreno di riporto + depositi alluvionali, sulla base delle indagini eseguite e delle conoscenze generali dell'area, risultano costituiti per la loro natura mineralogica e petrografica da un fuso granulometrico eterogeneo (costituito da limo argilloso sabbioso con rari elementi di ghiaia e da ghiaia in matrice limo sabbiosa, con un orizzonte intermedio di sabbia limosa con elementi di ghiaia), coincidente con fuso granulometrico sicuramente non compatibile con quello suscettibile di liquefazione.

9 - ANALISI DI STABILITA'

Come più volte ricordato nel presente studio l'area in cui verranno realizzate le opere in progetto si collocano, in generale, nella porzione circa medio-basale del versante compreso tra il Canale di Cagina a S / SE ed il Torrente Taverone a N.

Da un attento rilievo geologico e geomorfologico, l'intorno significativo dell'area in esame è caratterizzato da valori di pendenza locale molto lievi; in ragione della presenza del piazzale / parcheggio in cui verrà realizzata l'opera in progetto e della viabilità Via Giovanni Paolo II (posta immediatamente a valle dell'opera in progetto) si registrano valori di inclinazione intorno a 3°, cui corrisponde una pendenza del 5%.

Pertanto, alla luce di tali considerazioni, le verifiche di stabilità vengono omesse.

10 - CONSIDERAZIONI TECNICHE E REGIMAZIONE ACQUE

Gli interventi in progetto saranno realizzati in area già impermeabilizzata, adibita a parcheggio, e pertanto non comportano aumenti delle superfici impermeabili o parzialmente permeabili.

In ragione di tale considerazione, nel rispetto del "*principio di invarianza idraulica*", secondo il quale la trasformazione di un'area deve essere tale da non provocare un aggravio della portata di piena del corpo idrico ricevente i deflussi superficiali originati dall'area stessa, implicando l'adozione di opere di mitigazione che servano a bilanciare l'impermeabilizzazione in modo da mantenere inalterate le prestazioni idrauliche del bacino di riferimento su cui si interviene, non si prescrive la realizzazione di alcuna volumetria di invarianza idraulica.

La regimazione idraulica delle acque meteoriche dell'area di interesse è in generale garantita da una rete idrica bassa che copre l'intera area a parcheggio su cui è prevista la realizzazione del fabbricato in progetto.

In merito alla regimazione e all'allontanamento in sicurezza delle acque meteoriche sottese dalla nuova struttura in progetto, considerando che non vi saranno incrementi delle superfici impermeabili, si consiglia di mantenere in essere l'attuale sistema di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche.

11 - CONCLUSIONI

Sulla base delle indagini geognostiche realizzate oltre che dalle considerazioni fatte, si possono trarre le seguenti conclusioni.

Nell'area in cui verrà realizzato il fabbricato in progetto, la pendenza del versante è pari al 5%, cui corrisponde un angolo di inclinazione del versante di 3°.

Il terreno di fondazione oggetto degli interventi edilizi in progetto è costituito da terreno di riporto (limo sabbioso e argilloso con rari elementi di ghiaia / sabbia limosa con elementi di ghiaia) in superficie, poggiante su un deposito alluvionale costituito di ghiaia in matrice limo sabbiosa e argillosa.

Al di sotto si rilevano argille lacustri, ascrivibili alla Formazione "Argille e argille sabbiose lignifere lacustri e fluvio - lacustri VII_C" che presentano un comportamento litoide.

Sulla base delle informazioni contenute nel Quadro Geologico del Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Lunigiana, l'area in esame risulta classificata a pericolosità geomorfologica media (G.2), pericolosità idraulica bassa (I1) e pericolosità sismica media (S2).

La fattibilità della struttura in progetto è stata verificata ai sensi delle disposizioni riportate nel D.P.G.R.T.5/R del 2020, ai sensi della Disciplina di Piano di bacino stralcio assetto idrogeologico del distretto idrografico dell'appennino settentrionale per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica (pai dissesti), ed anche in base alle norme di attuazione del Piano Stralcio Assetto Idrogeologico dell'ex Bacino del Fiume Magra e del Torrente Parmignola.

Nei giorni dell'esecuzione delle indagini geognostiche, dall'ispezione visiva delle aste recuperate dai fori dei test penetrometrici e del sondaggio a carotaggio continuo, non è stata riscontrata la presenza di acqua, ma solo umidità a fondo foro.

È presumibile che durante periodi di intensa piovosità, possa verificarsi una circolazione idrica all'interno dei livelletti più marcatamente grossolani del terreno di riporto, all'interno dei depositi alluvionali, al contatto tra la i depositi alluvionali ed il substrato roccioso e più probabilmente all'interno delle fratture dell'orizzonte più superficiale di quest'ultimo.

Il profilo stratigrafico del terreno di fondazione, definito mediante prospezioni sismiche appositamente eseguite appositamente eseguita appartiene alla categoria di sottosuolo "E".

Le verifiche per la valutazione della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione sono state omesse, in quanto il complesso terreno di riporto + depositi alluvionali non presenta un fuso granulometrico compatibile con quello suscettibile alla liquefazione.

Le analisi di stabilità sono state omesse in ragione delle condizioni morfologiche di sito (pendenza pari al 5%, area ascrivibile a pianeggiante / sub-pianeggiante).

Sarà cura del Progettista verificare la resistenza di progetto e valutare i possibili cedimenti in base ai parametri geotecnici indicati, ai carichi che saranno trasmessi e alla reale tipologia, dimensioni e incastro degli elementi di fondazione delle strutture in progetto.

In merito alla regimazione e all'allontanamento in sicurezza delle acque meteoriche sottese dalla nuova struttura in progetto, considerando che non vi saranno incrementi delle superfici impermeabili, si consiglia di mantenere in essere l'attuale sistema di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche.

La regimazione idraulica delle acque meteoriche è infatti garantita da una rete idrica bassa che copre l'intera area a parcheggio su cui è prevista la realizzazione del fabbricato in progetto.

Per la mitigazione degli effetti arrecati dalle trasformazioni in progetto non si prescrive la realizzazione di alcuna volumetria di invarianza idraulica, dato che gli interventi in progetto non comportano aumenti delle superfici impermeabili o parzialmente permeabili.

Il riutilizzo delle terre prodotte dagli scavi potrà avvenire in situ, in luogo dei limiti e delle prescrizioni vigenti in materia, con particolare riguardo al DPR n. 120/2017 e, al caso, conferiti in apposita discarica autorizzata.

In fase esecutiva dei lavori è consigliabile l'assistenza geologica di cantiere da parte di Tecnico abilitato al fine di verificare le ipotesi litostratigrafiche e idrogeologiche definite ed apportare, se necessario, eventuali modifiche.

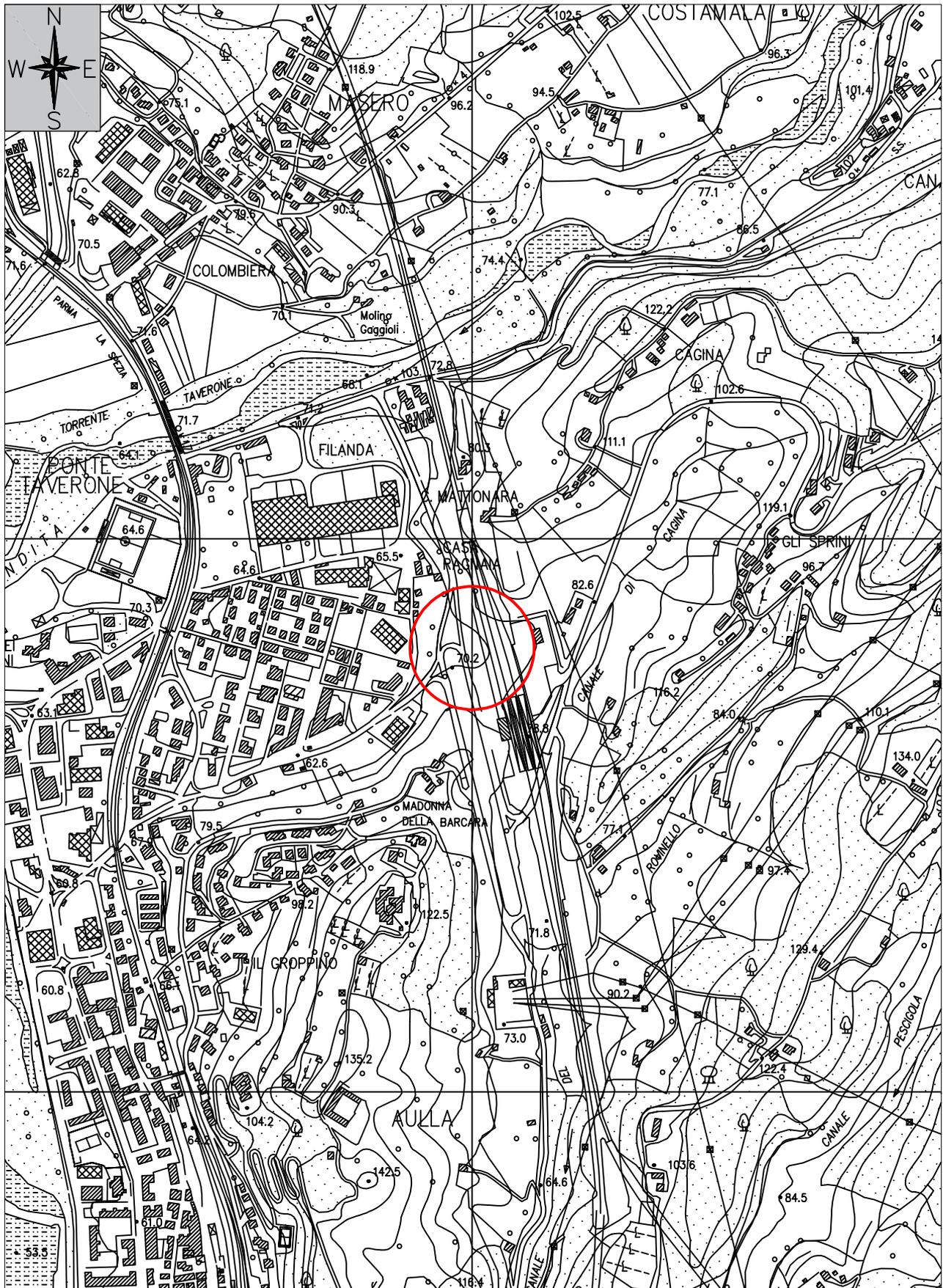
Si può pertanto affermare che le condizioni geologiche, geomorfologiche, idrografiche e idrogeologiche dell'area indagata e del suo intorno, e le condizioni stratigrafiche, geotecniche e sismiche dei terreni di fondazione, sono compatibili con gli interventi in progetto.

Pietrasanta, 28/11/2024

Dott. Geol. Emanuele Michelucci

TAV. 1 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

(C.T.R. 10k Regione Toscana, Foglio n. 233160)



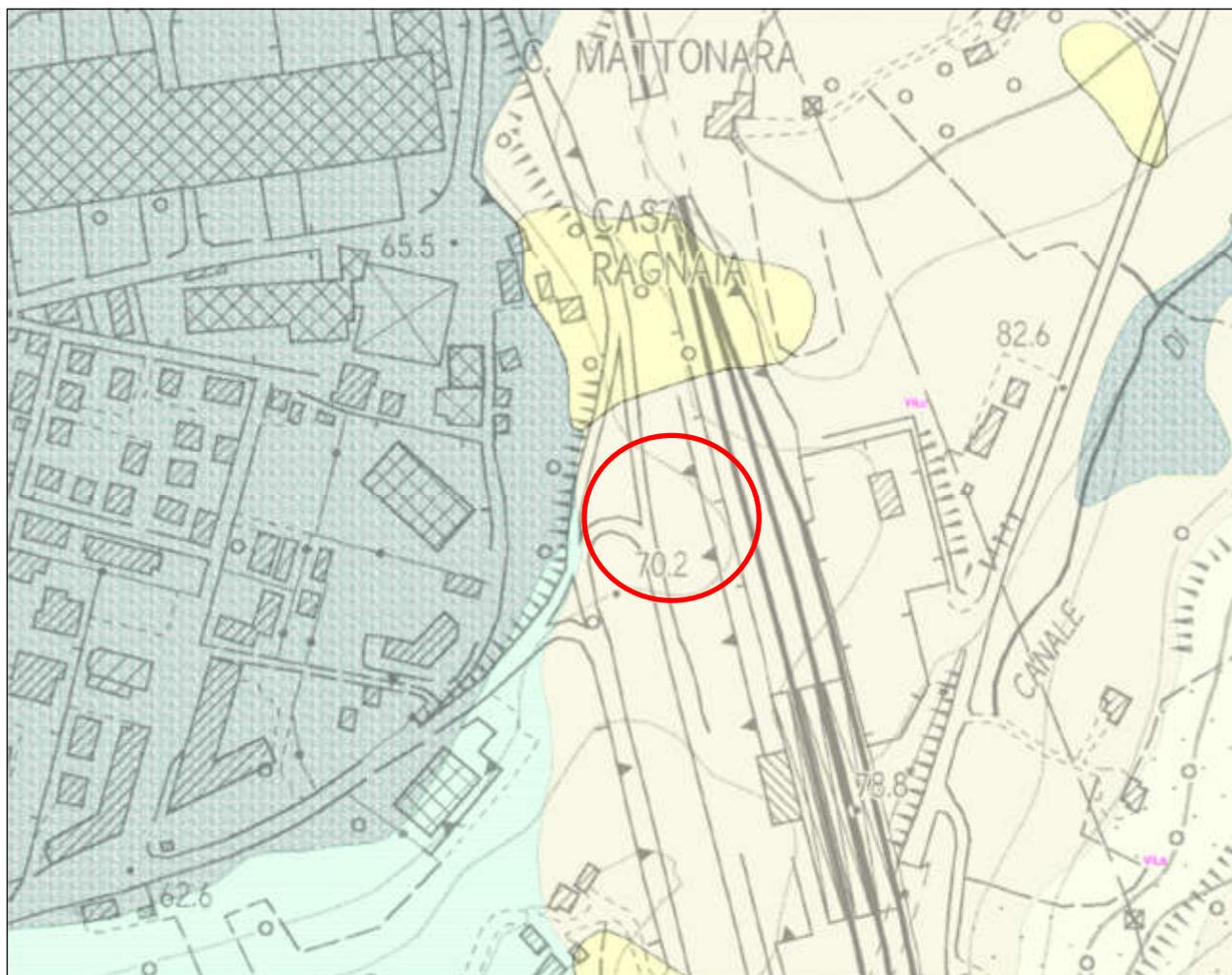
LEGENDA

(Scala 1:10.000)

 - Area in esame

TAV. 2 - CARTA GEOLOGICA

(Estratto della "Carta geologica regionale CARG - sezione 233160", da Servizio Geologico Regionale - Regione Toscana)



(Non in scala)

LEGENDA

 Area in esame

Frane IFFI (da db geomorfologico)

 n.d.

Depositi Superficiali (da db geomorfologico)

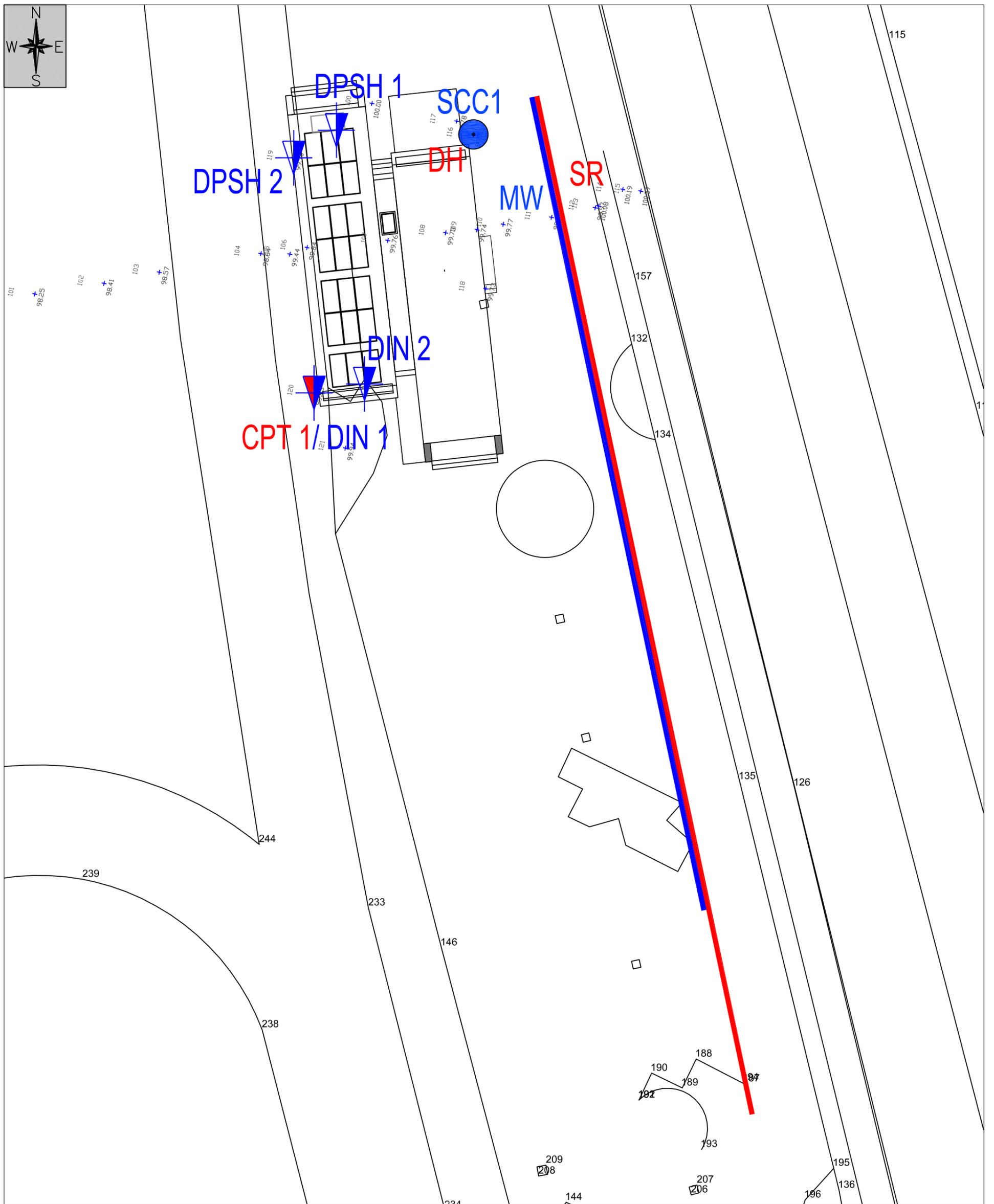
-  Deposito di versante
-  Deposito alluvionale Attivo Ghiaie limose; miscela di ghiaia, sabbia e limo. Frazione fine abbondante. (GM)
-  Deposito alluvionale Inattivo Ghiaie limose; miscela di ghiaia, sabbia e limo. Frazione fine abbondante. (GM)
-  Riporto antropico (terrapieno, rilevato stradale o ferroviario, ecc.)

Unita geologica areale

-  VILc - Argille e argille sabbiose lignitifere lacustri e fluvio-lacustri RUSCINIANO-VILLAFRANCIANO
-  VILa - Conglomerati e ciottolami poligenici RUSCINIANO-VILLAFRANCIANO
-  CCVd - Complesso di Casanova: Arenarie ofiolitiche CAMPANIANO
-  CCVc - Complesso di Casanova: Breccie a matrice pelitica CAMPANIANO

TAV. 3.1 - UBICAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE

(Tavola Stato di Progetto)

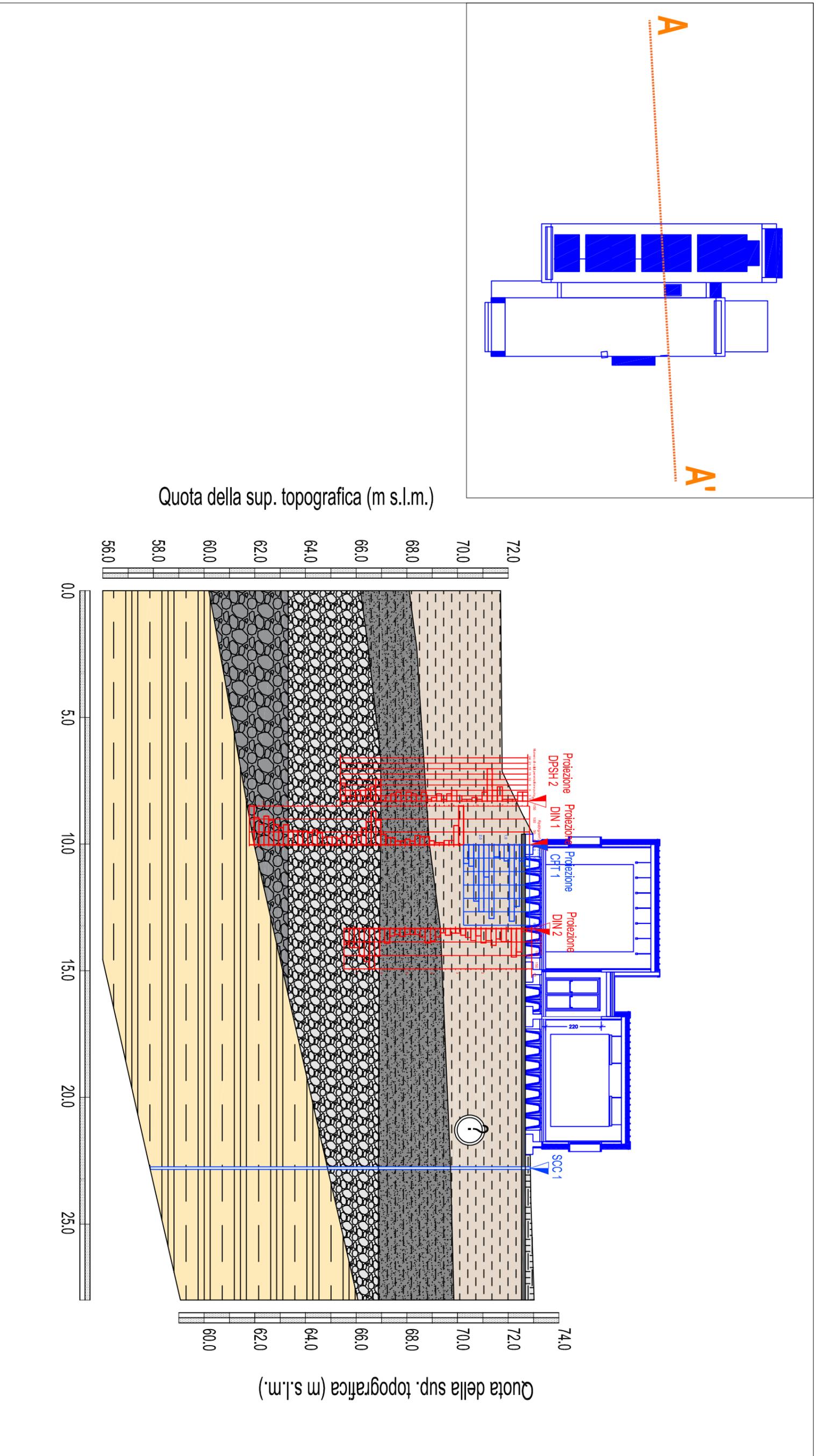


LEGENDA

(Scala 1:250)

-  - Proiezione ingombro della struttura in progetto
-  **SCC1** - Sondaggio a carotaggio continuo (SCC1) / Prospezione sismica in foro (DH)
-  **DH** - Sondaggio a carotaggio continuo (SCC1) / Prospezione sismica in foro (DH)
-  **CPT1 - DIN1** - Prova penetrometrica statica (CPT) approfondita in modalità dinamica superpesante (DPSH)
-  **DIN 2 / DPSH2** - Prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH)
-  **SR** - Traccia profilo sismico a rifrazione (onde P e SH)
-  **MW** - Traccia profilo sismico con metodologia MASW

TAV. 4 - SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA INTERPRETATIVA A - A'
(Stato di Progetto)



STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA ED AMBIENTALE

Dott. Geol. Emanuele Michelucci

N° 1682 Ordine Geologi Toscana

Via Palestro n.38/G, 55045 Marina di Pietrasanta (LU)

Cell. 380 2552689

E-mail: geol.michelucci@gmail.com

Pec: e.michelucci@pec.geologitoscana.net

C.F. MCHMNL80E29G628R - P.IVA 02240330460

Dott. Geol. Osvaldo Turba

N° 1690 Ordine Geologi Toscana

Fraz. Resceto n.24, 54100 Massa (MS)

Cell. 347 1657747

E-mail: o.turba80@gmail.com

Pec: osvaldoturba@pec.it

C.F. TRBSLD80E09F023Q - P.IVA 01360900458

AII. 1

TABELLE E GRAFICI PENETROMETRICI

(Prova statica CPT1 e prove dinamiche DIN1 e DIN2 realizzate dalla Geognostica Apuana S.r.l.)

LEGENDA VALORI DI RESISTENZA

Strumento utilizzato:

PENETROMETRO STATICO OLANDESE tipo GOUDA (tipo meccanico).

Caratteristiche:

- punta conica meccanica $\varnothing 35.7$ mm, angolo di apertura $\alpha = 60^\circ$ - (area punta $A_p = 10$ cm²)
- manicotto laterale di attrito tipo 'Begemann' ($\varnothing 35.7$ mm - h 133 mm - sup. lat. Am. = 150 cm²)
- velocità di avanzamento costante $V = 2$ cm / sec ($\pm 0,5$ cm / sec)
- spinta max nominale dello strumento S_{max} variabile a seconda del tipo
- costante di trasformazione (lett. \Rightarrow Spinta) $C_t = SPINTA$ (Kg) / LETTURA DI CAMPAGNA

fase 1 - resistenza alla punta q_c (Kg / cm²) = (L. punta) $C_t / 10$

fase 2 - resistenza laterale locale f_s (Kg / cm²) = [(L. laterale) - (L. punta)] $C_t / 150$

fase 3 - resistenza totale R_t (Kg) = (L. totale) C_t

q_c / f_s = 'rapporto Begemann'

- L. punta = lettura di campagna durante l' infissione della sola punta (fase 1)
- L. laterale = lettura di campagna relativa all'infissione di punta e manicotto (fase 2)
- L. totale = lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne (fase 3)

N.B. : la spinta S (Kg), corrispondente a ciascuna fase , si ottiene moltiplicando la corrispondente lettura di campagna L per la costante di trasformazione C_t .

N.B. : causa la distanza intercorrente (20 cm circa) fra il manicotto laterale e la punta conica del penetrometro , la resistenza laterale locale f_s viene computata 20 cm sopra la punta .

CONVERSIONI

1 kN (kiloNewton) = 1000 N \approx 100 kg = 0,1 t - 1MN (megaNewton) = 1000 kN = 1000000 N \approx 100 t

1 kPa (kiloPascal) = 1 kN/m² = 0,001 MN/m² = 0,001 MPa \approx 0,1 t/m² = 0,01 kg/cm²

1 MPa (MegaPascal) = 1 MN/m² = 1000 kN/m² = 1000 kPa \approx 100 t / m² = 10 kg/cm²

kg/cm² = 10 t/m² \approx 100 kN/m² = 100 kPa = 0,1 MN/m² = 0,1 Mpa

1 t = 1000 kg \approx 10 kN

LEGENDA VALUTAZIONI LITOLOGICHE

Valutazioni in base al rapporto: **$F = (q_c / f_s)$**

(Begemann 1965 - Raccomandazioni A.G.I. 1977)

valide in via approssimata per terreni immersi in falda :

F = q_c / f_s	NATURA LITOLOGICA	PROPRIETA'
F < 15	TORBE ED ARGILLE ORGANICHE	COESIVE
15 < F ≤ 30	LIMI ED ARGILLE	COESIVE
30 < F ≤ 60	LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE	GRANULARI
F > 60	SABBIE E SABBIE CON GHIAIA	GRANULARI

Vengono inoltre riportate le valutazioni stratigrafiche fornite da Schmertmann (1978), ricavabili in base ai valori di q_c e di $FR = (f_s / q_c) \% :$

- AO = argilla organica e terreni misti
- Att = argilla (inorganica) molto tenera
- At = argilla (inorganica) tenera
- Am = argilla (inorganica) di media consistenza
- Ac = argilla (inorganica) consistente
- Acc = argilla (inorganica) molto consistente
- ASL = argilla sabbiosa e limosa
- SAL = sabbia e limo / sabbia e limo argilloso
- Ss = sabbia sciolta
- Sm = sabbia mediamente addensata
- Sd = sabbia densa o cementata
- SC = sabbia con molti fossili, calcareniti

Secondo Schmertmann il valore della resistenza laterale da usarsi, dovrebbe essere pari a:

- $1/3 \pm 1/2$ di quello misurato , per depositi sabbiosi
- quello misurato (inalterato) , per depositi coesivi.

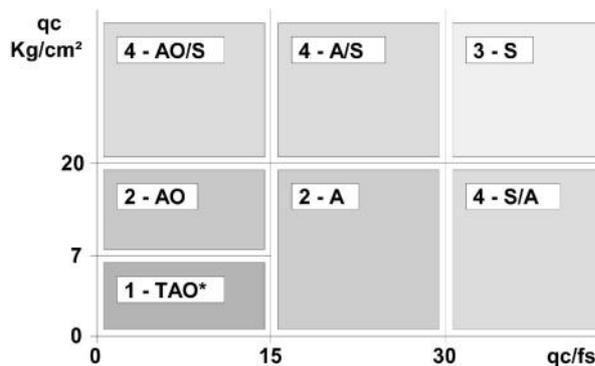
LEGENDA PARAMETRI GEOTECNICI

SCELTE LITOLOGICHE (validità orientativa)

Le scelte litologiche vengono effettuate in base al rapporto qc / fs (Begemann 1965 -Raccomandazioni A.G.I. 1977), prevedendo altresì la possibilità di casi dubbi :

$qc \leq 20 \text{ kg/cm}^2$: possibili terreni COESIVI anche se $(qc / fs) > 30$

$qc \geq 20 \text{ kg/cm}^2$: possibili terreni GRANULARI anche se $(qc / fs) < 30$



NATURA LITOLOGICA

- 1 - COESIVA (TORBOSA) ALTA COMPRIMIBILITA'
- 2 - COESIVA IN GENERE
- 3 - GRANULARE
- 4 - COESIVA / GRANULARE

PARAMETRI GEOTECNICI (validità orientativa) - simboli - correlazioni - bibliografia

- γ' = peso dell' unità di volume (efficace) del terreno [correlazioni : γ' - qc - natura] (Terzaghi & Peck 1967 -Bowles 1982)
- σ'_{vo} = tensione verticale geostatica (efficace) del terreno (valutata in base ai valori di γ')
- C_u = coesione non drenata (terreni coesivi) [correlazioni : C_u - qc]
- OCR = grado di sovra consolidazione (terreni coesivi) [correlazioni : OCR - C_u - σ'_{vo}] (Ladd et al. 1972 / 1974 / 1977 - Lancellotta 1983)
- Eu = modulo di deformazione non drenato (terr.coes.) [correl. : Eu - C_u - OCR - I_p I_p = ind.plast.]
 Eu50 - Eu25 corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (Duncan & Buchigani 1976)
- E' = modulo di deformazione drenato (terreni granulari) [correlazioni : E' - qc]
 E'_{50} - E'_{25} corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (coeff. di sicurezza $F = 2 - 4$ rispettivamente) (Schmertmann 1970 / 1978 - Jamiolkowski et al. 1983)
- Mo = modulo di deformazione edometrico (terreni coesivi e granulari) [correl. : Mo - qc - natura] (Sanglerat 1972 - Mitchell & Gardner 1975 - Ricceri et al. 1974 - Holden 1973)
- Dr = densità relativa (terreni gran. N. C. - normalmente consolidati) [correlazioni : Dr - qc - σ'_{vo}] (Schmertmann 1976)
- \emptyset' = angolo di attrito interno efficace (terreni granulari N.C.) [correl. : \emptyset' - Dr - qc - σ'_{vo}] (Schmertmann 1978 - Durgunoglu & Mitchell 1975 - Meyerhof 1956 / 1976)
 \emptyset'_{1s} - (Schmertmann) sabbia fine uniforme \emptyset'_{2s} - sabbia media unif./ fine ben gradata
 \emptyset'_{3s} - sabbia grossa unif./ media ben gradata \emptyset'_{4s} - sabbia-ghiaia poco lim./ ghiaietto unif.
 \emptyset'_{dm} - (Durgunoglu & Mitchell) sabbie N.C. \emptyset'_{my} - (Meyerhof) sabbie limose
- Amax = accelerazione al suolo che può causare liquefazione (terreni granulari) (g = acc.gravità)(Seed & Idriss 1971 - Sirio 1976) [correlazioni : (Amax/g) - Dr]

PROVA PENETROMETRICA STATICA
LETTURE DI CAMPAGNA / VALORI DI RESISTENZA

CPT 1

2.01PG05-079

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
- lavoro : Interventi edilizi
- località : Aulla - Nuova Stazione - (MS)
- note :

- data : 05/11/2024
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : Falda non rilevata
- pagina : 1

Prof. m	Letture di campagna		qc kg/cm ²	fs	qc/fs	Prof. m	Letture di campagna		qc kg/cm ²	fs	qc/fs
	punta	laterale					punta	laterale			
0,20	16,0	----	16,0	0,60	27,0	1,60	55,0	72,0	55,0	1,33	41,0
0,40	12,0	21,0	12,0	1,13	11,0	1,80	24,0	44,0	24,0	1,20	20,0
0,60	46,0	63,0	46,0	0,93	49,0	2,00	50,0	68,0	50,0	2,20	23,0
0,80	57,0	71,0	57,0	0,60	95,0	2,20	42,0	75,0	42,0	0,73	57,0
1,00	12,0	21,0	12,0	1,13	11,0	2,40	16,0	27,0	16,0	0,60	27,0
1,20	10,0	27,0	10,0	0,67	15,0	2,60	14,0	23,0	14,0	-----	----
1,40	9,0	19,0	9,0	1,13	8,0						

- PENETROMETRO STATICO tipo PAGANI da 10/20t
- COSTANTE DI TRASFORMAZIONE Ct = 10 - Velocità Avanzamento punta 2 cm/s
- punta meccanica tipo Begemann $\varnothing = 35.7$ mm (area punta 10 cm² - apertura 60°)
- manicotto laterale (superficie 150 cm²)

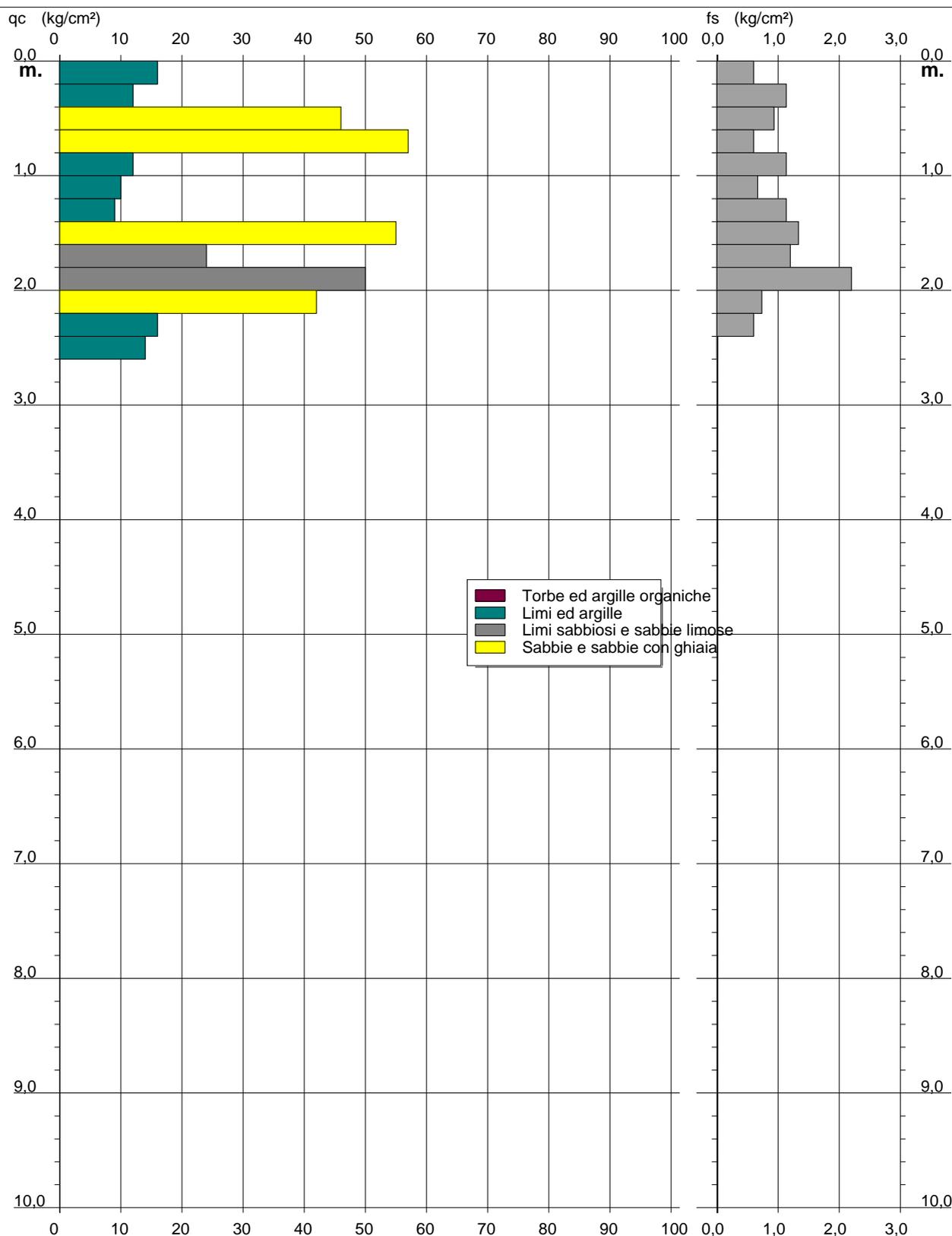
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 1

2.01PG05-079

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
 - lavoro : Interventi edilizi
 - località : Aulla - Nuova Stazione - (MS)

- data : 05/11/2024
 - quota inizio : Piano Campagna
 - prof. falda : Falda non rilevata
 - scala vert.: 1 : 50



PENETROMETRO DINAMICO IN USO : TG 63-100 EML.C

Classificazione ISSMFE (1988) dei penetrometri dinamici		
TIPO	Sigla riferimento	Peso Massa Battente M (kg)
Leggero	DPL (Light)	$M \leq 10$
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$
Pesante	DPH (Heavy)	$40 \leq M < 60$
Super pesante	DPSH (Super Heavy)	$M \geq 60$

CARATTERISTICHE TECNICHE : TG 63-100 EML.C

PESO MASSA BATTENTE	M = 63,50 kg
ALTEZZA CADUTA LIBERA	H = 0,75 m
PESO SISTEMA BATTUTA	Ms = 0,63 kg
DIAMETRO PUNTA CONICA	D = 51,00 mm
AREA BASE PUNTA CONICA	A = 20,43 cm ²
ANGOLO APERTURA PUNTA	$\alpha = 60^\circ$
LUNGHEZZA DELLE ASTE	La = 1,00 m
PESO ASTE PER METRO	Ma = 6,31 kg
PROF. GIUNZIONE 1 ^a ASTA	P1 = 0,40 m
AVANZAMENTO PUNTA	$\delta = 0,20$ m
NUMERO DI COLPI PUNTA	N = N(20) \Rightarrow Relativo ad un avanzamento di 20 cm
RIVESTIMENTO / FANGHI	NO
ENERGIA SPECIFICA x COLPO	Q = (MH)/(A δ) = 11,66 kg/cm ² (prova SPT : Qspt = 7.83 kg/cm ²)
COEFF.TEORICO DI ENERGIA	$\beta_t = Q/Q_{spt} = 1,489$ (teoricamente : Nspt = β_t N)

Valutazione resistenza dinamica alla punta Rpd [funzione del numero di colpi N] (FORMULA OLANDESE) :

$$R_{pd} = M^2 H / [A e (M+P)] = M^2 H N / [A \delta (M+P)]$$

Rpd = resistenza dinamica punta [area A]
e = infissione per colpo = δ / N

M = peso massa battente (altezza caduta H)
P = peso totale aste e sistema battuta

UNITA' di MISURA (conversioni)

1 kg/cm² = 0.098067 MPa
1 MPa = 1 MN/m² = 10.197 kg/cm²
1 bar = 1.0197 kg/cm² = 0.1 MPa
1 kN = 0.001 MN = 101.97 kg

**PROVA PENETROMETRICA DINAMICA
TABELLE VALORI DI RESISTENZA**

DIN 1

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
- lavoro : Interventi edilizi
- località : Aulla - Nuova Stazione (MS)
- note :

- data : 05/11/2024
- quota inizio : piano campagna
- prof. falda : Falda non rilevata
- pagina : 1

Prof.(m)	N(colpi p)	Rpd(kg/cm ²)	N(colpi r)	asta	Prof.(m)	N(colpi p)	Rpd(kg/cm ²)	N(colpi r)	asta
0,00 - 0,20	----	----	----	1	5,80 - 6,00	6	41,0	----	7
0,20 - 0,40	----	----	----	1	6,00 - 6,20	14	95,7	----	7
0,40 - 0,60	----	----	----	2	6,20 - 6,40	19	129,8	----	7
0,60 - 0,80	----	----	----	2	6,40 - 6,60	14	90,4	----	8
0,80 - 1,00	----	----	----	2	6,60 - 6,80	10	64,6	----	8
1,00 - 1,20	----	----	----	2	6,80 - 7,00	6	38,7	----	8
1,20 - 1,40	----	----	----	2	7,00 - 7,20	6	38,7	----	8
1,40 - 1,60	----	----	----	3	7,20 - 7,40	5	32,3	----	8
1,60 - 1,80	----	----	----	3	7,40 - 7,60	6	36,7	----	9
1,80 - 2,00	----	----	----	3	7,60 - 7,80	4	24,5	----	9
2,00 - 2,20	----	----	----	3	7,80 - 8,00	5	30,6	----	9
2,20 - 2,40	----	----	----	3	8,00 - 8,20	5	30,6	----	9
2,40 - 2,60	----	----	----	4	8,20 - 8,40	5	30,6	----	9
2,60 - 2,80	23	190,5	----	4	8,40 - 8,60	8	46,5	----	10
2,80 - 3,00	9	74,5	----	4	8,60 - 8,80	10	58,2	----	10
3,00 - 3,20	2	16,6	----	4	8,80 - 9,00	8	46,5	----	10
3,20 - 3,40	2	16,6	----	4	9,00 - 9,20	9	52,4	----	10
3,40 - 3,60	1	7,7	----	5	9,20 - 9,40	9	52,4	----	10
3,60 - 3,80	1	7,7	----	5	9,40 - 9,60	10	55,4	----	11
3,80 - 4,00	2	15,5	----	5	9,60 - 9,80	10	55,4	----	11
4,00 - 4,20	4	30,9	----	5	9,80 - 10,00	14	77,6	----	11
4,20 - 4,40	4	30,9	----	5	10,00 - 10,20	12	66,5	----	11
4,40 - 4,60	5	36,3	----	6	10,20 - 10,40	14	77,6	----	11
4,60 - 4,80	2	14,5	----	6	10,40 - 10,60	18	95,3	----	12
4,80 - 5,00	3	21,8	----	6	10,60 - 10,80	21	111,1	----	12
5,00 - 5,20	2	14,5	----	6	10,80 - 11,00	15	79,4	----	12
5,20 - 5,40	2	14,5	----	6	11,00 - 11,20	20	105,8	----	12
5,40 - 5,60	4	27,3	----	7	11,20 - 11,40	32	169,4	----	12
5,60 - 5,80	4	27,3	----	7					

- PENETROMETRO DINAMICO tipo : **TG 63-100 EML.C**

- M (massa battente)= **63,50 kg** - H (altezza caduta)= **0,75 m** - A (area punta)= **20,43 cm²** - D(diam. punta)= **51,00 mm**

- Numero Colpi Punta N = N(**20**) [δ = 20 cm]

- Uso rivestimento / fanghi iniezione : **NO**

**PROVA PENETROMETRICA DINAMICA
TABELLE VALORI DI RESISTENZA**

DIN 2

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
- lavoro : Interventi edilizi
- località : Aulla - Nuova Stazione (MS)
- note :

- data : 05/11/2024
- quota inizio : piano campagna
- prof. falda : Falda non rilevata
- pagina : 1

Prof.(m)	N(colpi p)	Rpd(kg/cm ²)	N(colpi r)	asta	Prof.(m)	N(colpi p)	Rpd(kg/cm ²)	N(colpi r)	asta
0,00 - 0,20	1	10,5	----	1	3,80 - 4,00	6	46,4	----	5
0,20 - 0,40	1	10,5	----	1	4,00 - 4,20	7	54,1	----	5
0,40 - 0,60	9	86,8	----	2	4,20 - 4,40	4	30,9	----	5
0,60 - 0,80	11	106,1	----	2	4,40 - 4,60	3	21,8	----	6
0,80 - 1,00	5	48,2	----	2	4,60 - 4,80	3	21,8	----	6
1,00 - 1,20	5	48,2	----	2	4,80 - 5,00	3	21,8	----	6
1,20 - 1,40	4	38,6	----	2	5,00 - 5,20	4	29,0	----	6
1,40 - 1,60	7	62,4	----	3	5,20 - 5,40	3	21,8	----	6
1,60 - 1,80	5	44,6	----	3	5,40 - 5,60	4	27,3	----	7
1,80 - 2,00	6	53,5	----	3	5,60 - 5,80	8	54,7	----	7
2,00 - 2,20	3	26,7	----	3	5,80 - 6,00	7	47,8	----	7
2,20 - 2,40	5	44,6	----	3	6,00 - 6,20	15	102,5	----	7
2,40 - 2,60	4	33,1	----	4	6,20 - 6,40	23	157,2	----	7
2,60 - 2,80	3	24,8	----	4	6,40 - 6,60	19	122,7	----	8
2,80 - 3,00	2	16,6	----	4	6,60 - 6,80	16	103,3	----	8
3,00 - 3,20	2	16,6	----	4	6,80 - 7,00	11	71,0	----	8
3,20 - 3,40	3	24,8	----	4	7,00 - 7,20	11	71,0	----	8
3,40 - 3,60	2	15,5	----	5	7,20 - 7,40	9	58,1	----	8
3,60 - 3,80	4	30,9	----	5					

- PENETROMETRO DINAMICO tipo : **TG 63-100 EML.C**

- M (massa battente)= **63,50 kg** - H (altezza caduta)= **0,75 m** - A (area punta)= **20,43 cm²** - D(diam. punta)= **51,00 mm**

- Numero Colpi Punta N = N(**20**) [δ = 20 cm]

- Uso rivestimento / fanghi iniezione : **NO**

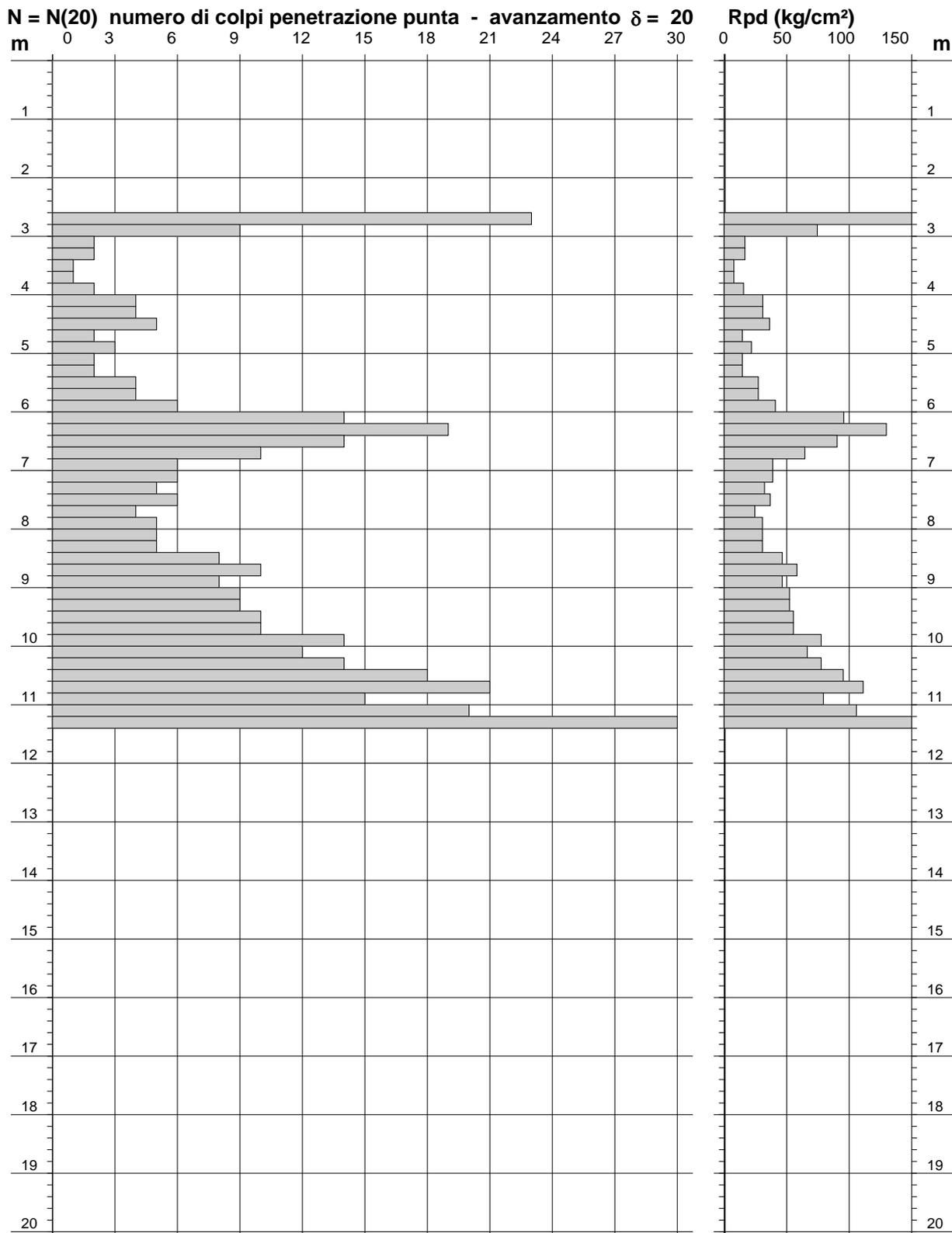
**PROVA PENETROMETRICA DINAMICA
 DIAGRAMMA NUMERO COLPI PUNTA - Rpd**

DIN 1

Scala 1: 100

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
 - lavoro : Interventi edilizi
 - località : Aulla - Nuova Stazione (MS)
 - note :

- data : 05/11/2024
 - quota inizio : piano campagna
 - prof. falda : Falda non rilevata
 - pagina : 1



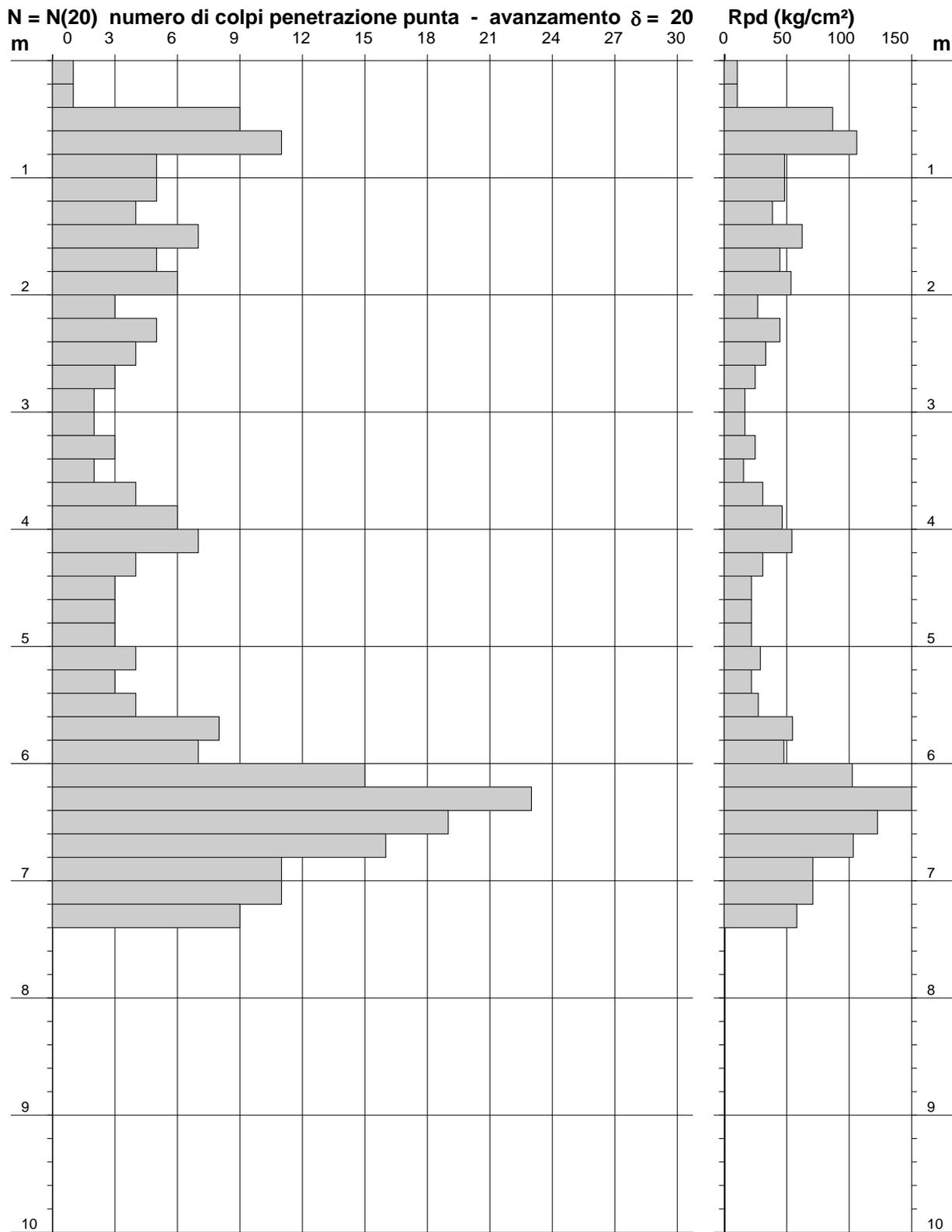
**PROVA PENETROMETRICA DINAMICA
 DIAGRAMMA NUMERO COLPI PUNTA - Rpd**

DIN 2

Scala 1: 50

- committente : Dott. Geol. Emanuele Michelucci
 - lavoro : Interventi edilizi
 - località : Aulla - Nuova Stazione (MS)
 - note :

- data : 05/11/2024
 - quota inizio : piano campagna
 - prof. falda : Falda non rilevata
 - pagina : 1



STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA ED AMBIENTALE

Dott. Geol. Emanuele Michelucci

N° 1682 Ordine Geologi Toscana

Via Palestro n.38/G, 55045 Marina di Pietrasanta (LU)

Cell. 380 2552689

E-mail: geol.michelucci@gmail.com

Pec: e.michelucci@pec.geologitoscana.net

C.F. MCHMNL80E29G628R - P.IVA 02240330460

Dott. Geol. Osvaldo Turba

N° 1690 Ordine Geologi Toscana

Fraz. Resceto n.24, 54100 Massa (MS)

Cell. 347 1657747

E-mail: o.turba80@gmail.com

Pec: osvaldoturba@pec.it

C.F. TRBSLD80E09F023Q - P.IVA 01360900458

AII. 2

REPORT INDAGINI GEOGNOSTICHE
(a cura della EnGeo Progetti S.r.l.)

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione delle Indagini Geofisiche e Geognostiche (Stazione Aulla)

Scala 1:5.000

Regione Toscana
Comune di Aulla (MS)



Regione Regione Toscana – Settore Sismica	Soggetto realizzatore:	Data Novembre 2024
---	-------------------------------	----------------------------------

1 – PREMESSA

Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geofisiche, di tipo sismico attivo-passivo, condotte a supporto degli studi di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Aulla (MS).

Lo studio di microzonazione sismica (MS) di livello 3 rappresenta un livello di maggior dettaglio tra gli studi di MS e consiste in un approfondimento di indagini al fine di determinare l'amplificazione di ciascuna area individuata nello studio mediante risposta sismica locale RSL2D.

Tale approfondimento quindi ha come intento quello di perseguire gli studi pregressi effettuati ed assicurare la riduzione del rischio sismico, evidenziando le criticità ed indagando le aree per le quali sono stati richiesti studi di approfondimento (MS3).

1.1 – UBICAZIONE AREA DI STUDIO

Le indagini geofisiche integrate, sono state eseguite all'interno del territorio del Comune di Aulla sia in aree urbane sia in aree limitrofe per meglio correlare ed interpretare i dati ottenuti.

Per la visualizzazione dell'ubicazione di ciascuna indagine geofisica svolta si rimanda alla cartografia tematica realizzata.

1.2 – INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE

La caratterizzazione dal punto vista sismico del terreno è stata condotta mediante la realizzazione delle seguenti tipologie di prove geofisiche sia attive che passive:

n. 1 indagini sismiche attive P/SH, per la determinazione dei profili sismostratigrafici;

n. 1 indagini sismiche attive-passive congiunte MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità Vs nel sottosuolo

n. 1 indagini sismiche passive HVSR per determinare la frequenza di risonanza di sito.

n. 1 indagine sismica attiva Down-Hole per la determinazione dei profili di velocità Vp e Vs nel sottosuolo svolte all'interno dei fori di sondaggio;

n. 2 indagini geognostiche Prova penetrometrica Dinamica DPSH, per la determinazione delle caratteristiche geomeccaniche del sottosuolo.

1.3 – STRUTTURA DELLA RELAZIONE

La presente relazione descriverà i metodi di indagine utilizzati, illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione, e verranno mostrati, in allegato, i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica sismica ed elettrica integrata, a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo relativamente alle diverse aree di indagine.

Verranno quindi in un primo momento illustrate e descritte le varie tecniche di acquisizione dei dati geofisiche, successivamente verranno riportate le modalità di elaborazione dei dati ed infine mostrati i risultati ottenuti.

2 – LE ONDE DI SUPERFICIE

2.1 – DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE

Le onde superficiali si generano ogni qual volta esiste una superficie libera.

Vengono a crearsi quindi a causa dell'interazione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica, la più studiata delle quali è la superficie libera della Terra.

Queste onde si propagano solo lungo la superficie o nell'interfaccia tra due strati con proprietà fisiche diverse.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di volume, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

Esistono due tipi di onde di superficie, chiamate coi nomi dei due fisici che per primi le studiarono: Onde di Rayleigh e Onde di Love.

- Onde di Rayleigh

Quando un'onda S (componente SV) assieme ad un'onda P incide sulla superficie libera dalla componente vettoriale delle due si generano onde superficiali che si propagano lungo la superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la loro velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, ossia la sua velocità è anche funzione della sua frequenza).

Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Si dimostra che una particella investita da questo tipo di onda vicina alla superficie, percorre un moto ellittico retrogrado lungo la direzione di propagazione (Fig. 1).

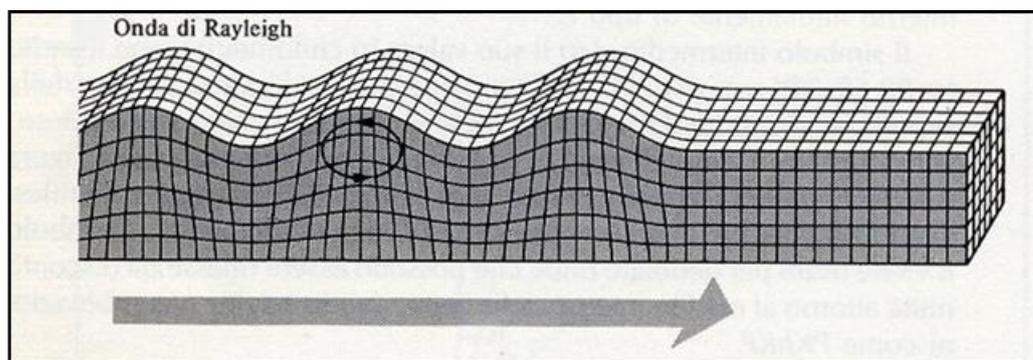


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine www.ingv.it)

- Onde di Love

Le onde di Love sono onde superficiali, anch'esse generate dall'incontro delle Onde S (componente SH) con la superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (un mezzo quindi disomogeneo) di conseguenza sono onde sempre disperse.

Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 2).

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

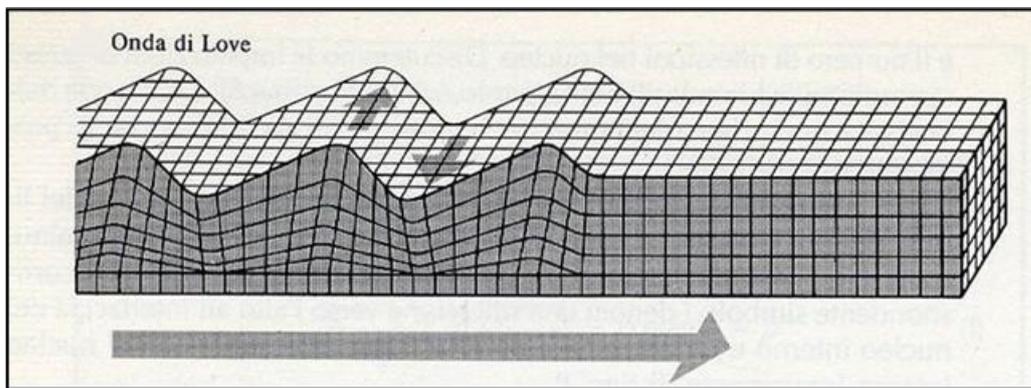


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine www.ingv.it)

2.2 – CENNI TEORICI

Nella maggior parte delle indagini sismiche di superficie, quando viene utilizzata una sorgente di onde di compressione, oltre due terzi del totale di energia sismica complessivamente generata è trasmessa mediante onde di Rayleigh.

Se consideriamo la variazione di velocità verticale in mezzi eterogenei noteremo che le onde di Rayleigh hanno un comportamento dispersivo, vale a dire che la velocità di gruppo non coincide con la velocità di fase di ciascuna frequenza.

Detto questo all'aumentare della lunghezza d'onda λ aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione.

Sapendo che la lunghezza d'onda è legata al periodo T dell'onda mediante la relazione:

$$\lambda = V \cdot T$$

se ne deduce che, a parità di velocità (V), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza (si ricorda che $T = 1/f$ dove f è la frequenza).

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.

Il terreno inoltre agisce da filtro passa basso quindi le frequenze più alte possono essere indicative soltanto per gli strati più superficiali.

Nel caso delle onde Rayleigh, lo strato coinvolto nella perturbazione ha uno spessore dell'ordine di circa 0.5λ (Choon B.Park et al, 1997).

L'immagine sottostante (Fig. 3) riassume il concetto per cui considerando due componenti una ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (a sinistra) e una a bassa frequenza e quindi grande lunghezza d'onda (a destra), la velocità di propagazione della prima dipende dal materiale più superficiale (quindi dalle caratteristiche ad esempio del primo strato) mentre la seconda viaggerà ad una velocità che dipende da tutto il materiale fino in profondità (quindi dalle caratteristiche di tutti gli strati che compongono questo ipotetico modello).

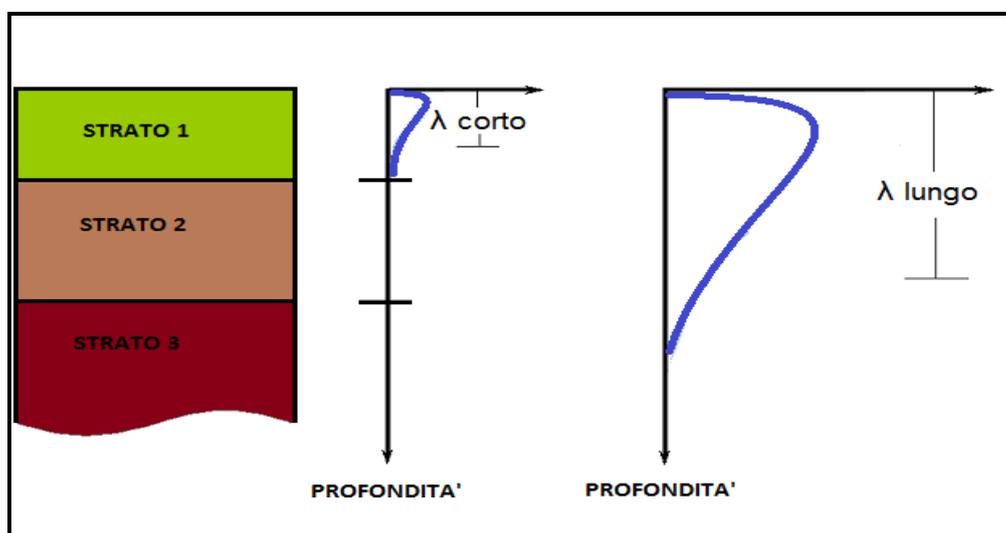


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

La distribuzione della velocità di fase in funzione della frequenza prende il nome di curva di dispersione.

E' chiaro quindi che più un modello di terreno è eterogeneo e maggiore sarà il grado di dispersione delle onde superficiali (Fig. 4).

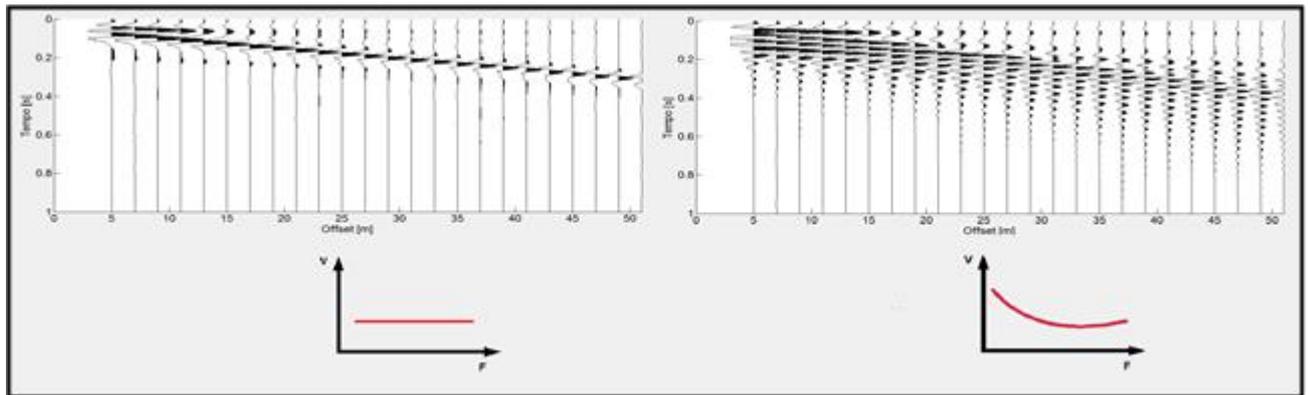


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

Un altro importante aspetto è connesso con la possibilità che questo tipo di onde, in presenza di eterogeneità verticali, manifestino anche una natura multimodale, vale a dire che la loro propagazione può avvenire, per una data frequenza, solo a determinate velocità (modi di propagazione).

Il modo che presenta la velocità di propagazione più bassa è detto modo fondamentale, mentre i restanti costituiscono i modi superiori.

In caso di strati eterogenei e con velocità crescenti il modo fondamentale è quello più energetico.

E' stato osservato che i modi superiori hanno origine in presenza di inversioni di velocità (Fig. 5) o di contrasti di velocità molto forti tra due strati (Cercato, 2008).

In questo caso i modi superiori sono caratterizzati da energia superiore rispetto al modo fondamentale.

Molto spesso può accadere che ci siano dei "salti di modo" tra il fondamentale e i superiori e viceversa quindi il solo basarsi sul modo fondamentale implica in alcuni casi una scorretta inversione dei dati.

I modi superiori vengono sempre più usati infatti il loro utilizzo nelle elaborazioni unitamente al modo fondamentale, può aiutare a vincolare meglio il modello Vs del sottosuolo, soprattutto in profondità. I più comuni software in commercio ne prevedono l'uso.

La dispersione delle onde superficiali quindi, elemento di disturbo negli altri tipi di indagini (sismica a rifrazione e a riflessione), risulta invece, grazie a questa sua proprietà, estremamente utile per calcolare le proprietà elastiche dei mezzi presenti in superficie.

Dalla curva di dispersione, in particolare dallo studio del modo fondamentale, infatti si può ricavare, attraverso l'operazione di inversione dei dati, il profilo di Velocità Vs e gli spessori degli strati indagati, parametri fondamentali sia in ingegneria sia in geofisica di esplorazione.

La stessa curva di dispersione inoltre può essere calcolata a partire dal sismogramma iniziale $x-t$ (offset-tempi) sia in forma generale in un diagramma $F-V$ (frequenze-velocità), sia in un diagramma $F-L$ (frequenze-lentezze dal momento che $L = 1/V$), sia in un diagramma $F-K$ (frequenze-energie dal momento che $f=1/T$ quindi $V = \lambda f = 2\pi f / K$) sia in un diagramma $T-V$ o $T-L$ (tempi-velocità o tempi-lentezze).

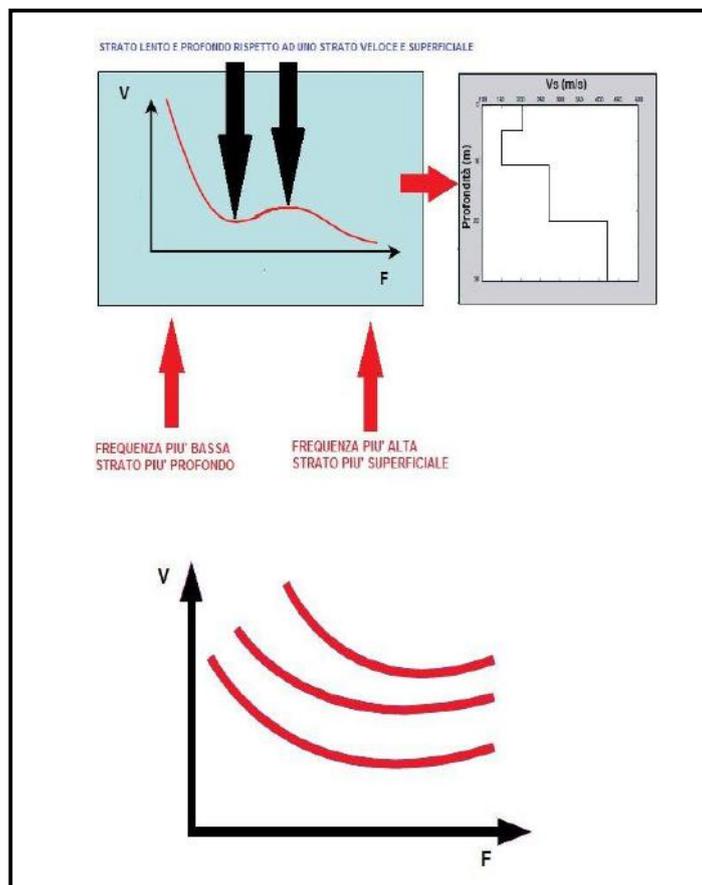


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

2.3 – PROPRIETÀ RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI

1. Circa il 67% dell'energia rilasciata da un qualsiasi tipo di sorgente genera onde di superficie.
2. L'ampiezza delle onde superficiali caratterizzate da un fronte d'onda cilindrico, la cui area risulta $2\pi xz$, è notevolmente maggiore rispetto alle onde di corpo che invece presentano fronte d'onda sferico.

Questo significa che per conservare l'energia (dal momento che l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda) l'ampiezza dell'onda di superficie alla distanza X deve essere proporzionale a $1/X$. Il fronte d'onda delle onde di corpo invece è sferico (area relativa $4\pi x^2$) quindi

l'ampiezza alla distanza X è proporzionale a X^{-2} il che significa che decade molto più velocemente delle onde superficiali.

3. Lo studio delle onde superficiali non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

4. La propagazione delle onde di Rayleigh è influenzata prevalentemente da V_s e dallo spessore h degli strati mentre le velocità V_p e la densità possono essere trascurate. La velocità delle onde di Rayleigh è circa il 90 % della velocità delle V_s .

5. La proprietà della dispersività permette il calcolo della curva di dispersione dalla quale è possibile ricavare i parametri fondamentali del modello di terreno in superficie. Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6 μ V @ 27dB; 0.076 μ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

3.1 – PROCEDURE DI CAMPAGNA

I cavi sismici sono stati stesi lungo la zona di interesse e ad essi sono stati collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

Per quanto riguarda invece l'energizzazione delle onde SH è stata utilizzata sempre una mazza da 8 Kg e la battuta è stata eseguita all'interno di buche con pareti a 90° colpendo su ambo i lati in maniera trasversale allo stendimento dei geofoni.

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points), sono stati disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi, esternamente ed a distanze variabili entro il profilo stesso (in questo caso solo in posizione centrale).

La profondità di investigazione è, in linea teorica direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

3.2 – METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE

La procedura d'elaborazione dati consiste di due fasi: la lettura dei tempi d'arrivo ai vari geofoni dello stendimento per ciascuna energizzazione effettuata e la loro successiva elaborazione mediante metodi di calcolo.

I tempi di primo arrivo delle onde sismiche vengono riportati su diagrammi spazio-tempo (dromocrone) nei quali l'asse dei tempi ha l'origine coincidente con l'istante in cui viene prodotta l'onda sismica (to), mentre nelle ascisse si hanno le distanze relative fra i geofoni dello stendimento.

Tali diagrammi consentono di determinare, nei punti di flesso, le variazioni di velocità fra i vari strati attraversati dai raggi sismici e, tramite elaborazioni, le profondità a cui si verificano tali variazioni.

Il procedimento di elaborazione dei tempi d'arrivo per ottenere le profondità dei rifrattori, utilizza più metodi: il Metodo del tempo di ritardo (delay time), il Metodo del tempo di intercetta, il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) proposto da Palmer (1980) ed il Metodo Tomografico.

Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni (analisi della velocità e tempo-profondità) si determinano le velocità e quindi le profondità dei rifrattori individuati sulle dromocrone.

La funzione di analisi della velocità corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifrattore (distanza intergeofonica), per cui la sua determinazione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche sul rifrattore stesso.

Tramite un procedimento di migrazione dei dati, sia la funzione tempo-profondità che quella di analisi della velocità vengono calcolate per distanze intergeofoniche crescenti (da 0 a multipli interi dell'equidistanza dei geofoni): viene scelta poi quella distanza per la quale le curve presentano il miglior andamento rettilineo.

Il G.R.M., a differenza del metodo del tempo d'intercetta, permette anche di verificare e di individuare, con metodi di calcoli indiretti, la presenza di eventuali strati nascosti (di limitato spessore e/o basso contrasto di velocità) e strati a bassa velocità nella serie stratigrafica.

Negli strati nascosti si ha sempre un aumento di velocità con la profondità, ma il loro spessore è sottile e/o il contrasto di velocità con lo strato sottostante è piccolo, per cui i raggi sismici che partono da questi strati vengono oscurati dai raggi che partono dallo strato sottostante. Gli strati a bassa velocità presentano invece una velocità sismica minore rispetto allo strato sovrastante (inversione di velocità), per cui alla loro interfaccia non si verifica una rifrazione critica e così non vengono evidenziati sul grafico tempo-distanza.

L'individuazione di eventuali strati nascosti e/o inversioni di velocità viene effettuata attraverso il confronto fra i valori delle funzioni tempo-velocità misurate e quelle ricalcolate in base al valore di XY utilizzata per l'elaborazione (Palmer 1980).

Il Metodo tomografico permette di intervenire sui parametri del modello e di "controllare" le iterazioni successive, al fine di ridurre l'errore quadratico medio (indice della differenza tra i percorsi delle onde sismiche calcolati e quelli misurati).

A partire dal modello con parametri predefiniti dall'operatore (numero di iterazioni da effettuare, intervallo delle velocità sismiche di riferimento, posizione delle celle, dimensione delle celle e forma delle celle), i valori iniziali di velocità sismica relativi alle singole celle vengono modificati mediante iterazioni successive allo scopo di "fittare" i segmenti dei percorsi sismici e renderli compatibili con le misure sperimentali.

L'obiettivo è quindi il calcolo del tempo di transito dell'onda attraverso le celle del modello ed il confronto di tale tempo con quello sperimentale.

Attraverso successivi processi iterativi si determina un modello di velocità sismica finale che permette di soddisfare contemporaneamente le caratteristiche dei vari raggi sismici.

4 – INDAGINE SISMICA MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Per le proprietà descritte precedentemente può risultare quindi conveniente l'utilizzo delle onde superficiali per la caratterizzazione di un determinato sito di indagine per stimare il profilo di Vs dalla velocità delle onde superficiali.

E' stato dimostrato ampiamente che la curva di dispersione delle onde superficiali è influenzata soprattutto dalla velocità delle onde S ma anche dallo spessore di ciascuno strato mentre risultano poco influenti le velocità delle onde P (totalmente nel caso delle onde di Love) e la densità di ciascuno strato.

E' quindi possibile stimare oltre al profilo di velocità delle onde S anche i diversi spessori degli strati.

La registrazione di tali forme d'onda viene effettuata mediante la tecnica MASW, l'acronimo sta per Multichannel Analysis of Surface Waves.

Bisogna precisare subito che la tecnica MASW non si basa solo ed esclusivamente sullo studio delle onde di Rayleigh in quanto anche le onde di Love sono onde superficiali anch'esse soggette al fenomeno della dispersione.

In questa specifica tecnica verranno però prese in considerazione solo le onde di Rayleigh.

Come è stato descritto in precedenza le onde di Rayleigh sono caratterizzate da una polarizzazione sul piano verticale e sono quindi registrabili lungo le due componenti verticale e radiale quindi possono essere registrate sia tramite geofoni verticali (per quanto riguarda la componente verticale) sia tramite geofoni orizzontali posti parallelamente allo stendimento (per quanto riguarda la registrazione della componente radiale).

Il tipo di sorgente dovrà comunque essere di tipo verticale per entrambe le componenti.

Questa precisazione è stata fatta perché molto spesso il solo utilizzo della componente verticale e/o orizzontale delle onde di Rayleigh, come unica tecnica MASW, senza avere dati geologici di base su un determinato sito, può non essere sufficiente per una corretta interpretazione dei diversi modi e la successiva inversione dei dati potrebbe dare qualche problematica.

LIMITAZIONI DEL METODO MASW

In generale è bene precisare che il metodo MASW presenta alcune limitazioni tra le quali:

1. Il modello di terreno deve essere a strati piani e paralleli viceversa la prova MASW perderebbe di attendibilità.
2. In riferimento a quanto previsto al precedente punto 1, non ci devono essere significative variazioni laterali del terreno.
3. La quota topografica dello stendimento dei geofoni non deve avere variazioni consistenti.

4. Le caratteristiche elastiche del terreno possono in alcuni casi attenuare completamente le onde superficiali rendendo quindi il metodo MASW inutilizzabile.

5. La profondità di investigazione è dipendente anche dalla lunghezza dello stendimento.

6. Poiché il profilo V_s finale viene calcolato mediante un processo di inversione, è possibile pervenire ad una curva di dispersione non univoca, ovvero quest'ultima soddisfa più modelli differenti di terreno (vedere seguito).

I metodi di prospezione sismica **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves) quindi, consentono di ottenere un modello verticale delle VS a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale.

In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda.

Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari.

Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore H dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità ρ dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio V_s all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson.

A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame.

Quanto detto rappresenta il problema diretto: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh.

Nella prospezione occorre invece affrontare il problema inverso: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi di seguito descritte in maniera semplificata:

Acquisizione: registrazione e osservazione dei dati sismici “grezzi” contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;

Processing: trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FP) e operazione di *Picking* della Curva di dispersione ottenuta;

Inversione: uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità riconducibile col minor scarto di errore possibile al *Picking* della Curva di dispersione sperimentale ottenuta.

4.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI MASW

Le analisi della dispersione delle onde superficiali partono dall'acquisizione dei dati con una geometria di tipo off-end ovvero lo stendimento dei geofoni si trova allineato da una stessa parte rispetto alla sorgente (Fig. 6) oppure split-spread quando invece la sorgente è posta all'interno dello stendimento di geofoni.

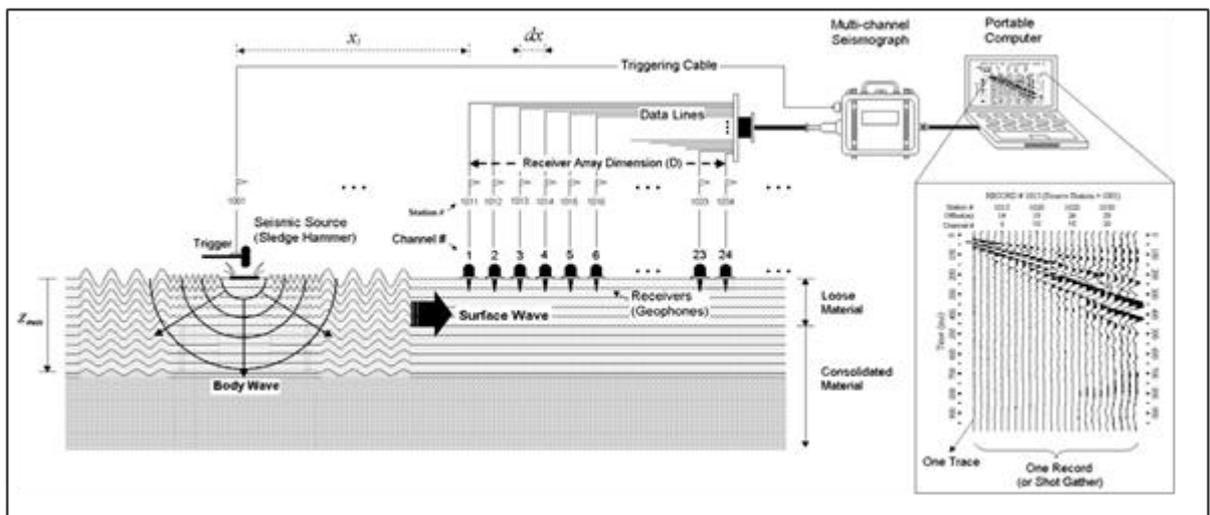


Fig. 6 - Schema di acquisizione delle Onde Superficiali (Fonte immagine www.kgs.ku.edu).

La strumentazione necessaria deve comprendere:

- Sismografo e suoi componenti (Cavi, Trigger, Sistema di acquisizione dati e inversione)
- Geofoni verticali e orizzontali
- Sorgente: martello, grave in caduta libera o fucile sismico
- Piastra per la battuta o traversina
- Appositi supporti per ciascun geofono in caso di presenza di asfalto o roccia

4.1.1 – PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI

Ecco nel dettaglio i vari parametri necessari per un'acquisizione dati MASW:

1- Sorgente

Il tipo di sorgente utilizzata è stato di tipo verticale (martellata).

Qualora la registrazione fosse risultata problematica a causa della distanza e/o dell'attenuazione intrinseca del terreno è stato aumentato il numero di stack (ovvero il numero di colpi per registrazione). Ciò in generale tende a migliorare il rapporto segnale/rumore, la qualità delle registrazioni e quindi degli spettri di velocità su cui si andrà a fare il picking.

2 - Lunghezza dello stendimento Array Dimension (D)

Lo stendimento, in teoria, deve avere la lunghezza (D) maggiore possibile (in base alla disponibilità di spazio e di geofoni) in quanto dalla sua lunghezza derivano le frequenze più basse registrabili (λ max) e quindi di conseguenza, come descritto in precedenza, una maggiore profondità di investigazione (Z).

La sua lunghezza non deve comunque essere superiore a 46 m (la distanza tra geofoni deve essere pari a 2 m per un array di 24 geofoni). In caso di utilizzo di più geofoni possono essere comunque possibili anche lunghezze superiori.

Dalla lunghezza dello stendimento dipende inoltre la risoluzione dei vari spettri, maggiore è la lunghezza e maggiore è la risoluzione. Di conseguenza sarà più facile effettuare l'operazione di picking.

In prima approssimazione quindi, sempre in via teorica, $D \approx Z \approx \lambda$ max dove λ max è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza).

3 – Distanza tra i geofoni (dx)

Dipende molto dal numero di geofoni (in questo caso 24), dalla lunghezza dello stendimento e quindi dalla disponibilità di spazio. Utilizzando 24 geofoni la dx deve essere massimo di 2 m.

A maggior ragione se venisse utilizzato lo spettro f-k per l'individuazione dei modi delle onde superficiali deve essere comunque sempre utilizzata una dx piccola (2 m massimo).

Questo a causa del problema dell'*aliasing spaziale* ovvero la non sufficientemente ridotta distanza tra geofoni non consente di campionare a sufficienza i segnali a più alta frequenza.

Tale problema si presenta qualsiasi spettro si utilizzi, ma nel caso $f - v$ è più facilmente individuabile e non compromette l'interpretazione del dato rispetto allo spettro $f - k$.

Dalla distanza tra i geofoni dipendono inoltre le frequenze più alte registrabili quindi le informazioni inerenti gli strati più superficiali.

Una dx troppo grande inoltre (utilizzando 24 geofoni) ridurrebbe la "ridondanza", cioè quel fenomeno che permette di registrare la stessa frequenza da più stazioni e consente di avere un migliore rapporto segnale/rumore e quindi una migliore definizione della curva di dispersione ottimale.

In prima approssimazione quindi, in questo caso, la profondità minima di esplorazione $z \approx dx \approx \lambda_{\min}$, dove λ_{\min} è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

4 - Distanza sorgente-primario ricevitore (offset minimo X_1)

Per quanto riguarda l'offset minimo bisogna tenere in considerazione il fatto che una sorgente troppo vicina causa problemi di *near offset* e non si rispetta la condizione di onda piana in quanto l'onda generata ha un fronte sferico.

La teoria prevede che un'onda può considerarsi piana ad una distanza circa la metà della massima lunghezza d'onda desiderata (se vogliamo ad esempio avere un profilo che interessa i primi 30 metri di profondità si deve considerare una lunghezza d'onda di circa 60-70 metri, quindi un offset minimo di 30-40 m).

In pratica molto spesso ciò non è possibile, ma buoni risultati si possono ottenere anche ad offset minimi inferiori.

E' necessario quindi effettuare registrazioni con diversi offset in modo da poter valutare, nella fase di elaborazione dati, diversi spettri di velocità derivanti da diverse configurazioni sorgente-ricevitori ed ottenere dal loro confronto un quadro più completo che agevoli il riconoscimento dei modi delle onde di Rayleigh effettivamente presenti, non essendo possibile stabilire a priori, in campagna, quale sia la migliore configurazione.

In questo modo si può avere inoltre un riscontro sulla conformazione 1D del sottosuolo (presenza o meno di variazioni laterali) ma anche risultati che interessino porzioni di terreno sempre più profonde.

5 - Tipo di geofoni

E' raccomandato per questo tipo di registrazioni l'utilizzo di geofoni in grado di registrare basse frequenze (4.5 Hz o inferiore).

I geofoni verticali vengono utilizzati per la misura della componente verticale delle onde di Rayleigh mentre quelli orizzontali, eventualmente, per la componente radiale delle onde di Rayleigh.

I geofoni vengono posizionati in maniera ben solidale al terreno; in presenza di roccia o di asfalto si utilizzano gli appositi supporti. Il numero di geofoni utilizzati in questa campagna è di 24.

6 – Intervallo di campionamento (dt)

Per quanto riguarda le onde superficiali si parla di onde che hanno un range di frequenze teoricamente <100 Hz per questo motivo è sufficiente utilizzare un passo di campionamento molto ampio (anche 4 ms).

7 – Tempo di registrazione

Il tempo di registrazione dipende molto dal tipo di terreno. Se omogeneo o quasi il fenomeno della dispersione non è molto accentuato, se invece è molto eterogeneo il “ventaglio” della dispersione è molto ampio.

Pertanto la lunghezza della registrazione deve essere di almeno 1-2 secondi.

Nella tabella successiva vengono schematizzati i parametri appena descritti:

SORGENTE	Onde di Rayleigh: verticale (martellata)
LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO (D)	46 metri
DISTANZA TRA GEOFONI (dx)	2 m
OFFSET MINIMO (X ₁)	≈ dx e ≈ D/2
NUMERO DI SCOPPI	2
TIPO DI GEOFONI	4.5 Hz (verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh)
NUMERO DI GEOFONI	24
TEMPO DI REGISTRAZIONE	1-2 secondi
INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO (dt)	0.5 – 2 ms
NOTE	Le tracce non sono state filtrate e è stato aggiunto AGC (Automatic Gain Control)

4.1.2 – STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente campagna geofisica sono state svolte utilizzando un sismografo *DOREMI* prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6 μ V @ 27dB; 0.076 μ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

4.1.3 – ESECUZIONE INDAGINE MASW

La geometria di acquisizione utilizzata è indicata nello schema sottostante.

E' bene precisare che una geometria di acquisizione "fissa" non esiste, poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato.

La geometria proposta, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, rappresenta il giusto compromesso tra pratica e teoria.

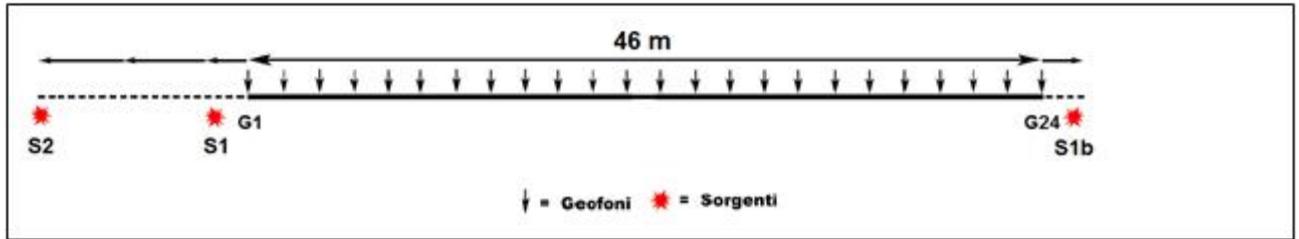


Fig. 7 - Geometria di acquisizione massima per le onde superficiali utilizzando 24 geofoni e $dx=2$.

S1: a distanza adeguata da G1.

S2: a distanza $D/2$ da G1 pari alla semi lunghezza dell'array di geofoni (D).

S1b: a distanza da G24 speculare rispetto a S1

La scelta di utilizzare due scoppi S1 e S2 di cui quest'ultimo a distanza, ove possibile, pari a $D/2$ è stata fatta per i seguenti motivi:

- Scoppi posti a distanza considerevole permettono di mettere in evidenza tutto il range di frequenze ottenibile dalla sorgente utilizzata, dalle più alte (S1) a quelle più basse (S2);
- I modi superiori, se presenti, sono maggiormente individuabili e discriminabili da quello fondamentale, il che in caso contrario porterebbe ad una interpretazione errata a seguito della fase di inversione dei dati;
- La similarità tra i due spettri F-V ricavabili dai due scoppi permette di stabilire se siamo in condizione di piani paralleli e/o assenza di variazioni laterali significative;
- In aggiunta al punto precedente, per verificare il parallelismo e l'omogeneità degli strati, in caso non ci sia lo spazio necessario per lo scoppio S2, eventualmente, ove possibile, è buona norma ricorrere ad uno scoppio (S1b) posto nella parte opposta dello stendimento in posizione geometricamente speculare allo scoppio S1.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione si passa alla fase di montaggio della strumentazione in campagna.

I cavi sismici vengono stesi lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La profondità di investigazione è, in linea teorica come descritto precedentemente, direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

4.2 – ELABORAZIONE (PROCESSING) E INVERSIONE DEI DATI MASW

L'analisi della dispersione delle onde superficiali (qualsiasi tipo esse siano) al fine di determinare il profilo delle Vs di un determinato sito è composta da due fasi fondamentali:

1 – Determinazione dello spettro di velocità (generalmente nel dominio $f - v$) dal quale vengono determinate le caratteristiche delle onde superficiali quindi le curve di dispersione.

2 – l'inversione, ovvero il passaggio dalle curve di dispersione al modello di terreno, dei diversi modi precedentemente individuati (in particolare il modo fondamentale). Una volta registrate le tracce seguendo la metodologia precedentemente descritta si ottiene il dataset dei dati nel dominio $x - t$ ovvero spazio - tempo. E' chiaramente impossibile lavorare in questo dominio quindi si deve passare al dominio $f - k$ (frequenze - numeri d'onda) oppure al dominio $f - v$ (frequenze - velocità) (Fig. 8).

Alcuni punti chiave da tenere in considerazione per il controllo di qualità dei dati sono:

1 – La registrazione corretta ben visibile in tutte le tracce.

2 – Spettro di velocità chiaro ed interpretabile.

3 – Attenzione ai modi superiori se presenti.

4 – Utilizzare come modello iniziale i dati geologici e/o i dati forniti dalla sismica a rifrazione. Trattandosi infatti di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile (Foti, 2008).

5 - La corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali (Foti, 2008).

6 – In caso di incertezze legate alla NON UNIVOCITA' DELLA SOLUZIONE è necessaria quindi una taratura mediante dati diretti di esplorazione del sottosuolo.

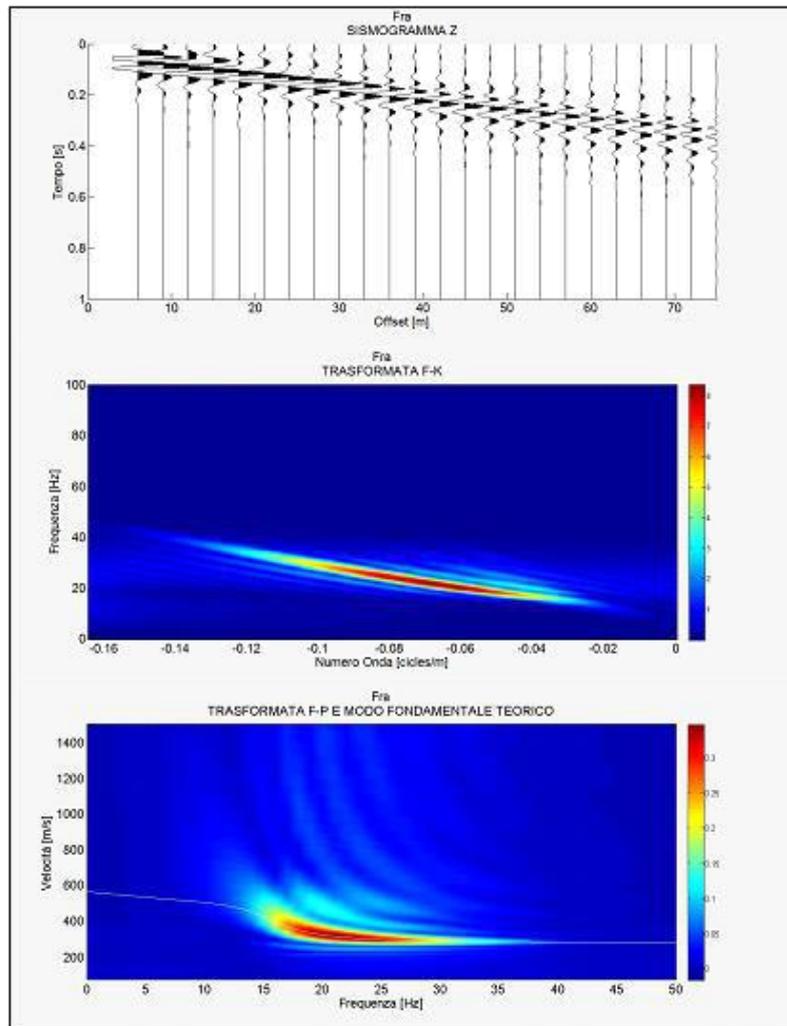


Fig. 8 - Semplice modello preso dalla letteratura composto da due strati a velocità crescente ($V_p = 650$ e 1400 m/sVs = 300 e 600 m/s spessore h fino al semispazio di 8 m). Dall'alto al basso si può vedere il sismogramma sintetico (componente verticale), lo spettro f-k e lo spettro f-v (con modo fondamentale teorico).

Una volta calcolato lo spettro f –v è buona norma verificare la profondità massima raggiunta dall'indagine (Fig. 9) in modo da meglio vincolare il modello da utilizzare nella fase di inversione, dopo di che si entra nella parte più delicata, ovvero il picking, l'individuazione cioè dei diversi modi.

La loro individuazione è quindi soggettiva (di contro all'oggettività dello spettro calcolato) e le scelte che si fanno devono essere ponderate con cura per non inficiare in maniera determinante il processo di inversione.

E' di uso comune interpretare il modo fondamentale come quello a più alta energia.

Questo non è sempre vero. In base infatti alla complessità del sito geologico i modi superiori potrebbero essere molto più energetici o addirittura talmente energetici che nello spettro il modo fondamentale non è visibile.

Non bisogna in maniera categorica basarsi sul picking e inversione automatica che molti software consentono di fare.

E' necessario quindi fare riferimento a prove invasive presenti nelle vicinanze (penetrometrie, carotaggi ecc.). Più dati si hanno a disposizione e maggiore è la probabilità di ricostruire, dalla curva di dispersione, il modello di terreno più veritiero che l'ha determinata, riducendo al minimo così i problemi di non univocità.

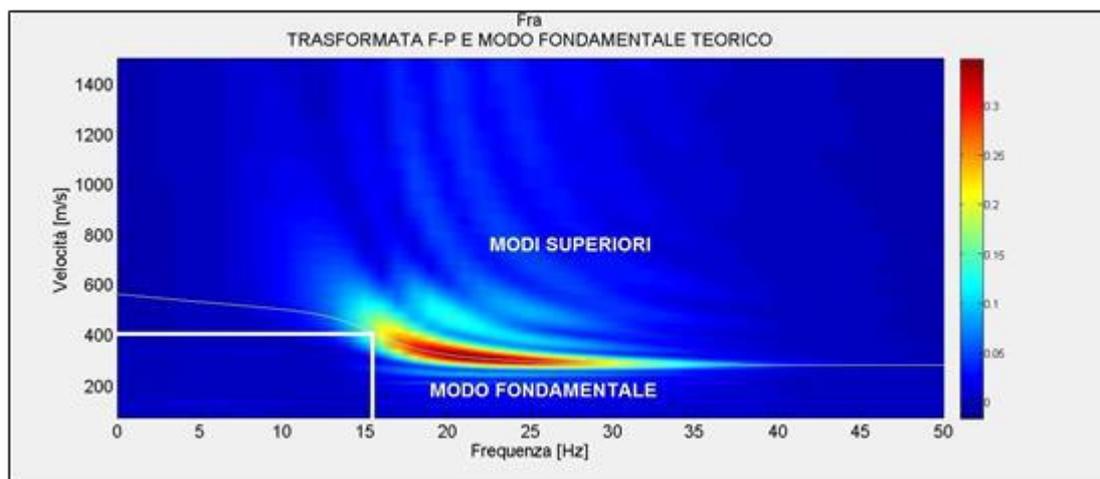


Fig. 9 - Calcolato lo spettro f-v per determinare in maniera approssimata la profondità massima raggiunta dalla prova si prendono le coordinate f-v dell'ultimo punto chiaramente visibile del modo fondamentale e si esegue la seguente formula: $Z = v / 2f$. In questo caso $v = 400$ m/s, $f = 15.5$ Hz quindi $Z = 400 / 31 = 12.9$ m

Il metodo di prospezione **ESAC** (Extended Spatial Autocorrelation Method) invece avviene tramite la registrazione dei microtremori come sorgenti sismiche con stendimenti bidimensionali e attraverso il processo di inversione della curva di dispersione effettiva (anziché modale come nel caso dell'indagine MASW).

Nel metodo ESAC si registra il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente, cioè sollecitazioni di qualsiasi origine, provenienti da sorgenti ignote e isotropiche (disposte in tutte le direzioni) rispetto ad uno stendimento sismico non lineare.

In assenza di spazi sufficientemente lunghi e in presenza di ambienti urbanizzati, acquisizioni con stendimenti 2D (a "L", croci o cerchi) e di breve durata, consentono in maniera speditiva l'analisi del microtremore sismico.

L'acquisizione secondo una geometria bidimensionale risolve alcuni problemi legati alle velocità apparenti, presenti nei dati acquisiti mediante array unidirezionali (ReMi).

Uno stendimento ESAC è realizzato mediante l'utilizzo della classica strumentazione per l'esecuzione di una prospezione sismica MASW con geofoni a componenti verticale da 4,5 Hz disposti secondo una geometria 2D (a "L", croci o cerchi).

Al contrario di ciò che avviene con le tecniche attive, il metodo ESAC, consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con una sorgente attiva e l'acquisizione può essere eseguita, al limite, anche da un solo operatore.

Con la metodologia ESAC viene studiata la direzionalità del microtremore e valutata la velocità di fase alle diverse frequenze.

Il metodo consente di definire la cosiddetta **curva di dispersione effettiva**, che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali "pesate" in base al loro specifico contenuto energetico nel sito.

Nel caso di profili normalmente dispersivi, la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale.

In altri casi, per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, la curva di dispersione effettiva risulta frutto di una combinazione dei diversi modi in funzione della relativa energia.

Un vantaggio quindi della tecnica ESAC è quello di non dovere identificare (come in altre metodologie) i vari modi di vibrazione, che sono invece trattati, più semplicemente, in modo unitario.

Mediante software dedicato viene calcolata automaticamente la curva di dispersione effettiva, dalla quale può essere eseguita la **modellazione delle velocità di taglio (Vs)**.

Le analisi ESAC sono mirate ed utili a definire le basse frequenze, ma non risultano altrettanto efficaci alle alte (ove invece le analisi di sismica attiva si rivelano decisamente superiori).

Per questo motivo si utilizzano tecniche passive con **analisi congiunta** con dati provenienti da sismica attiva (**ESAC+MASW**) al fine di risalire ad un modello sismostratigrafico affidabile lungo tutta la profondità di indagine.

La geometria dello stendimento **MASW** utilizzata è stata di **24 geofoni** intervallati da una distanza di **2-2.5 m** (Lunghezza stendimento pari quindi a **46-57.5 m**) mentre i parametri di acquisizione sono stati settati in maniera consona a questo tipo di indagine (tempo di registrazione più lungo e bassa frequenza di campionamento).

In base alle indagini sismiche effettuata quindi, è stato possibile ricavare più sequenze sismo-stratigrafiche relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali, nei primi 30 metri di profondità ed oltre (**Vs30/Vseq**).

6 - INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

In sismica non esistono soltanto le metodologie di indagine della rifrazione e della riflessione, esistono altre che prendono il nome di “sismica in foro”.

Una di esse, che è stata affrontata in questo lavoro, è la sismica Down-Hole. In questa tecnica viene fatto un foro nel terreno (di solito si utilizza il foro fatto per un carotaggio) opportunamente rivestito in cui viene fatto calare un sensore a tre componenti, in grado quindi di registrare sia le onde P che le S (SH e SV), a intervalli di 1-2 metri fissandolo alle pareti del foro tramite un sistema ad aria compressa o idraulico.

La sorgente viene posta in superficie ad una distanza d dal foro.

L'impulso alla sorgente produce lungo la direzione di propagazione verticale prevalentemente onde longitudinali P se la battuta è effettuata verticalmente (ad esempio una colpo di mazza su di una piastra) mentre produce impulsi prevalentemente orizzontali e quindi onde di taglio polarizzate orizzontalmente (onde SH) se vengono effettuate battute parallele al terreno di superficie (ad esempio lateralmente ad una trave di legno opportunamente fissata al terreno).

L'acquisizione dei dati può avvenire in due modi differenti:

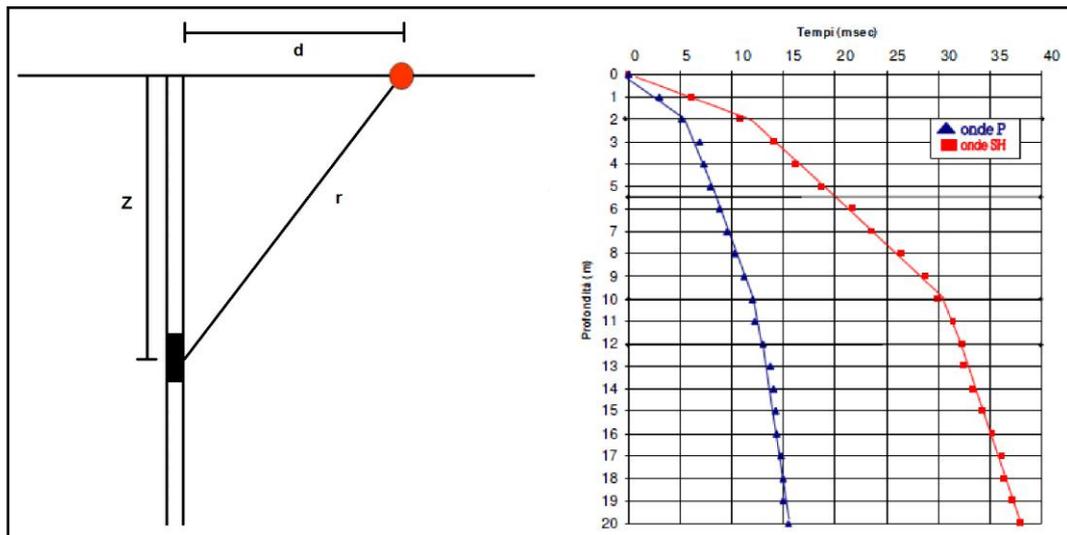
6.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE

Per poter interpretare il down - hole con il metodo diretto, inizialmente, è necessario correggere i tempi di tragitto t misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde.

Quindi se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore tridimensionale, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{corr} = (Z / r) t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico $t_{corr} - z$ in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dal coefficiente angolare (come nella sismica a rifrazione) dei segmenti di retta lungo i quali si interpolano i dati sperimentali.



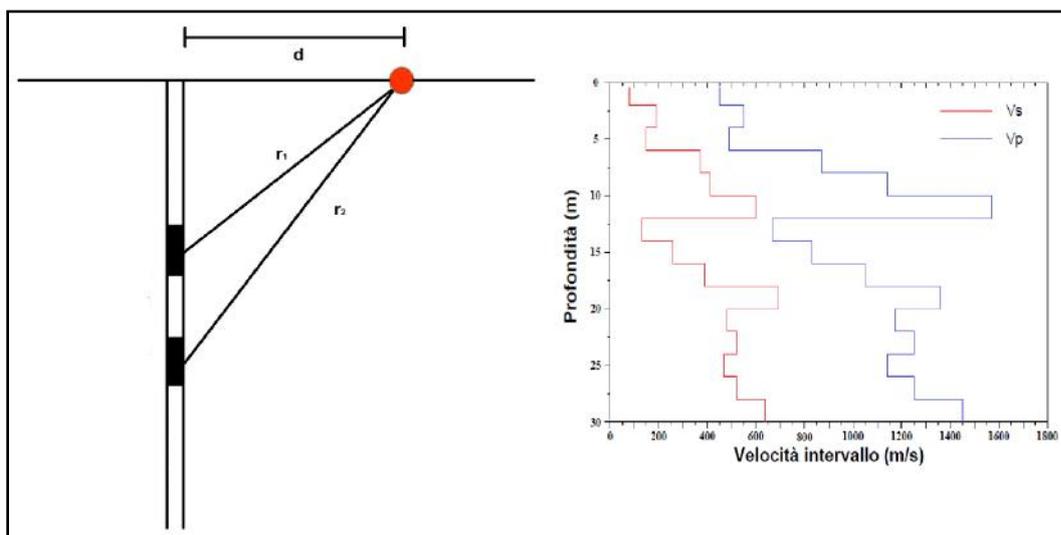
Schema di acquisizione con un ricevitore e a destra il relativo risultato

6.2 METODO INTERVALLO

Questo metodo risulta migliore del primo in quanto i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità consentendo una migliore definizione del profilo di velocità.

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la formula vista in precedenza e la "velocità di intervallo" delle onde P e S con la formula seguente:

$$V_{p,s} = (Z_2 - Z_1) / (t_{2corr} - t_{1corr})$$



Schema di acquisizione con doppio ricevitore e a destra il relativo risultato.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti infatti non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti e non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

8 – BIBLIOGRAFIA

C. Park, R. Miller, J. Xia. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808, 1999.

C. Park, R. Miller, J. Xia and J. Ivanov. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) – active and passive methods, *The Leading Edge* (January 2007).

M. Cercato. Addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion, *Geophysical Prospecting*, 00, 1-21, 2008.

S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva. Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva, 2008.

D. Albarello, S. Castellaro. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola *Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n. 2 – 2011*.

M. Bour*, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation (1998).

SESAME European research project. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation (2004).

ALLEGATI

- **ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE SISMICA DOWN – HOLE**
- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNA STRATIGRAFICA SONDAGGIO E REPORT PROVA DI LABORATORIO ESEGUITA SUL CAMPIONE**
- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**

INDAGINE SISMICA MASW_AULLA STAZIONE

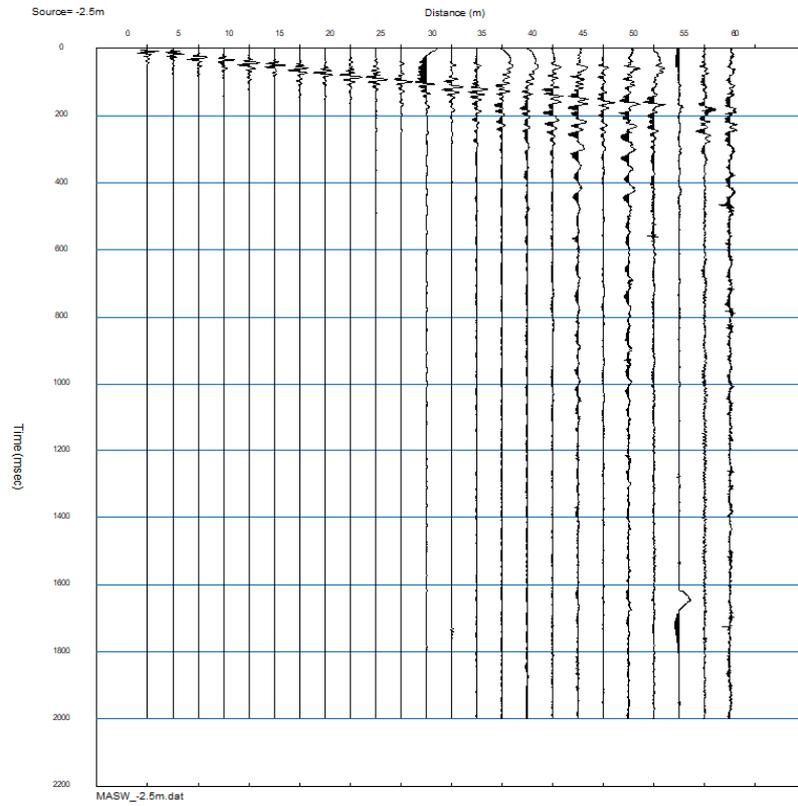
Geometria dello stendimento MASW

Numero Geofoni: 24

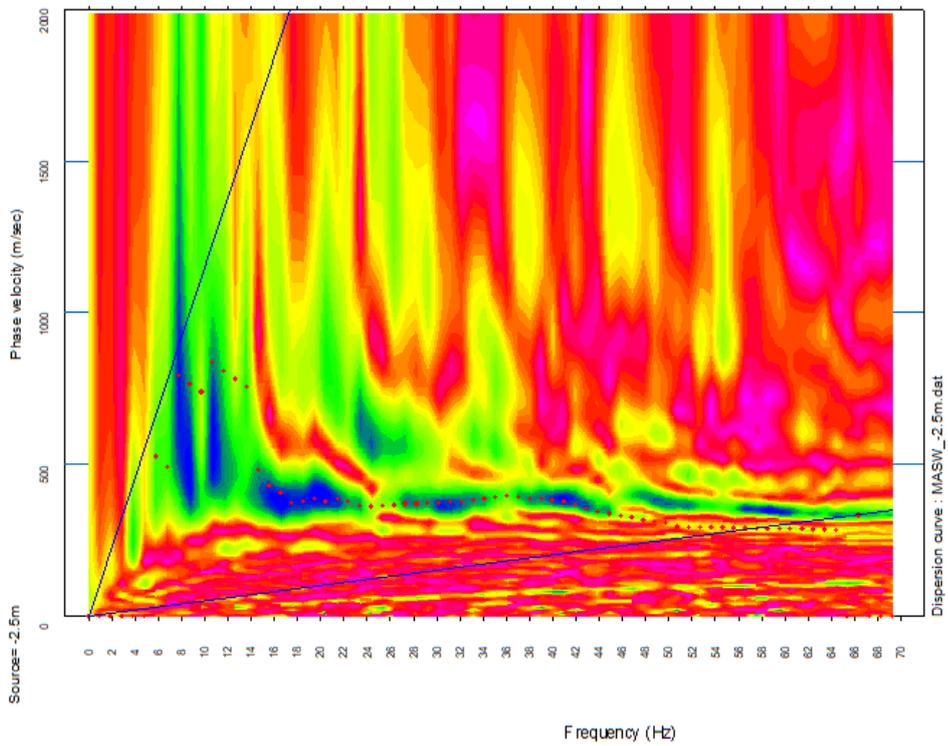
Intervallo (m): 2.5 m

Lunghezza Stendimento (m): 57.5 m

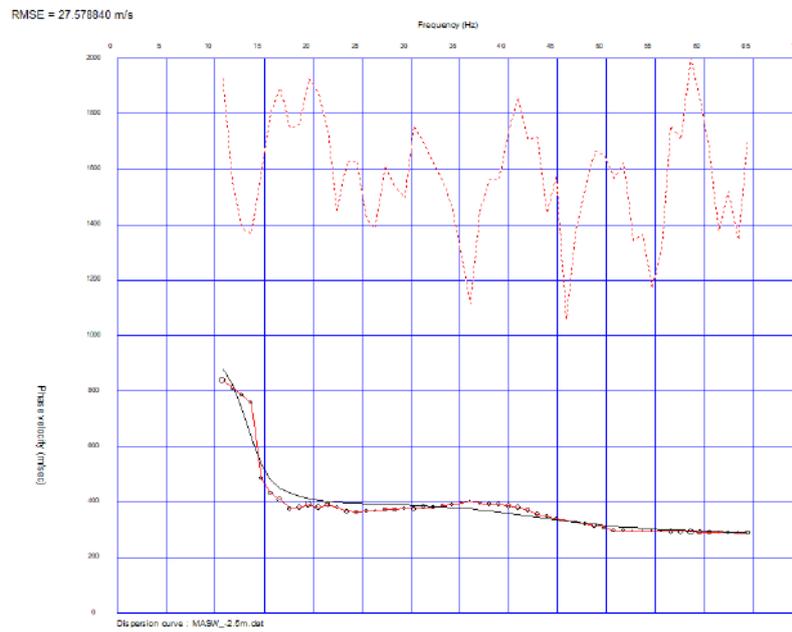
Sismogramma MASW



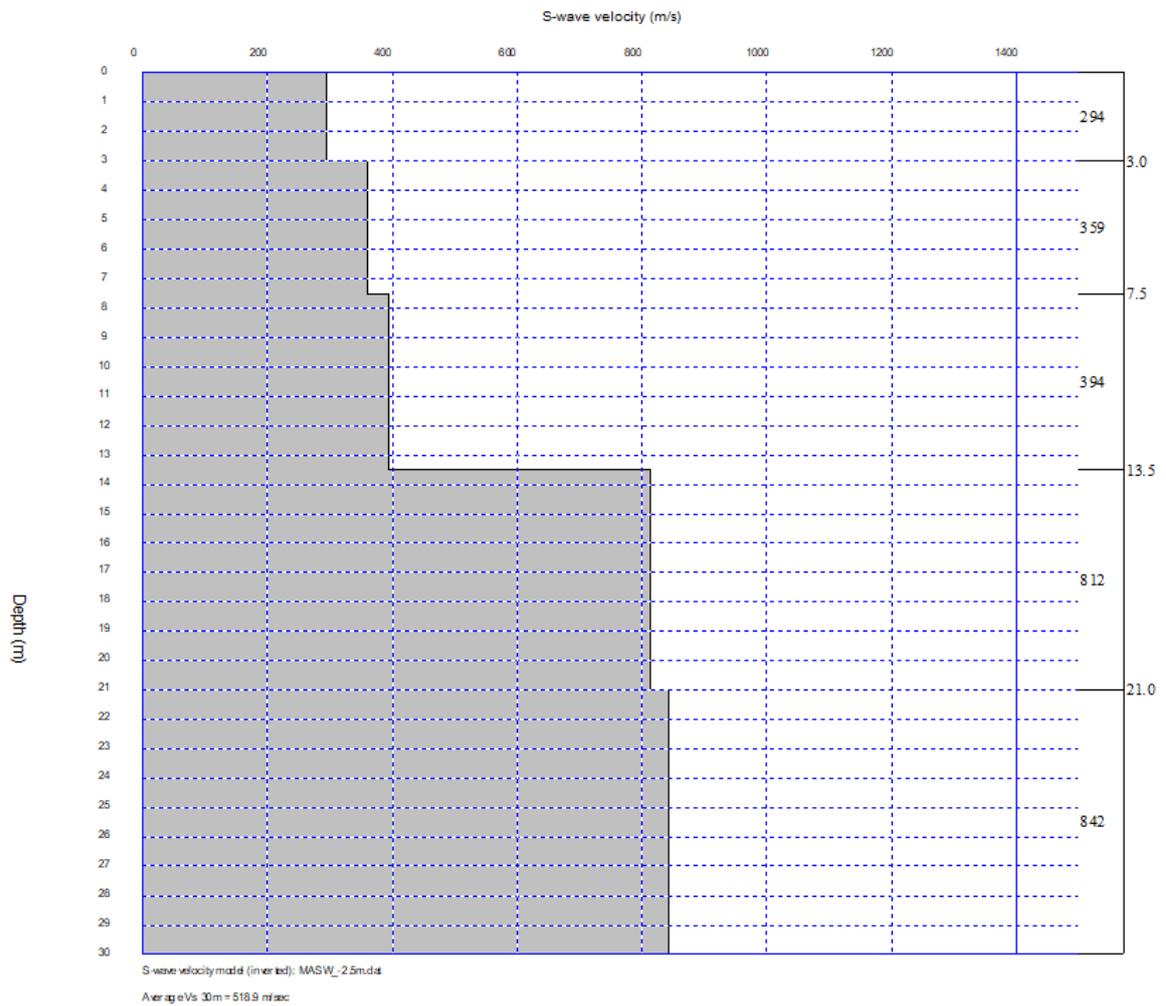
Curva Dispersione MASW



Curva Teorica e Sperimentale MASW



Profilo Vs MASW



Documentazione fotografica



Foto – Indagine sismica attiva MASW

SR_AULLA STAZIONE: SISMICA A RIFRAZIONE P-SH

Easy Refract

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda λ , comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde λ , equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

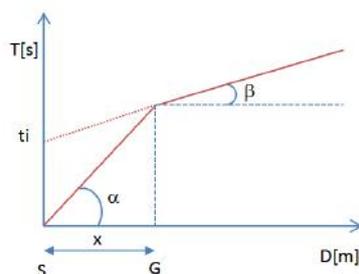
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

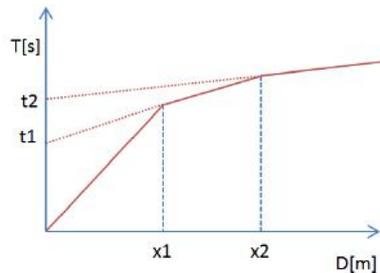
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

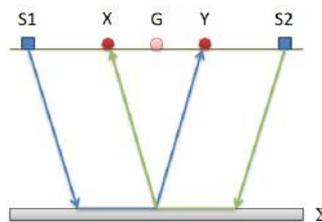


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

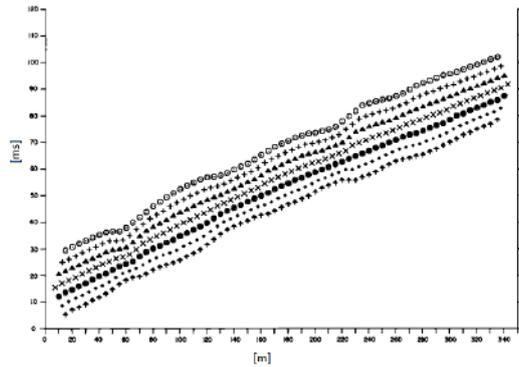
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare **la funzione velocità** secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



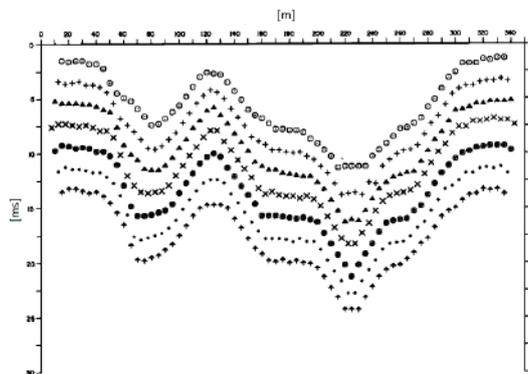
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_v è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_v viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifratore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°

Planimetria Scala 1:5000

Planimetria Scala 1:1000

Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 3 m

Lunghezza Stendimento (m): 69 m

Punti di energizzazione

	A Estremo SX	D1 Intermedio SX	D2 Intermedio SX	C Centrale	D3 Intermedio DX	D4 Intermedio SX	B Estremo DX
Posizione da Geofono G1 (m)	-15.0	-1.5	16.5	34.5	52.5	70.5	84

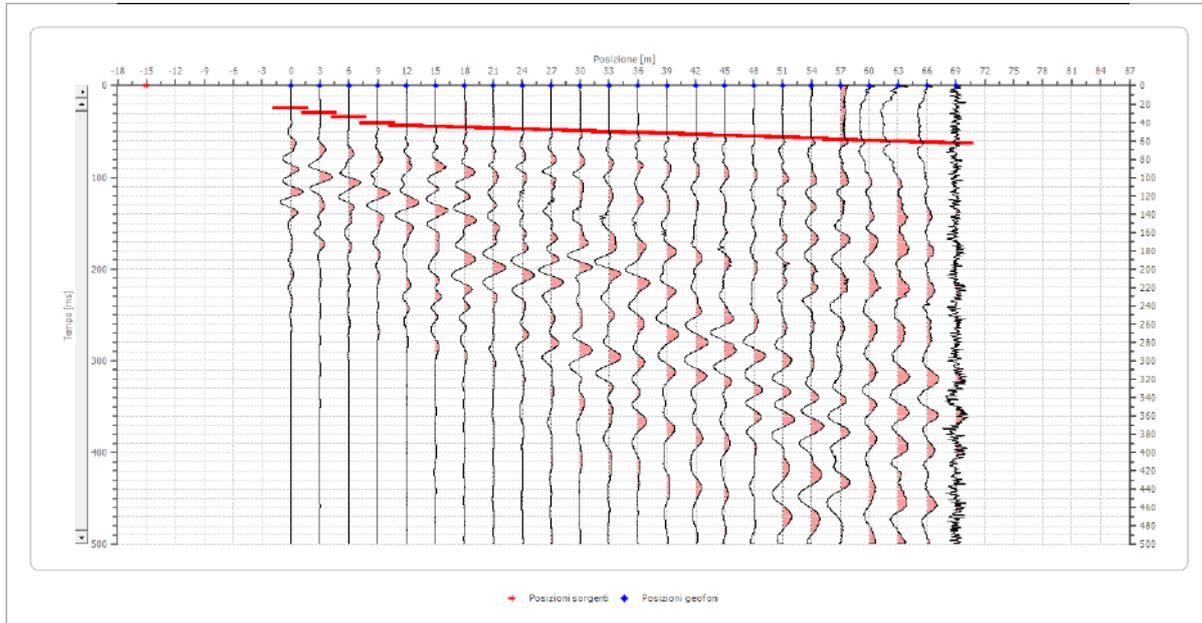
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	3.0	0.0
3	6.0	0.0
4	9.0	0.0
5	12.0	0.0
6	15.0	0.0
7	18.0	0.0
8	21.0	0.0
9	24.0	0.0
10	27.0	0.0
11	30.0	0.0
12	33.0	0.0
13	36.0	0.0
14	39.0	0.0
15	42.0	0.0
16	45.0	0.0
17	48.0	0.0
18	51.0	0.0
19	54.0	0.0
20	57.0	0.0
21	60.0	0.0
22	63.0	0.0
23	66.0	0.0
24	69.0	0.0

Dati battute

Battuta 1

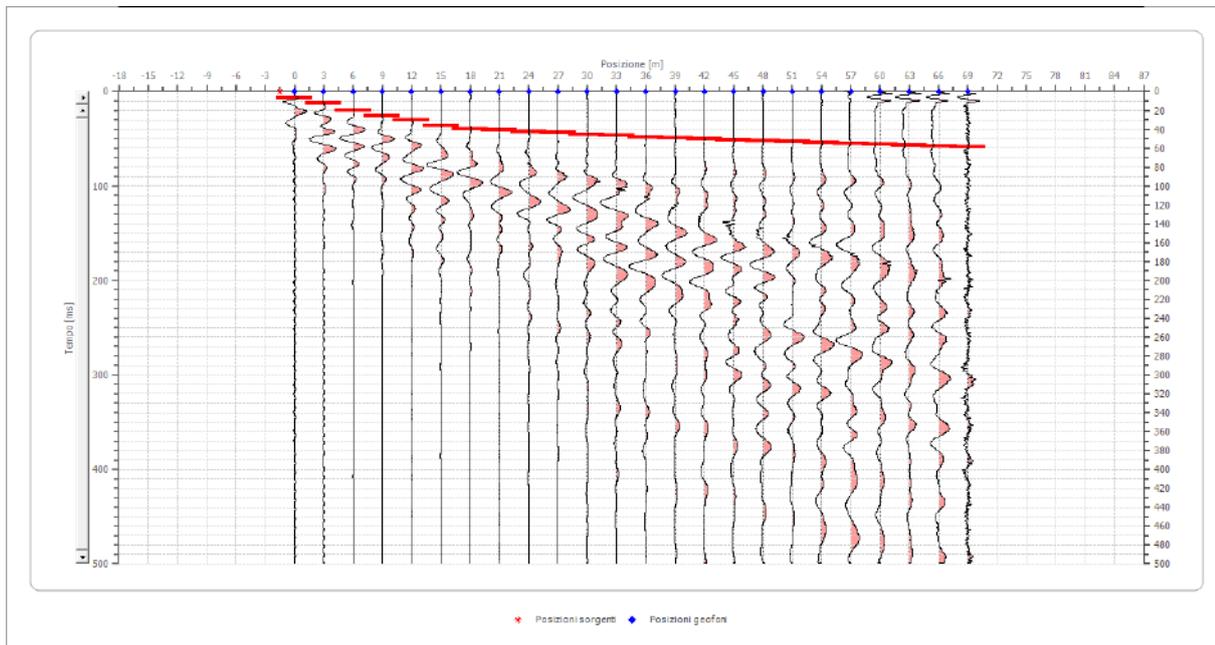
Posizione sorgente X -15 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	24.7272
3.0	29.4824
6.0	34.2376
9.0	40.8950
12.0	43.7481
15.0	44.6991
18.0	45.6502
21.0	46.6012
24.0	47.5523
27.0	48.5033
30.0	49.4544
33.0	50.4054
36.0	51.3565
39.0	52.3075
42.0	53.2586
45.0	54.2096
48.0	55.1607
51.0	56.1117
54.0	57.0627
57.0	58.9648
60.0	59.9159
63.0	60.8669
66.0	61.8180
69.0	62.7690

Battuta 2

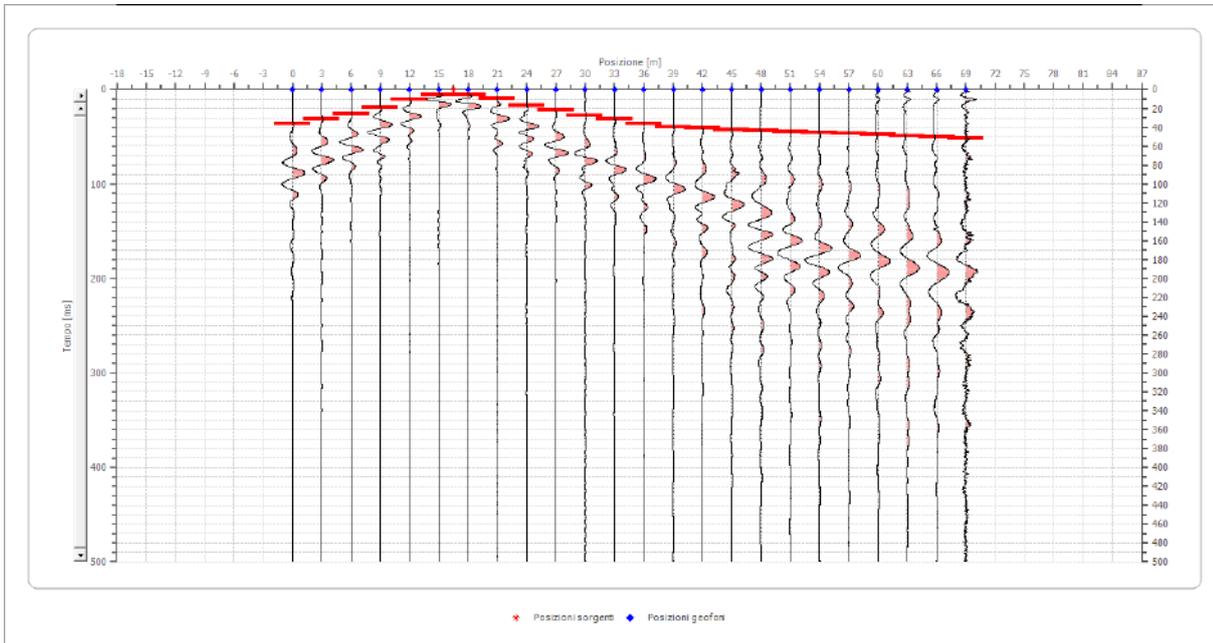
Posizione sorgente X -1.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	6.6573
3.0	12.3636
6.0	19.9720
9.0	25.6782
12.0	30.4335
15.0	36.1397
18.0	39.9439
21.0	40.8950
24.0	42.7971
27.0	43.7481
30.0	45.6502
33.0	46.6012
36.0	48.5033
39.0	49.4544
42.0	50.4054
45.0	51.3565
48.0	52.3075
51.0	53.2586
54.0	54.2096
57.0	55.1607
60.0	56.1117
63.0	57.0627
66.0	58.0138
69.0	58.9648

Battuta 3

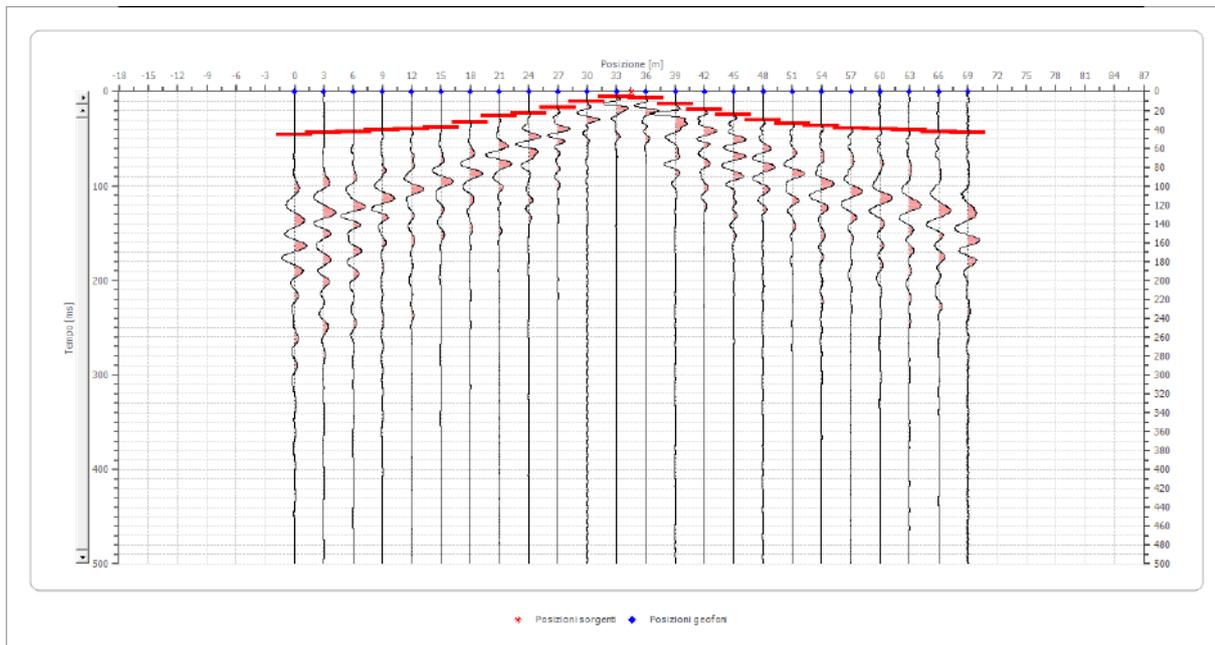
Posizione sorgente X 16.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	36.1397
3.0	31.3845
6.0	25.6782
9.0	19.0209
12.0	10.4615
15.0	5.7063
18.0	5.7063
21.0	9.5105
24.0	17.1188
27.0	21.8741
30.0	27.5803
33.0	31.3845
36.0	36.1397
39.0	39.9439
42.0	40.8950
45.0	42.7971
48.0	43.7481
51.0	44.6991
54.0	45.6502
57.0	46.6012
60.0	47.5523
63.0	49.4544
66.0	50.4054
69.0	51.3565

Battuta 4

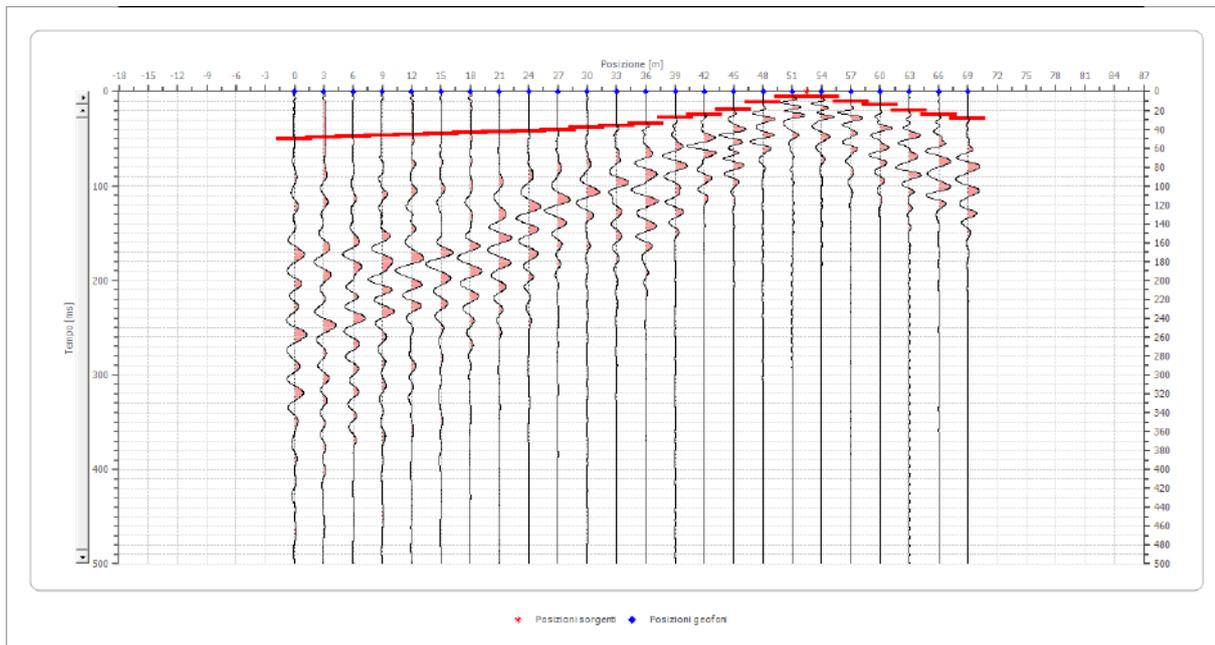
Posizione sorgente X 34.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	45.6502
3.0	43.7481
6.0	42.7971
9.0	40.8950
12.0	39.9439
15.0	38.0418
18.0	32.3356
21.0	25.6782
24.0	22.8251
27.0	17.1188
30.0	10.4615
33.0	5.7063
36.0	6.6573
39.0	13.3146
42.0	19.0209
45.0	24.7272
48.0	30.4335
51.0	34.2376
54.0	36.1397
57.0	38.9929
60.0	39.9439
63.0	40.8950
66.0	42.7971
69.0	43.7481

Battuta 5

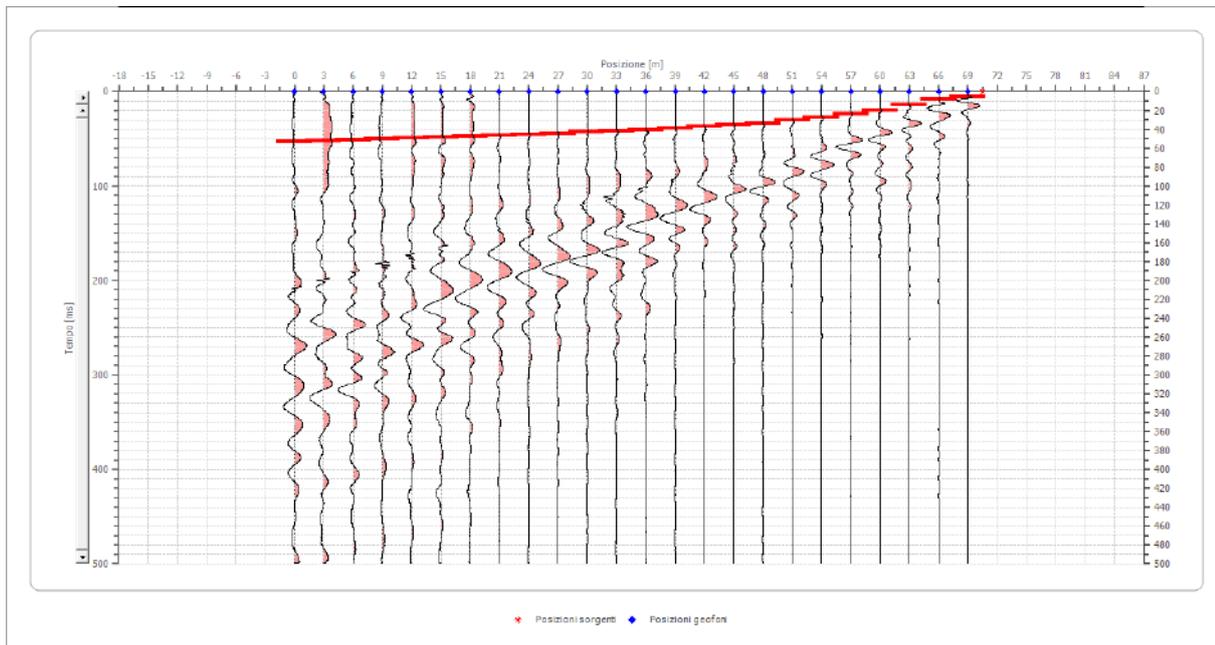
Posizione sorgente X 52.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	50.4054
3.0	48.5033
6.0	47.5523
9.0	46.6012
12.0	45.6502
15.0	44.6991
18.0	43.7481
21.0	42.7971
24.0	41.8460
27.0	40.8950
30.0	38.0418
33.0	36.1397
36.0	34.2376
39.0	27.5803
42.0	24.7272
45.0	19.0209
48.0	11.4125
51.0	5.7063
54.0	5.7063
57.0	10.4615
60.0	14.2657
63.0	19.9720
66.0	24.7272
69.0	28.5314

Battuta 6

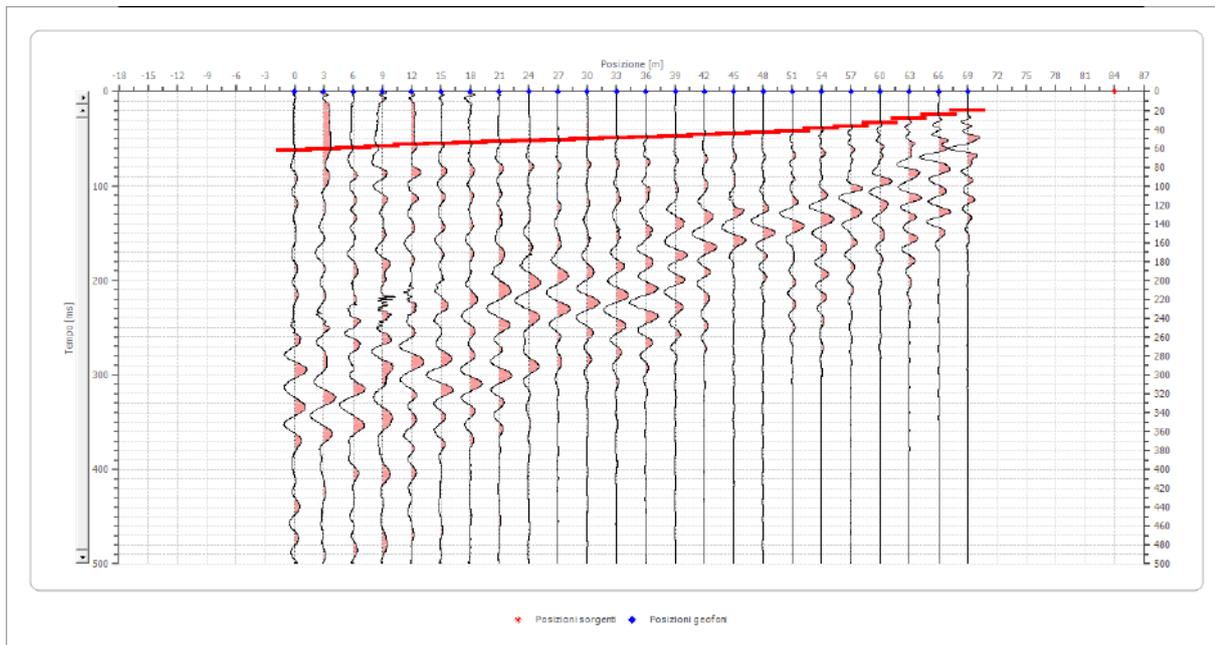
Posizione sorgente X 70.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	53.2586
3.0	52.3075
6.0	51.3565
9.0	50.4054
12.0	49.4544
15.0	48.5033
18.0	47.5523
21.0	46.6012
24.0	45.6502
27.0	44.6991
30.0	42.7971
33.0	41.8460
36.0	40.8950
39.0	38.9929
42.0	37.0908
45.0	35.1887
48.0	34.2376
51.0	30.4335
54.0	27.5803
57.0	23.7761
60.0	19.9720
63.0	14.2657
66.0	8.5594
69.0	5.7063

Battuta 7

Posizione sorgente X 84 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

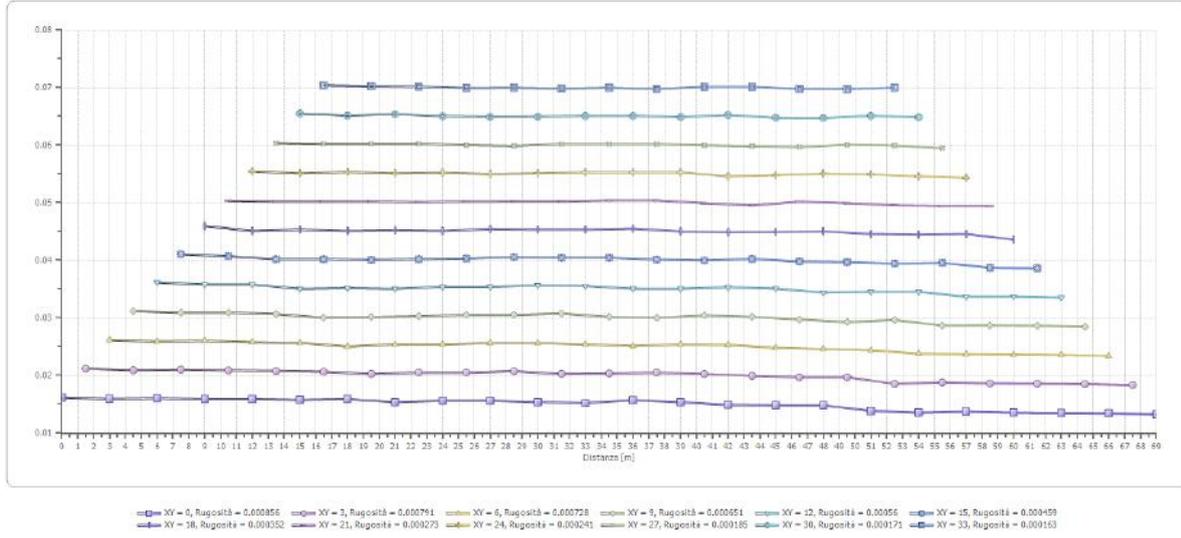
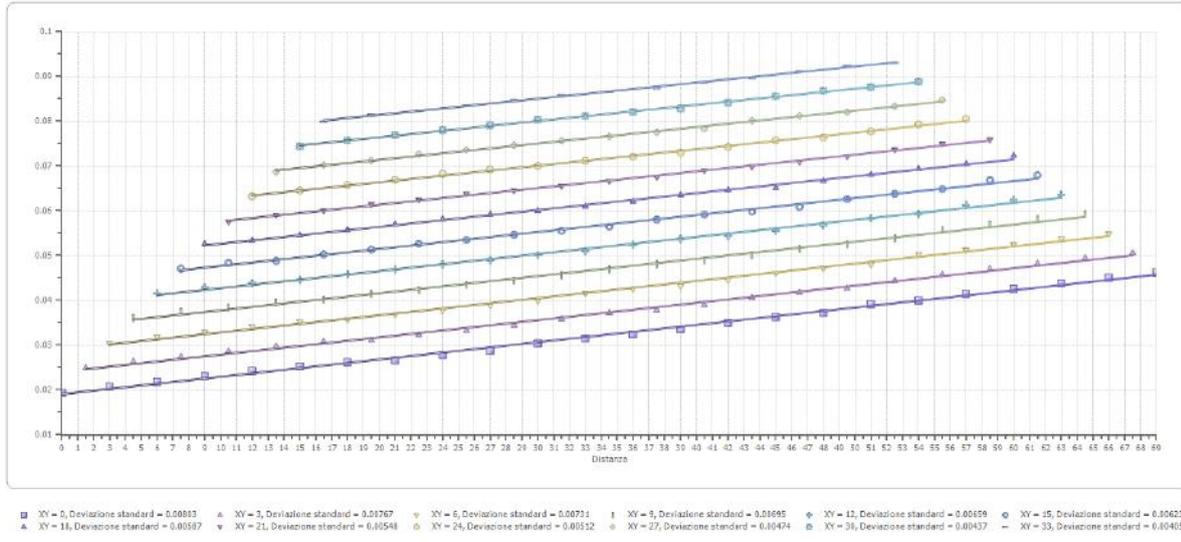


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	62.7690
3.0	60.8669
6.0	59.9159
9.0	58.0138
12.0	56.1117
15.0	55.1606
18.0	54.2096
21.0	53.2586
24.0	52.3075
27.0	51.3565
30.0	50.4054
33.0	49.4544
36.0	48.5033
39.0	47.5523
42.0	46.6012
45.0	45.6502
48.0	44.6991
51.0	43.7481
54.0	42.7970
57.0	41.8460
60.0	40.8950
63.0	39.9439
66.0	38.9929
69.0	38.0418
72.0	37.0908
75.0	36.1397
78.0	35.1887
81.0	34.2376
84.0	33.2866
87.0	32.3355

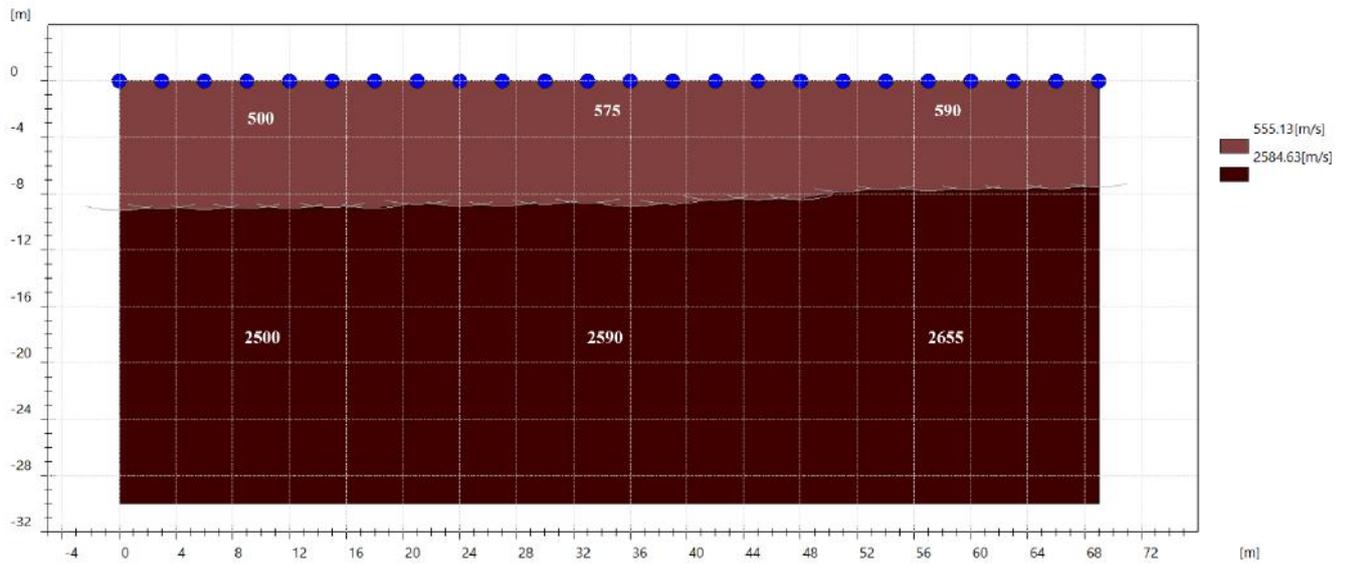
Interpretazione col metodo G.,R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	9.2	--
G= 3.0 [m]	9.0	--
G= 6.0 [m]	9.1	--
G= 9.0 [m]	9.0	--
G= 12.0 [m]	9.0	--
G= 15.0 [m]	9.0	--
G= 18.0 [m]	9.0	--
G= 21.0 [m]	8.7	--
G= 24.0 [m]	8.9	--
G= 27.0 [m]	8.9	--
G= 30.0 [m]	8.7	--
G= 33.0 [m]	8.6	--
G= 36.0 [m]	8.9	--
G= 39.0 [m]	8.7	--
G= 42.0 [m]	8.5	--
G= 45.0 [m]	8.4	--
G= 48.0 [m]	8.4	--
G= 51.0 [m]	7.9	--
G= 54.0 [m]	7.7	--
G= 57.0 [m]	7.8	--
G= 60.0 [m]	7.7	--
G= 63.0 [m]	7.7	--
G= 66.0 [m]	7.6	--
G= 69.0 [m]	7.5	--
Velocità [m/sec]	555.1	2584.6
Descrizione		



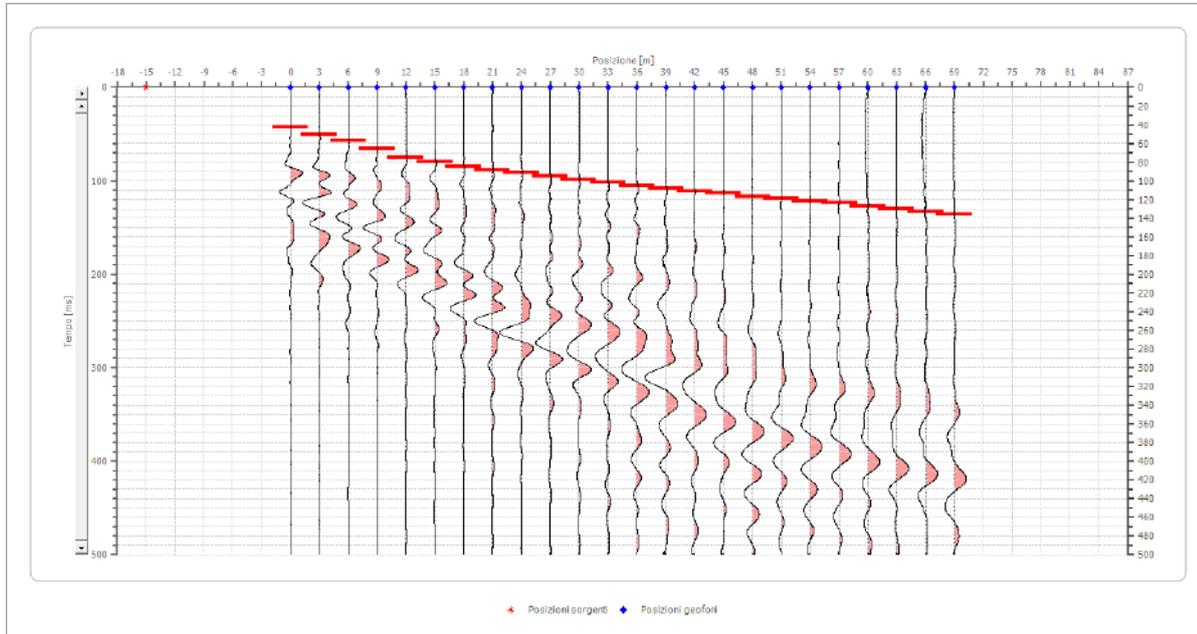
SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P



Dati battute – ONDE SH

Battuta 1

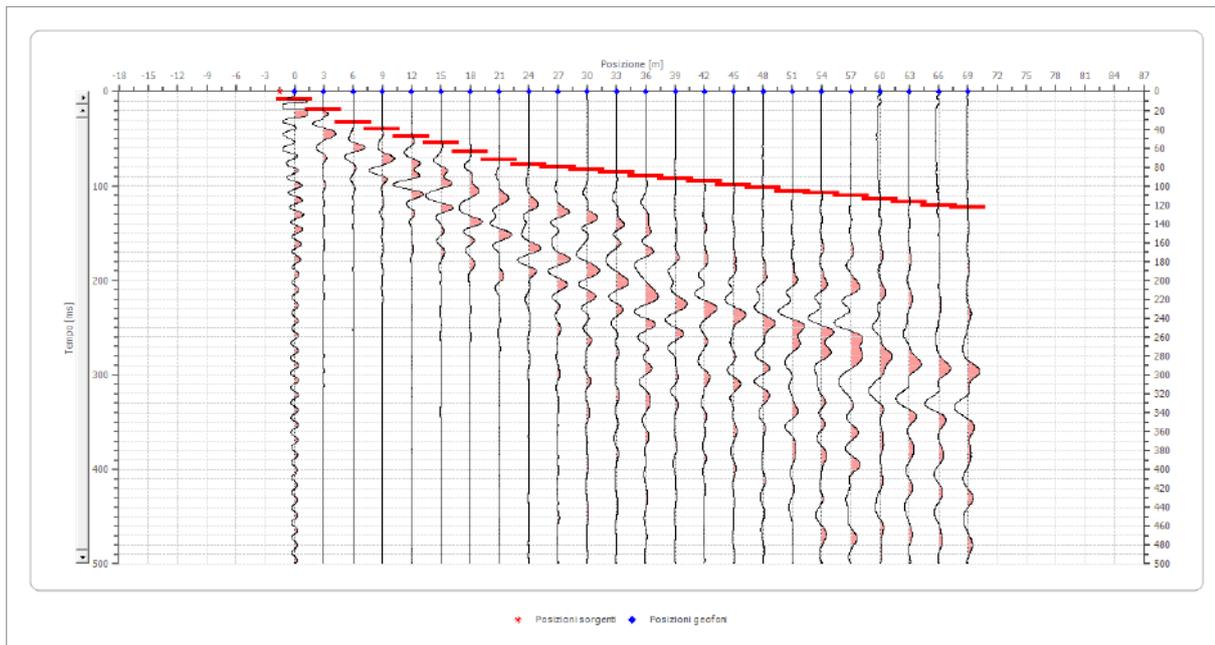
Posizione sorgente X -15 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	42.7971
3.0	50.4054
6.0	57.0627
9.0	65.6222
12.0	75.1326
15.0	79.8878
18.0	84.6431
21.0	88.4473
24.0	91.3004
27.0	95.1046
30.0	98.9088
33.0	101.7619
36.0	105.5661
39.0	108.4192
42.0	111.2723
45.0	113.1744
48.0	116.9786
51.0	118.8807
54.0	121.7339
57.0	123.6359
60.0	127.4401
63.0	130.2933
66.0	133.1464
69.0	135.9995

Battuta 2

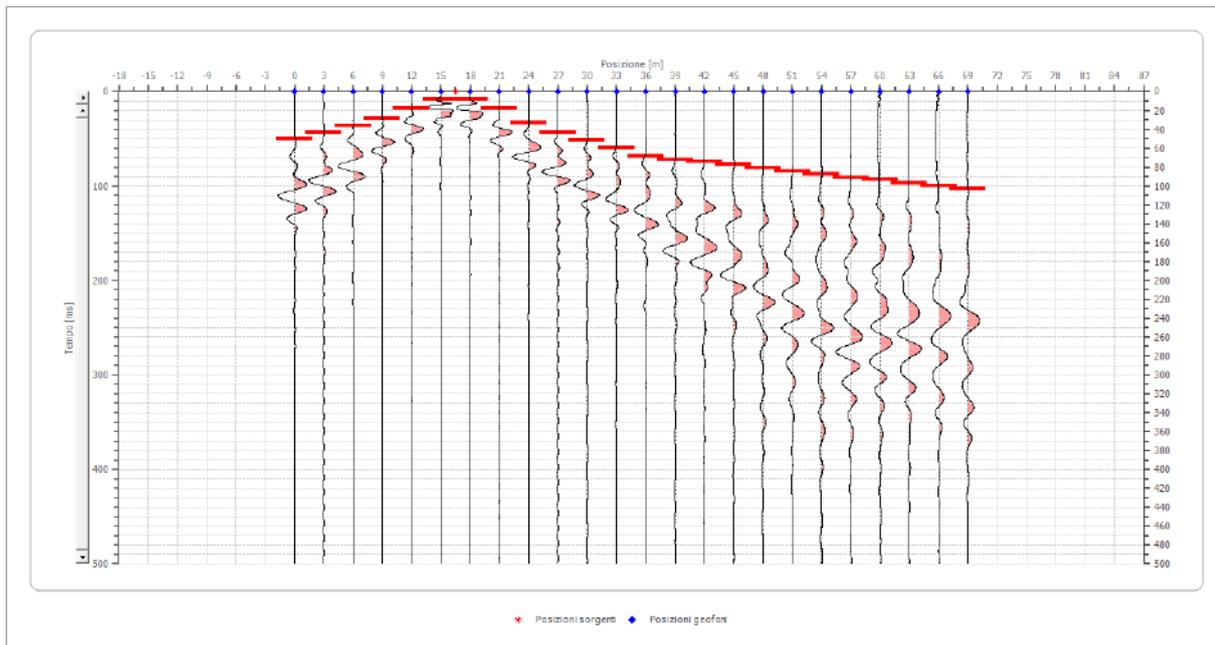
Posizione sorgente X -1.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	8.5594
3.0	19.0209
6.0	32.3356
9.0	39.9439
12.0	47.5523
15.0	54.2096
18.0	63.7201
21.0	72.2795
24.0	77.0347
27.0	79.8878
30.0	82.7410
33.0	85.5941
36.0	89.3983
39.0	92.2514
42.0	95.1046
45.0	98.9088
48.0	101.7619
51.0	105.5661
54.0	107.4682
57.0	110.3213
60.0	114.1255
63.0	116.9786
66.0	120.7828
69.0	122.6849

Battuta 3

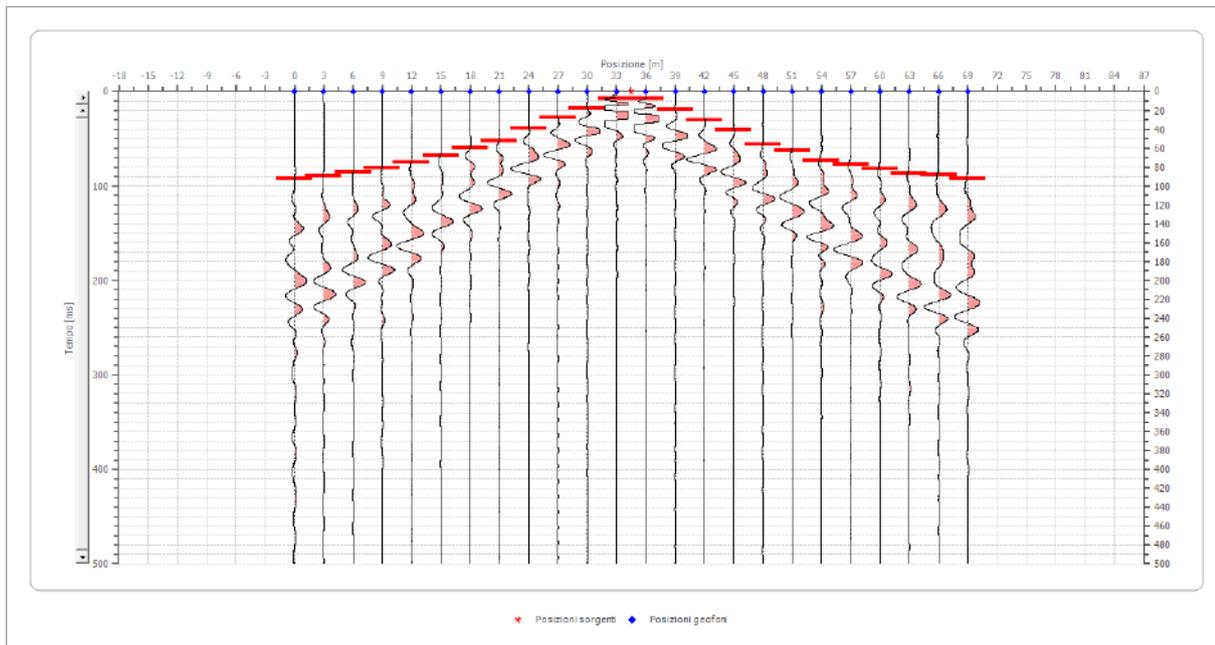
Posizione sorgente X 16.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	50.4054
3.0	43.7481
6.0	36.1397
9.0	28.5314
12.0	18.0699
15.0	8.5594
18.0	8.5594
21.0	18.0699
24.0	33.2866
27.0	43.7481
30.0	51.3565
33.0	59.9159
36.0	68.4753
39.0	72.2795
42.0	74.1816
45.0	77.0347
48.0	80.8389
51.0	84.6431
54.0	87.4962
57.0	91.3004
60.0	93.2025
63.0	97.0067
66.0	99.8598
69.0	102.7129

Battuta 4

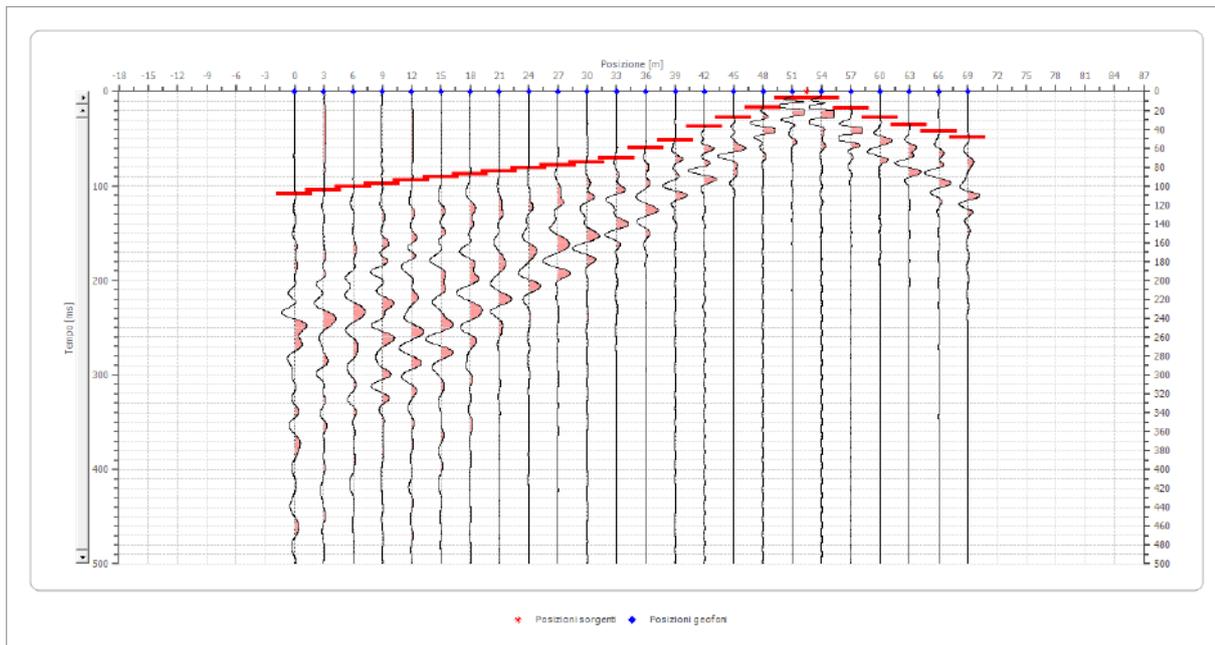
Posizione sorgente X 34.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	92.2514
3.0	89.3983
6.0	85.5941
9.0	80.8389
12.0	75.1326
15.0	67.5242
18.0	59.9159
21.0	52.3075
24.0	38.9929
27.0	27.5803
30.0	18.0699
33.0	7.6084
36.0	7.6084
39.0	19.0209
42.0	30.4335
45.0	40.8950
48.0	56.1117
51.0	62.7690
54.0	73.2305
57.0	77.0347
60.0	81.7899
63.0	86.5452
66.0	88.4473
69.0	92.2514

Battuta 5

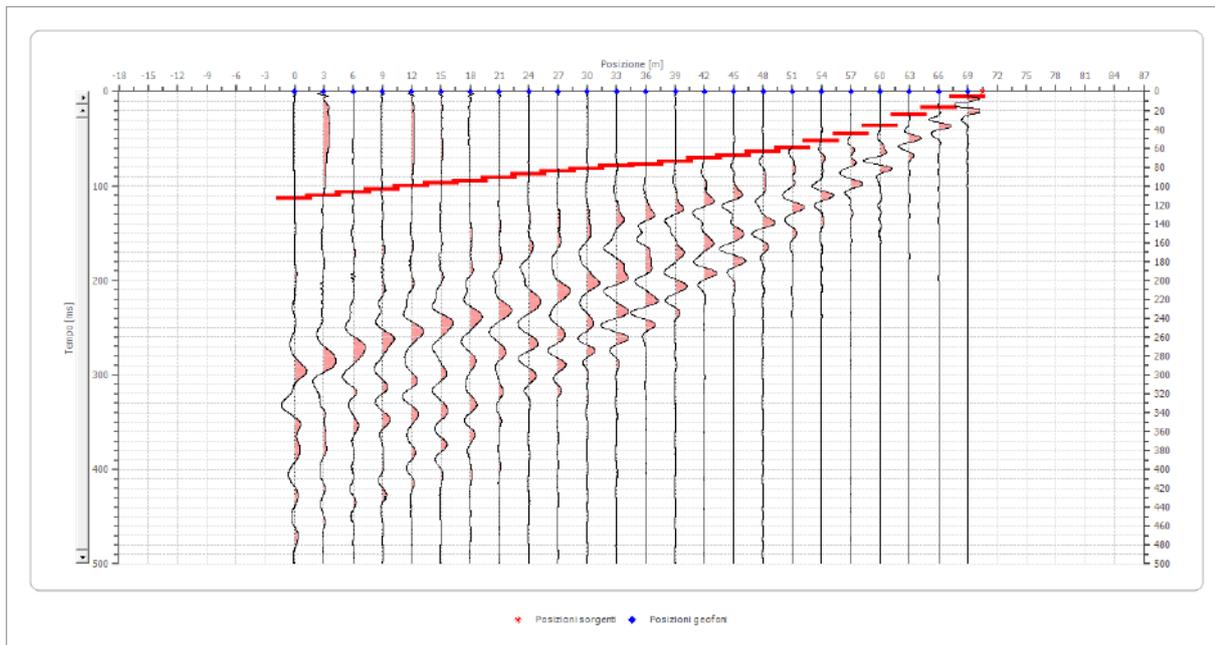
Posizione sorgente X 52.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	108.4192
3.0	104.6150
6.0	100.8108
9.0	97.9577
12.0	94.1535
15.0	90.3493
18.0	87.4962
21.0	84.6431
24.0	80.8389
27.0	77.9857
30.0	75.1326
33.0	70.3774
36.0	59.9159
39.0	51.3565
42.0	37.0908
45.0	27.5803
48.0	17.1188
51.0	6.6573
54.0	6.6573
57.0	18.0699
60.0	27.5803
63.0	35.1887
66.0	41.8460
69.0	48.5033

Battuta 6

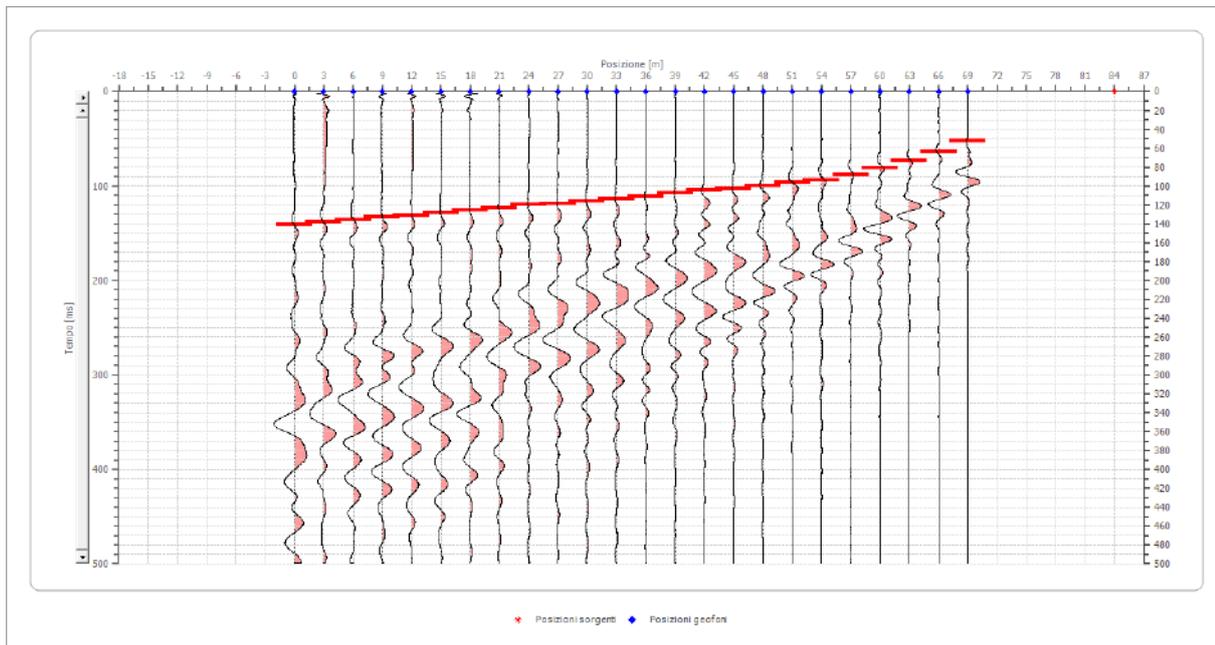
Posizione sorgente X 70.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	113.1744
3.0	110.3213
6.0	106.5171
9.0	103.6640
12.0	99.8598
15.0	97.0067
18.0	95.1046
21.0	91.3004
24.0	87.4962
27.0	84.6431
30.0	81.7899
33.0	78.9368
36.0	77.0347
39.0	74.1816
42.0	70.3774
45.0	67.5242
48.0	63.7201
51.0	59.9159
54.0	52.3075
57.0	44.6991
60.0	36.1397
63.0	24.7272
66.0	17.1188
69.0	5.7063

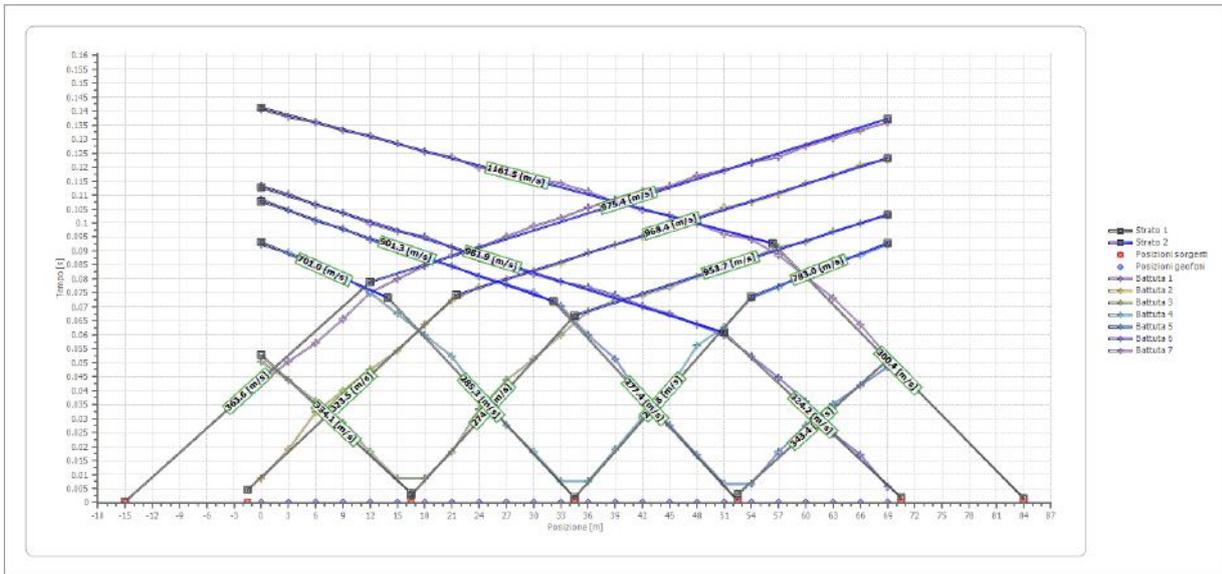
Battuta 7

Posizione sorgente X 84 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

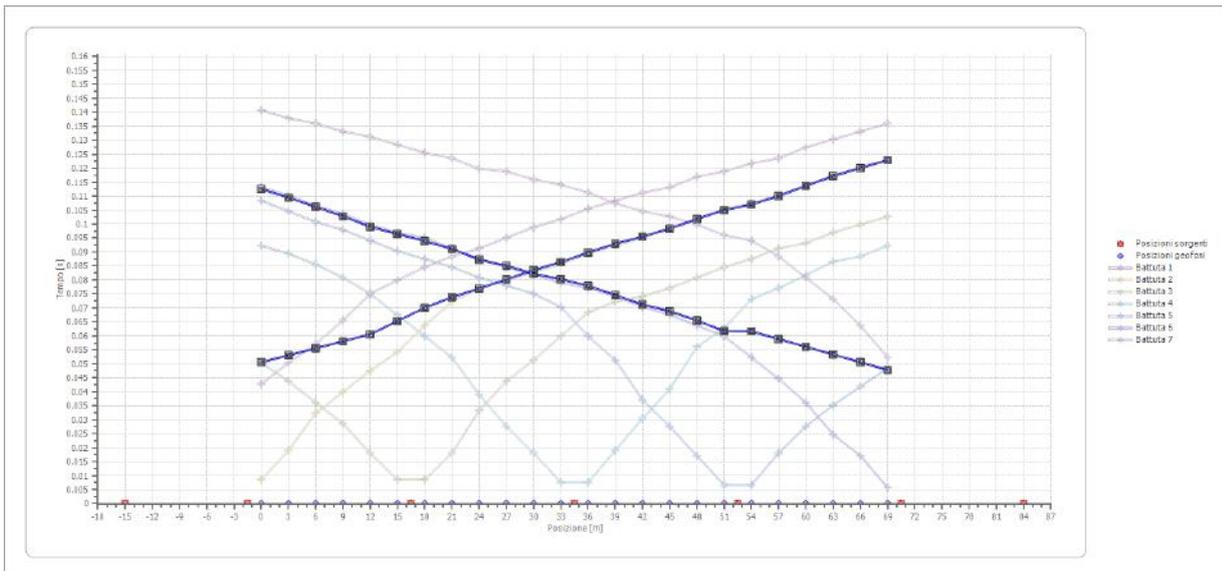


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	140.7548
3.0	137.9016
6.0	135.9995
9.0	133.1464
12.0	131.2443
15.0	128.3912
18.0	125.5380
21.0	123.6359
24.0	119.8318
27.0	118.8807
30.0	116.0276
33.0	114.1255
36.0	111.2723
39.0	107.4682
42.0	104.6150
45.0	102.7129
48.0	99.8598
51.0	96.0556
54.0	94.1535
57.0	88.4473
60.0	80.8389
63.0	73.2305
66.0	63.7201
69.0	52.3075

Dromocrone



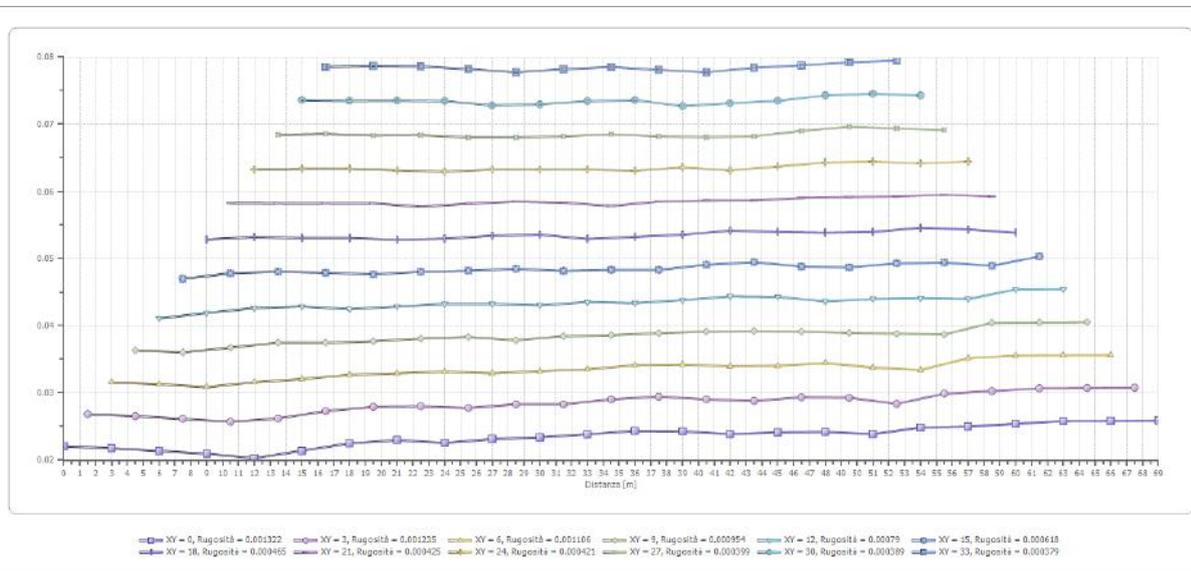
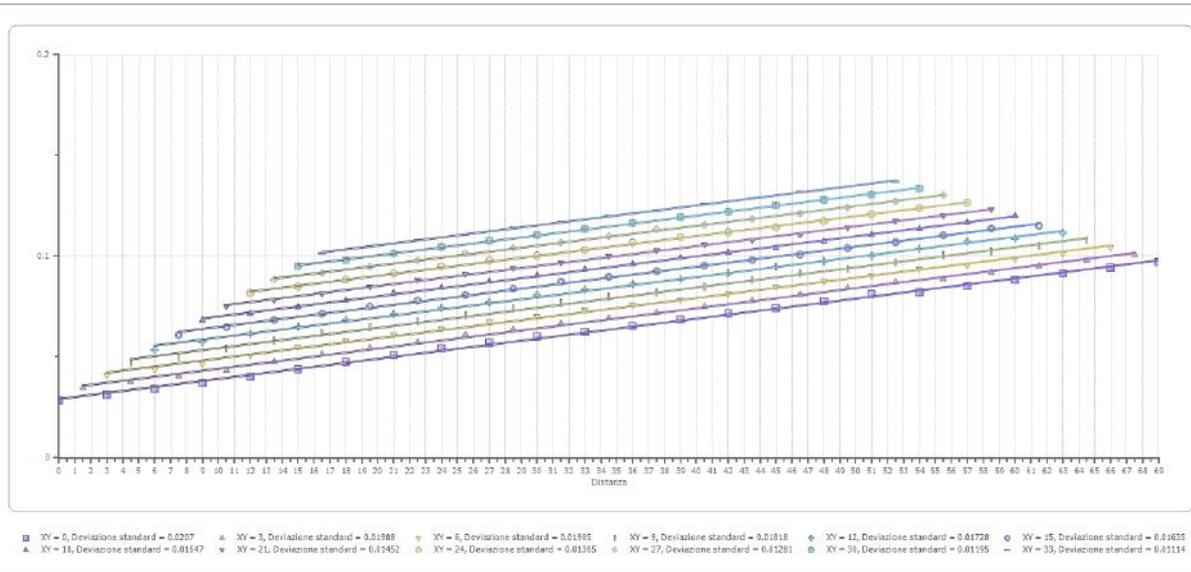
Dromocrone traslate



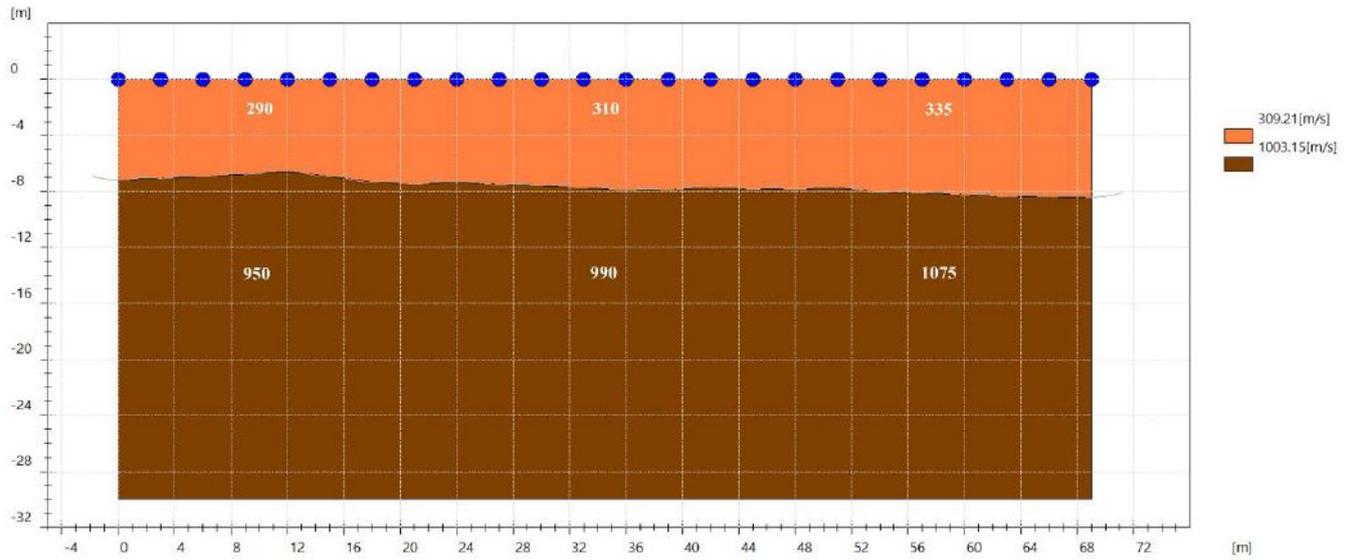
Interpretazione col metodo G.,R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	7.2	--
G= 3.0 [m]	7.1	--
G= 6.0 [m]	6.9	--
G= 9.0 [m]	6.8	--
G= 12.0 [m]	6.6	--
G= 15.0 [m]	7.0	--
G= 18.0 [m]	7.3	--
G= 21.0 [m]	7.5	--
G= 24.0 [m]	7.3	--
G= 27.0 [m]	7.5	--
G= 30.0 [m]	7.6	--
G= 33.0 [m]	7.7	--
G= 36.0 [m]	7.9	--
G= 39.0 [m]	7.9	--
G= 42.0 [m]	7.8	--
G= 45.0 [m]	7.8	--
G= 48.0 [m]	7.9	--
G= 51.0 [m]	7.8	--
G= 54.0 [m]	8.1	--
G= 57.0 [m]	8.1	--
G= 60.0 [m]	8.3	--
G= 63.0 [m]	8.4	--
G= 66.0 [m]	8.4	--
G= 69.0 [m]	8.4	--
Velocità [m/sec]	309.2	1003.1
Descrizione		



SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH



- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE SISMICA DOWN - HOLE**

MISURE DOWN HOLE

Interpretazione delle misure

Dati iniziali

Offset scoppio [m]	Numero di ricezioni	Posizione primo geofono [m]	Interdistanza [m]
3	15	1	1

Dati misure down hole

Registrazioni Nr.	Z [m]	Tp [msec]	Ts [msec]
1	1	7.1	12.9
2	2	7.9	16.7
3	3	8.7	19.9
4	4	9.9	22.1
5	5	10.3	23.6
6	6	10.6	25.8
7	7	11.3	28
8	8	11.9	30.6
9	9	12.7	33.4
10	10	13.1	35.9
11	11	13.6	36.9
12	12	14	38.4
13	13	14.3	39.1
14	14	14.7	40
15	15	14.9	41.3

Risultati

SR [m]	T _{pcorr} [msec]	T _{scorr} [msec]
3.1623	2.2452	4.0793
3.6056	4.3821	9.2635
4.2426	6.1518	14.0714
5.0000	7.9200	17.6800
5.8310	8.8322	20.2368
6.7082	9.4809	23.0762
7.6158	10.3863	25.7361
8.5440	11.1423	28.6517
9.4868	12.0483	31.6860
10.4403	12.5475	34.3860
11.4018	13.1208	35.5998
12.3693	13.5820	37.2535
13.3417	13.9338	38.0987
14.3178	14.3737	39.1121
15.2971	14.6107	40.4980

Metodo diretto

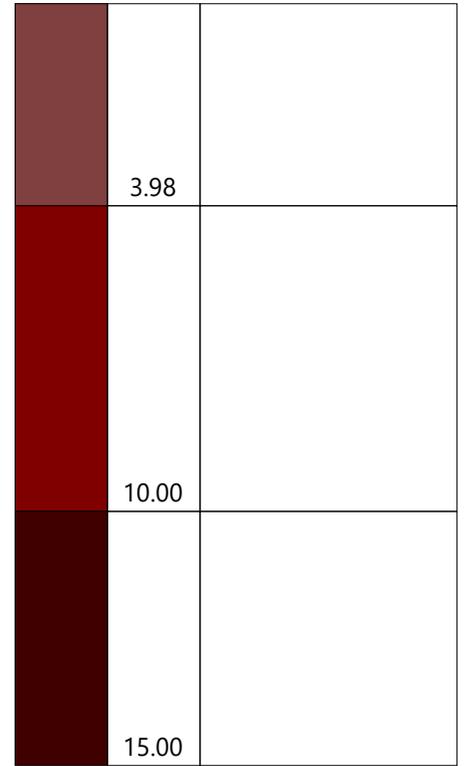
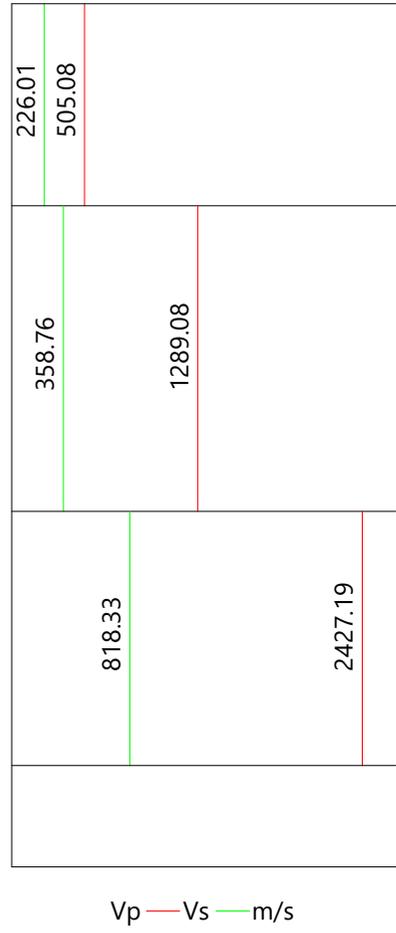
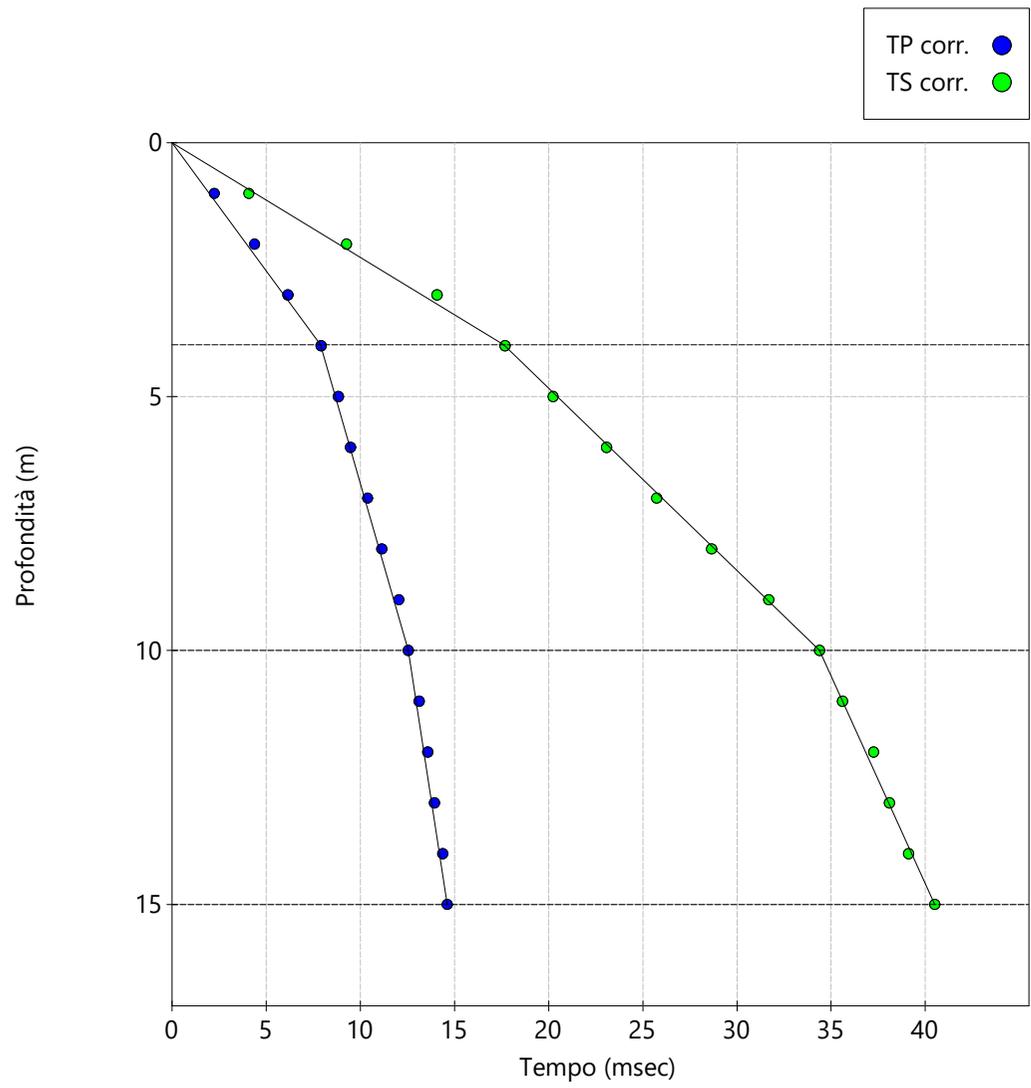
Profondità di riferimento: 10 m
 VS,eq: 290.78 m/s

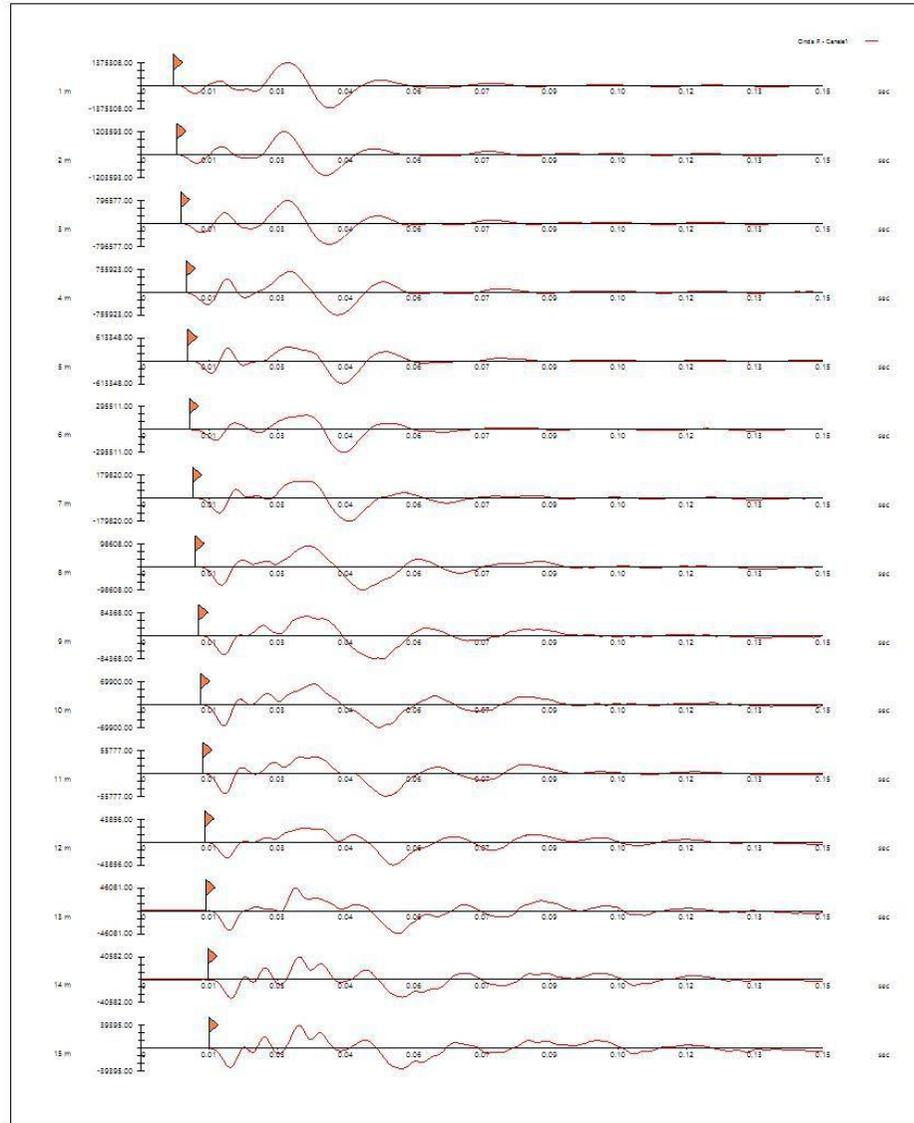
Sismostrati con metodo diretto

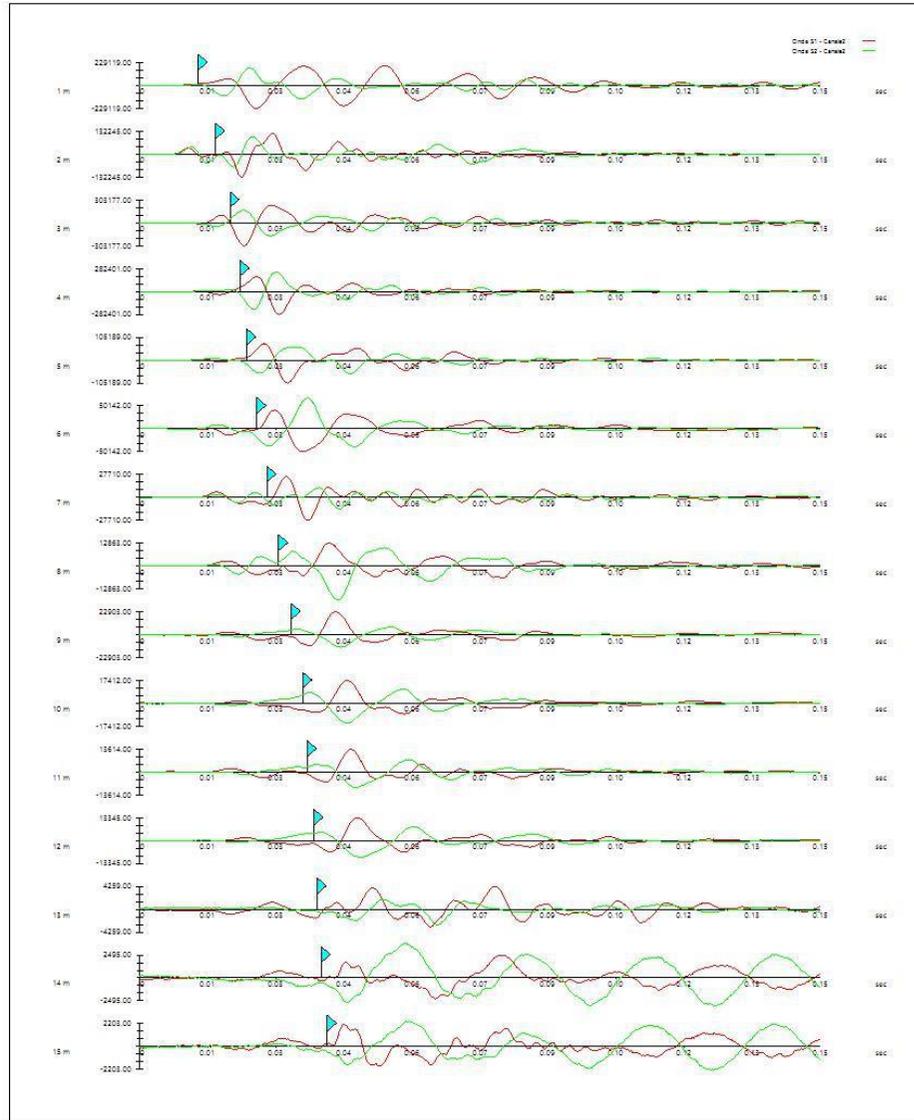
Strato Nr.	DB	Descrizione (-)	Profondità (m)	Colore/ Retino	T _p corr. sism. (msec)	T _s corr. sism. (msec)
1			3.98		7.88	17.61
2			10		12.55	34.39
3			15		14.61	40.5

Valori medi

V _p medio (m/s)	V _s medio (m/s)	g medio (kN/mc)	n _i medio	G medio (MPa)	E _d medio (MPa)	E medio (MPa)	E _v medio (MPa)
505.08	226.01	19.11	0.37	99.53	497.09	273.68	364.38
1289.08	358.76	20.46	0.46	268.5	3466.54	782.96	3108.54
2427.19	818.33	22.85	0.44	1560.55	13728.58	4481.51	11647.85







Documentazione fotografica



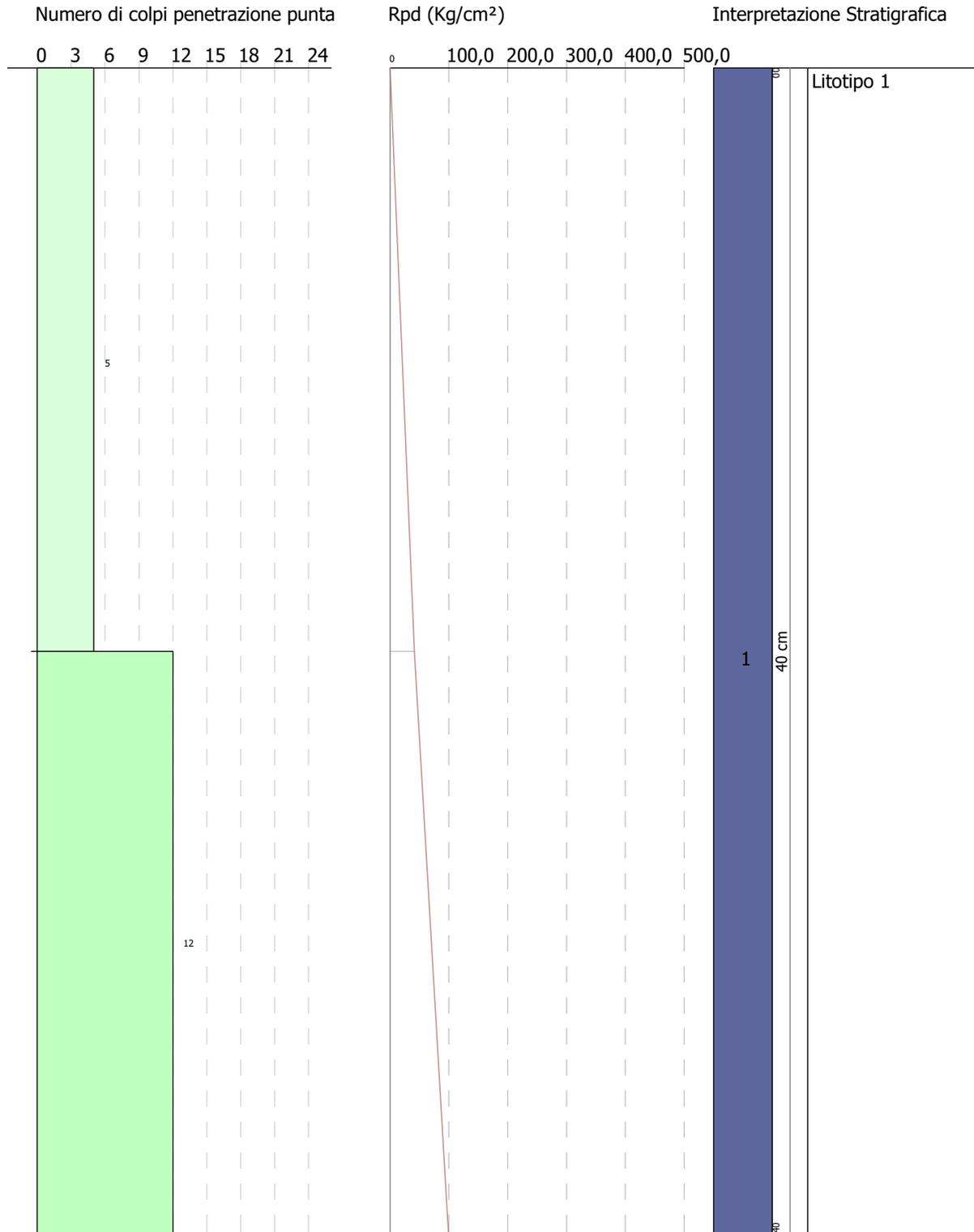
Foto – Indagine sismica attiva Down-Hole (DH)

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.1_aulla
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente:
Descrizione:
Localita':

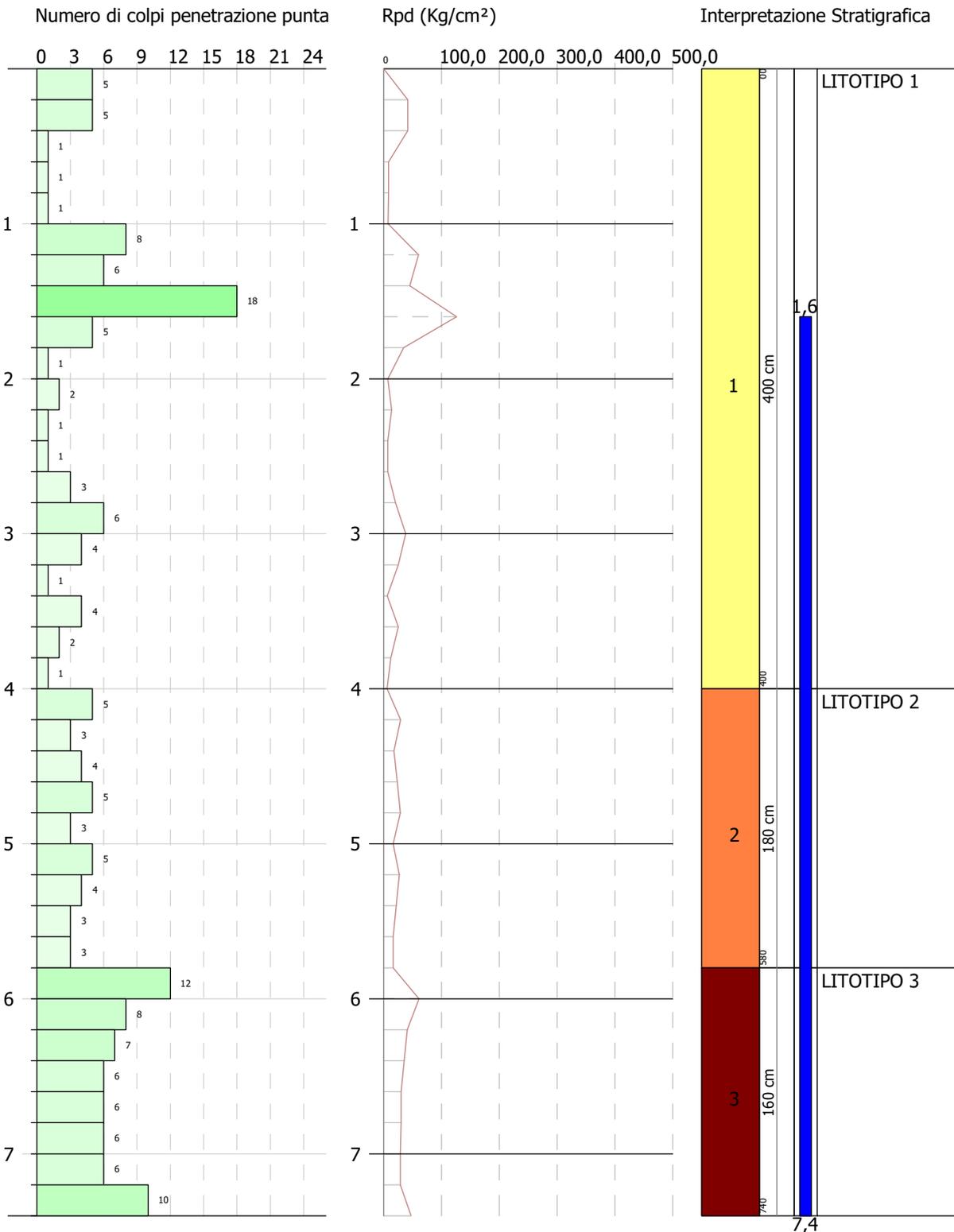
30/10/2024

Scala 1:2



SIGNATURE 1

SIGNATURE 2



SIGNATURE 1

SIGNATURE 2

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA Nr.1_aulla

TERRENI INCOERENTI

Densita' relativa

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Densita' relativa (%)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Meyerhof (1957)	87,48

Angolo di resistenza al taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Peck-Hanson-T hornburn-Meyer hof (1956)	30,65

Modulo di Young

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Schultze-Menze nbach Limo siltoso e sabbia limosa	77,12

Modulo Edometrico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Menzenbach e Malcev	83,24

Classificazione AGI

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Classificazione AGI
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Classificazione A.G.I. (1977)	MODERATAM ENTE ADDENSATO

Peso unita' di volume

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unita' di Volume (t/m ³)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,51

Peso unita' di volume saturo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unita' Volume Saturo (t/m ³)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,94

Modulo di Poisson

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Poisson
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	A.G.I.	0,33

Modulo di deformazione a taglio dinamico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	G (Kg/cm ²)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Robertson e Campanella (1983)	592,93

Velocita' onde di taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Velocita' onde di taglio (m/s)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Ohta & Goto (1978) Limi	77,92

Coefficiente spinta a Riposo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	K0
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Navfac (1971-1982)	2,68

Qc (Resistenza punta Penetrometro Statico)

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Qc (Kg/cm ²)
Strato (1) Litotipo 1	12,78	0.00-0,40	12,78	Robertson 1983	25,56

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA Nr.2_aulla

TERRENI COESIVI

Coesione non drenata

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Cu (Kg/cm ²)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Terzaghi-Peck	0,4
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Terzaghi-Peck	0,77

Qc (Resistenza punta Penetrometro Statico)

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Qc (Kg/cm ²)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Robertson (1983)	8,78
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Robertson (1983)	17,19

Modulo Edometrico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Eed (Kg/cm ²)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Buisman-Sanglerat	29,25
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Buisman-Sanglerat	85,95

Modulo di Young

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Ey (Kg/cm ²)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	D'Appollonia ed altri 1983	58,5
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	D'Appollonia ed altri 1983	114,6

Classificazione AGI

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	A.G.I. (1977)	MODERAT. CONSISTENTE
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE

Peso unita' di volume

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unita' di volume
-------------	------	---------------------	--------------	--------------------------

				(t/m ³)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Meyerhof	1,8
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Meyerhof	2,01

Peso unita' di volume saturo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unita' di volume saturo (t/m ³)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Meyerhof	1,89
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Meyerhof	2,21

Velocita' onde di taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Velocita' onde di taglio (m/s)
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	Ohta & Goto (1978) Argille limose e argille di bassa plasticità	126,2
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	Ohta & Goto (1978) Argille limose e argille di bassa plasticità	150,15

TERRENI INCOERENTI

Densita' relativa

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Densita' relativa (%)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Meyerhof (1957)	50,56
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Meyerhof (1957)	45,52
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Meyerhof (1957)	59,62

Angolo di resistenza al taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Peck-Hanson-T hornburn-Meyerhof (1956)	28,63
Strato (2)	5,85	4,00-5,80	5,85	Peck-Hanson-T	28,67

LITOTIPO 2				hornburn-Meyerhof (1956)	
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Peck-Hanson-T hornburn-Meyerhof (1956)	30,27

Modulo di Young

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Schultze-Menzelbach Limo siltoso e sabbia limosa	36,18
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Schultze-Menzelbach Limo siltoso e sabbia limosa	36,93
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Schultze-Menzelbach Limo siltoso e sabbia limosa	69,47

Modulo Edometrico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Menzenbach e Malcev	58,25
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Menzenbach e Malcev	58,71
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Menzenbach e Malcev	78,57

Classificazione AGI

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Classificazione AGI
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Classificazione A.G.I. (1977)	POCO ADDENSATO
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Classificazione A.G.I. (1977)	POCO ADDENSATO
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Classificazione A.G.I. (1977)	MODERATAMENTE ADDENSATO

Peso unita' di volume

Descrizione	NSPT	Prof. Strato	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unita' di
-------------	------	--------------	------------	--------------	----------------

		(m)			Volume (t/m ³)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,42
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,42
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,5

Peso unita' di volume saturo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unita' Volume Saturo (t/m ³)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,89
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,89
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,93

Modulo di Poisson

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Poisson
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	A.G.I.	0,34
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	A.G.I.	0,34
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	A.G.I.	0,33

Modulo di deformazione a taglio dinamico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	G (Kg/cm ²)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Robertson e Campanella (1983)	362,81
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Robertson e Campanella (1983)	367,83
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Robertson e Campanella (1983)	554,72

Velocita' onde di taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Velocita' onde di taglio (m/s)
-------------	------	---------------------	------------	--------------	--------------------------------------

Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Ohta & Goto (1978) Limi	105,74
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Ohta & Goto (1978) Limi	126,2
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Ohta & Goto (1978) Limi	150,15

Liquefazione

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Fs liquefazione
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Seed e Idriss (1971)	--
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Seed e Idriss (1971)	--
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Seed e Idriss (1971)	--

Coefficiente spinta a Riposo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	K0
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Navfac (1971-1982)	1,15
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Navfac (1971-1982)	1,18
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Navfac (1971-1982)	2,41

Qc (Resistenza punta Penetrometro Statico)

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Qc (Kg/cm ²)
Strato (1) LITOTIPO 1	5,72	0.00-4,00	5,72	Robertson 1983	11,44
Strato (2) LITOTIPO 2	5,85	4,00-5,80	5,85	Robertson 1983	11,70
Strato (3) LITOTIPO 3	11,46	5,80-7,40	11,46	Robertson 1983	22,92

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

TAV.01 - Ubicazione indagini

Scala 1:2.000

Legenda

 Prova Penetrometrica Dinamica Superpesante DPSH

 **MW** Prova sismica Attiva MASW - Passiva REMI

 **SR** Stesa a Rifrazione in Onde P-SH

 Misura di Microtremore Ambientale

 **DH** Prova in foro Down-Hole



Esecutori indagini geofisiche:
Dott. Geol. Cristian Pieroni
Dott. Geol. Francesco Puccetti



STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA ED AMBIENTALE

Dott. Geol. Emanuele Michelucci

N° 1682 Ordine Geologi Toscana

Via Palestro n.38/G, 55045 Marina di Pietrasanta (LU)

Cell. 380 2552689

E-mail: geol.michelucci@gmail.com

Pec: e.michelucci@pec.geologitoscana.net

C.F. MCHMNL80E29G628R - P.IVA 02240330460

Dott. Geol. Osvaldo Turba

N° 1690 Ordine Geologi Toscana

Fraz. Resceto n.24, 54100 Massa (MS)

Cell. 347 1657747

E-mail: o.turba80@gmail.com

Pec: osvaldoturba@pec.it

C.F. TRBSLD80E09F023Q - P.IVA 01360900458

All. 3

**LOG SONDAGGIO CAROTAGGIO CONTINUO /
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA CASSETTE CATALOGATRICI**

COMUNE DI AULLA

CANTIERE Unione dei Comuni della Lunigiana	SONDAGGIO N. SCC1	GEOLOGO DOTT. GEOL. EMANUELE MICHELUCCI	IMPRESA ESECUTRICE Soc. ECOCANTIERI srl
TIPO ATTIVITA' REALIZZAZIONE CENTRO INTERCOMUNALE DI PROTEZIONE CIVILE MULTIFUNZIONALE. LOCALITA' STAZIONE NUOVA IN AULLA (MS)	TIPO DI SONDA PACCHIOSI P-1000	DATA INIZIO/FINE inizio 27/08/2024, ore 8:00 - fine 27/08/2024, ore 17:00	PERFORATORE Renato Rijillo
SISTEMA DI PERFORAZIONE Carotaggio continuo	QUOTA ASS. P.C. 72.9 m s.l.m.	CAROTIERE Rivestimento (0 -14.5m), Semplice (14.5-15m)	PROFONDITA' RAGGIUNTA 15.0 metri
DIAMETRO CAROTIERE SEMPLICE Ø 101	DIAMETRO RIVESTIMENTO Ø 127	SOGGIACENZA DELLA FALDA Non rilevata	CASSETTE CATALOGATRICI N. 3

METRI	PROFONDITA' m da p.c.	SIMBOLOGIA STRATIGRAFICA	DESCRIZIONE DEI TERRENI ATTRAVERSATI ED INDICAZIONE DEGLI SPESSORI	SPT NUMERO COLPI N1 N2 N3	POCKET PENETROMETER Kg/cm ²	TORVANE Kg/cm ²	CAMPIONI		FALDA	INCLINOMETRO	CAROTAGGIO IN ROCCIA				GIORNI DI PERFORAZIONE	CAROTIERE	TUBAZIONE DOWN-HOLE								
							NUMERO	PROFONDITA'			R.Q.D. %	INCLINAZIONE LINEE DI FRATTURA	Descrizione delle discontinuità												
										0	100		Tipo	Forma e scabrezza	Riemplimento	Alterazione	1	2	3	4					
	0,35		Pavimentazione stradale + soletta in c.a.																						
1				SPT1 15 37 / 11																					
2			Limo sabbioso e argilloso di colore beige con rari elementi litici poligenici, eterometrici e arrotondati / spigolosi (diametro massimo 1/2cm)	SPT2 2 2 / 3																					
3	3,15																								
4				SPT3 3 3 / 5																					
5			Sabbia limosa argillosa di colore grigio con rari elementi litici poligenici, eterometrici e arrotondati / spigolosi (diametro massimo 1/2cm)	SPT4 16 15 / 19																					
6	6,00																								
7			Ghiaia poligenica in matrice limo sabbiosa e argillosa (elementi arrotondati di diametro massimo 2 / 3cm) di colore grigio scuro; matrice sostenuta.	SPT5 18 25 / 27																					
8	8,00																								
9																									
10				SPT6 25 RIFIUTO																					
11																									
12			Argilla compatta, con caratteristiche litoidi, di colore grigio variabile da chiaro a scuro																						
13				SPT7 RIFIUTO																					
14																									
15	15,00																								

FINE SONDAGGIO

Semplice

Rivestimento

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA CASSETTE CATALOGATRICI



Foto n.1 - Immagine cassetta catalogatrice n.1, sondaggio a carotaggio continuo SCC1 (Profondità da p.c.: 0.0 ÷ 5.0m).



Foto n.2 - Immagine cassetta catalogatrice n.2, sondaggio a carotaggio continuo SCC1 (Profondità da p.c.: 5.0 ÷ 10.0m).



Foto n.3 - Immagine cassetta catalogatrice n.3, sondaggio a carotaggio continuo SCC1 (Profondità da p.c.: 10.0 ÷ 15.0m).