



Regione Lombardia  
Direzione Generale Infrastrutture e Opere Pubbliche



CODICE  
COMMESSA

LIVELLO  
PROGETTAZIONE

D.P.R.  
207/10

PROGRESSIVO  
ELABORATO

CATEGORIA  
OPERA

NUMERO  
OPERA

REVISIONE

SCALA

R 3 1

D

b

0 0 2

O V

0 1

R 0

===

OPERE SOSTITUTIVE P.L. DI VIA TRIESTE IN COMUNE DI ERBA  
OPERE DI COMPETENZA FERROVIENORD  
*Progetto Definitivo*

RELAZIONI TECNICHE E RELAZIONI SPECIALISTICHE  
RELAZIONE GEOLOGICA  
Lotto 1

Revisioni		Data	Descrizione	Redatto	Controllato
	3		-		
	2		-		
	1		-		
	0	Ott. 2025	PRIMA EMISSIONE		

NORD\_ING

**NORD\_ING Srl**  
IL DIRETTORE TECNICO  
Ing. Laura Stiriti

FERROVIENORD

**FERROVIENORD S.p.A.**  
DIREZIONE SVILUPPO INFRASTRUTTURA  
IL DIRETTORE  
Ing. Andrea Lucia Passarelli

Progettista



Collaborazione

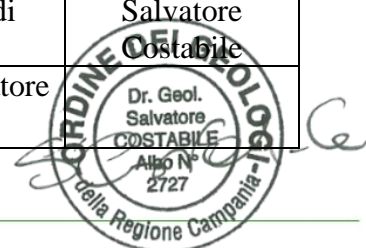


Via Squero, 12 - 35043 Monselice (PD)



REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	DATA
CODICE ARCHIVIO COLLABORATORE			AGG.

		<b>NORD_ING</b> GRUPPO FNM																		
<p align="center">OPERE SOSTITUTIVE P.L. DI VIA TRIESTE IN COMUNE DI ERBA. OPERE DI COMPETENZA FERROVIENORD – AREA 1</p>																				
<p align="center"><b>Il R.u.p.</b> Ing. Luca Candida</p>		<p align="center"><b>Responsabile Operativo</b> Ing. Rosangela Graglia</p>																		
<p align="center"><b>RELAZIONE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA</b></p>																				
<p align="center">NORD_ING – ERBA (CO)</p>																				
<p align="center">CODICE PROGETTO</p> <table border="1"> <tr> <td>I</td><td>_</td><td>N</td><td>I</td><td>S</td><td>_</td><td>0</td><td>5</td><td>3</td><td>_</td><td>2</td><td>2</td> </tr> </table>		I	_	N	I	S	_	0	5	3	_	2	2	<p align="center">DATA</p> <table border="1"> <tr> <td>01/12/2022</td> </tr> </table>	01/12/2022	<p align="center">REVISIONE</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>1</td> </tr> </table>	0	1	<p align="center">PAGINE</p> <table border="1"> <tr> <td>126</td> </tr> </table>	126
I	_	N	I	S	_	0	5	3	_	2	2									
01/12/2022																				
0	1																			
126																				
<p align="center"><b>Gruppo di Lavoro</b></p>																				
<b>Ph.D. Geol. Salvatore Costabile</b>		Geologo Senior – Direttore Tecnico																		
<b>Dott. Geol. Fabio Lombardi</b>		Geologo Senior (Sez. A Nr. 2691)																		
<b>Dott. Salvatore Davino</b>		Geologo Junior																		
rev.	descrizione	data	redatto	verificato																
1	Emissione	01/12/2022	Geol. Fabio Lombardi	Ph.D. Geol. Salvatore Costabile																
2			Dott. Salvatore Davino	Dr. Geol. Salvatore COSTABILE Albo N° 2727																



## Sommario

<b>PREMESSA</b>	3
<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b>	4
<b>1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO</b>	5
<b>2. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO</b>	6
<b>3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE</b>	8
<b>3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO LOCALE</b>	12
<b>4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO</b>	14
<b>5. CARTE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO</b>	17
<b>6. INDAGINI GEOGNOSTICHE EFFETTUATE</b>	20
<b>6.1 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO</b>	22
<b>6.2 PROVA PENETROMETRICA DPSH</b>	34
<b>6.2.1. Risultati Prova Penetrometrica</b>	39
<b>6.3 PROVA PERMEABILITÀ LEFRANC – CARICO VARIABILE</b>	47
<b>6.3.1. Risultati Prova Permeabilità Lefranc</b>	49
<b>6.4 PROVA PENETROMETRICA STANDARD</b>	60
<b>6.4.1 Risultati Prova Penetrometrica Standard</b>	63
<b>6.5 RISULTATI PROVE DI LABORATORIO</b>	68
<b>6.6 MODELLO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b>	77
<b>7. INDAGINI GEOFISICHE EFFETTUATE</b>	80
<b>7.1 INDAGINI MASW</b>	81
<b>7.2. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E TECNICHE OPERATIVE</b>	83
<b>7.3. ELABORAZIONE DEI DATI</b>	84
<b>7.4. RISULTATI PROVE MASW</b>	85
<b>7.5. INDAGINE REMI</b>	90
<b>7.5.1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI</b>	92
<b>7.5.2. REMI_1</b>	93
<b>8. MODELLAZIONE SISMICA</b>	96
<b>8.1 Pericolosità sismica di “base”</b>	98
<b>8.2 Definizione della categoria di sottosuolo e del coefficiente di amplificazione stratigrafica</b>	101
<b>8.3 Condizioni topografiche e coefficiente di amplificazione topografica</b>	103
<b>8.4 Risposta Sismica Locale</b>	105
<b>9. VERIFICA DELLA LIQUEFAZIONE</b>	114
<b>9.1 Liquefazione: perché il terreno si trasforma in un fluido</b>	115
<b>CONCLUSIONI</b>	119
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	125
<b>ALLEGATI</b>	126
<b>1) Certificati di Laboratorio</b>	126

## PREMESSA

A seguito del contratto n. 4500165817 stipulato con NORD\_ING avente CIG 9157394895 ed oggetto “Servizio di esecuzione di prove geotecniche, sondaggi geognostici, prove/analisi di laboratorio, diagnostica strutturale”, GIA Consulting ha redatto la seguente relazione per quanto concerne la commessa con codice R31 “Opere Sostitutive PL di Via Trieste in comune di Erba - opere di competenza Ferrovienord”. La GIA Consulting S.r.l. ha redatto il seguente documento che è frutto d’indagini geofisiche, geognostiche e di ricerche di tipo bibliografico oltre che dei dati d’archivio a disposizione della GIA Consulting.

La campagna di indagini, indispensabili per l’elaborazione del documento, risulta essere la seguente:

- n°3 Sondaggi Geognostici;
- n°1 Penetrometriche pesanti (DPSH);
- n°1 Campione indisturbato;
- n° 2 Campioni rimaneggiati;
- n° 3 Prove SPT;
- n° 9 Prove Lefranc;
- n°1 Indagini MASW;
- n°1 Indagine HVSR.

Il seguente studio ha consentito di ottenere una caratterizzazione geo-litologica, geotecnica e sismica del sottosuolo dell’area di indagine e di definire, in accordo con quanto prescritto dalle NTC 2018, le litologie riscontrate in termini di categorie di sottosuolo.

Le ricerche bibliografiche sono state tratte da:

- Carta Geologica Foglio 075 “Como” Progetto CARG e relative Note Illustrative;
- P.U.C. Comune di Erba Relazione Geologica;
- Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PSAI) dei territori dell’Autorità di Bacino Distrettuale del fiume PO (L. n. 183 del 18/05/89; L. n. 253 del 7/08/90; L. n.493 del 4/12/93; L.n. 226 del 13/07/99; L.n. 365 del 11/12/00 agg.2015), e relativa Cartografia tematica.



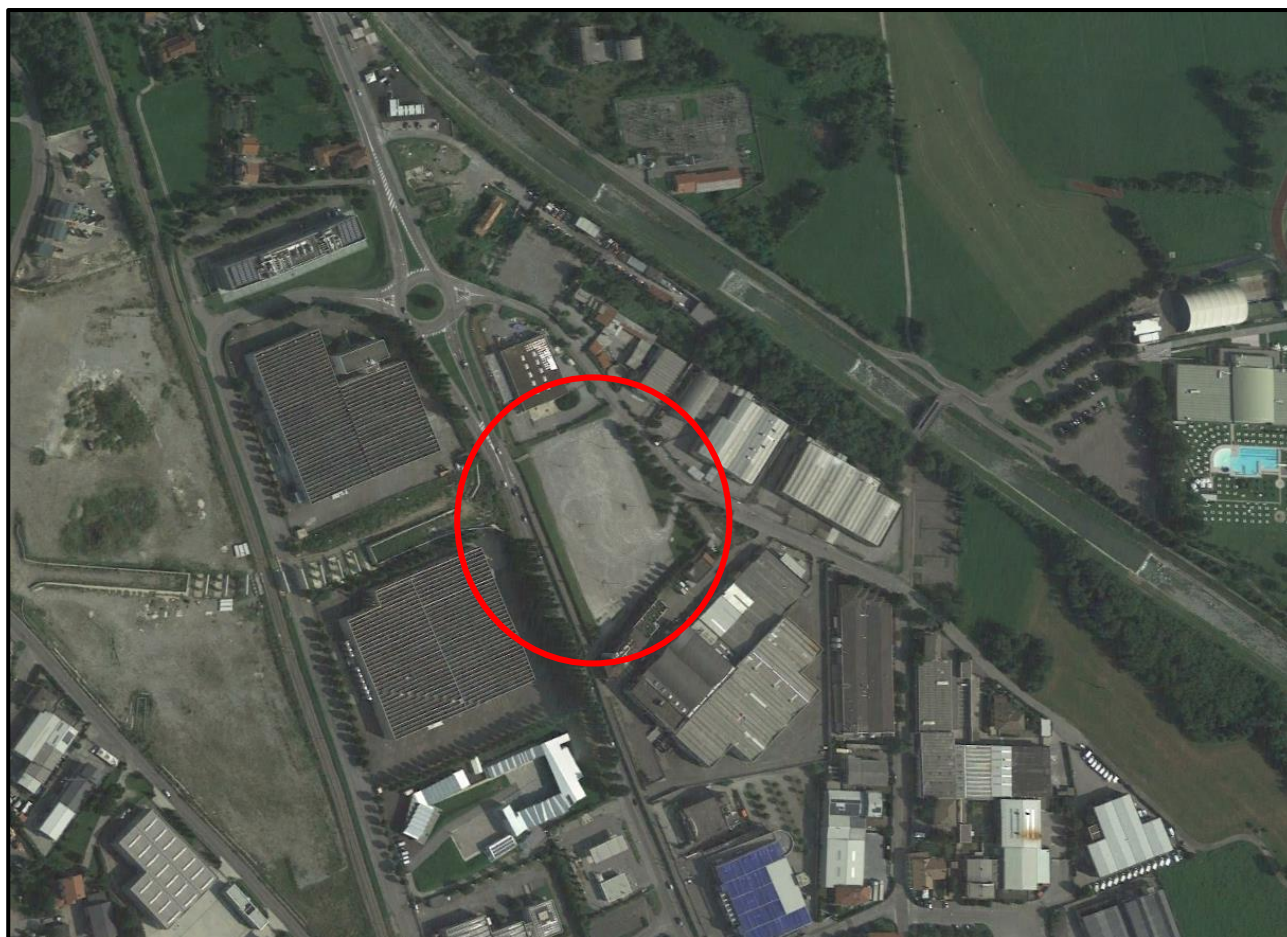
## NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La relazione è stata redatta in conformità con le seguenti normative:

- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. *Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. (pubblicato sulla GU n.35 del 11-2-2019 – Suppl. Ordinario n. 5);*
- Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 11 marzo 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 e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Coordinato con la Circolare del Ministero Lavori Pubblici, 24 settembre 1988, n. 30483 - Istruzioni per l'applicazione";*
- Con riferimento al sopra citato provvedimento è stata emanata la seguente circolare: Ministero dei lavori pubblici: Circolare del 9 gennaio 1996, n. 218/24/3.
- Legge 18 maggio 1989, n. 183 *"Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo";*
- O.P.C.M. 20 marzo 2003 n°3274 *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica";*
- O.P.C.M. 28 aprile 2006 n° 3519 *"Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"* (G.U. n.108 del 11/05/2006);
- D.g.r. n. X/2129 dell'11 Luglio 2014 *"Aggiornamento delle Zone sismiche in regione Lombardia (L.r. 1/2000, art.3, c.108, lett. d)";*
- L.R. n.33 del 12 ottobre 2015 *"Disposizioni in materia di opere o di costruzioni e relativa vigilanza in zone sismiche".*

## 1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto dei lavori è ubicata nel comune di Erba (CO), all'interno dell'area di parcheggio comunale che insiste su Via Cascina California, riportata in Fig. 1, e avente una quota pari a 271 m.s.l.m.

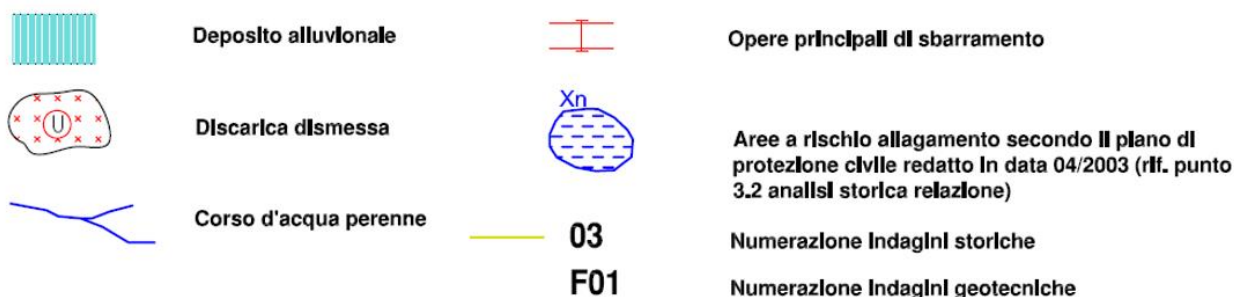
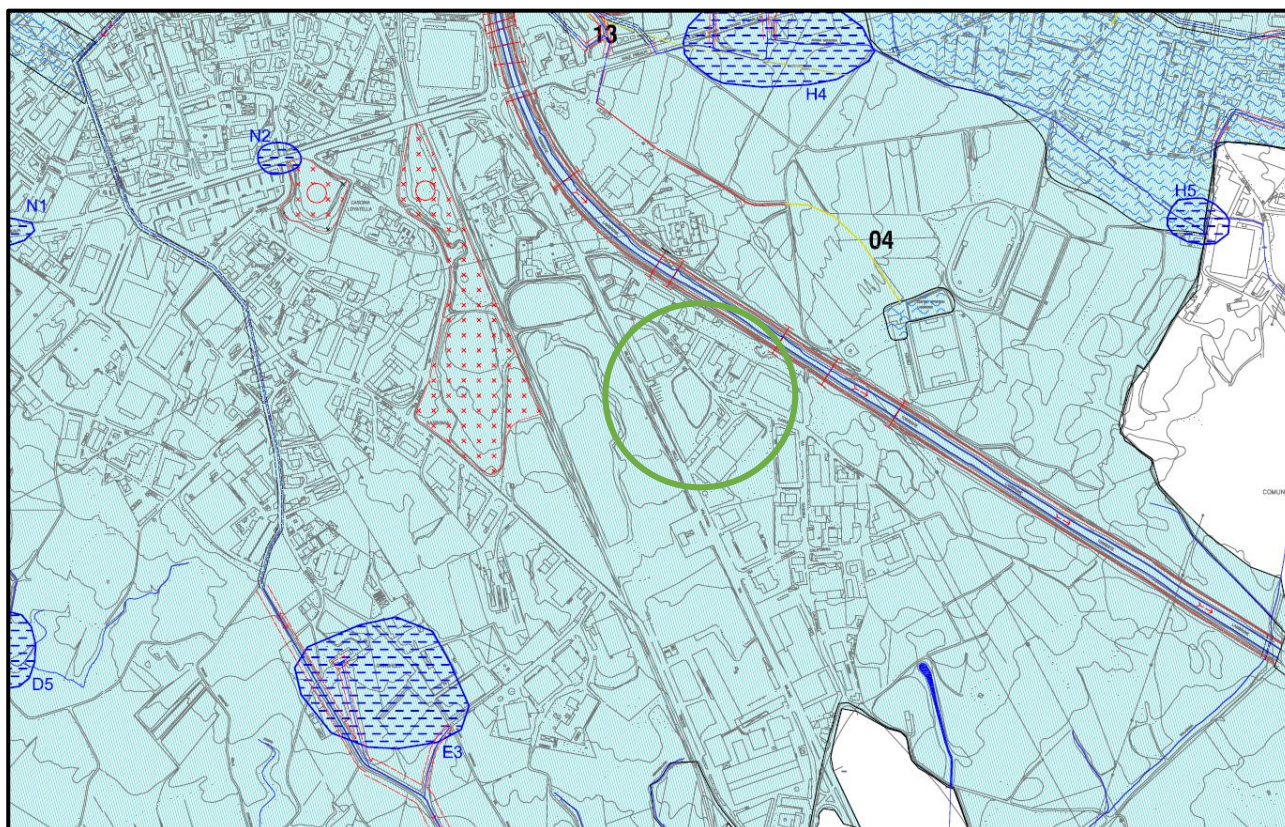


*Figura 1. Ubicazione dell'area d'indagine – Comune di Erba (CO); in rosso l'area di studio.*



## 2. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il territorio comunale di Erba (CO) si trova nella parte centrale della Regione Lombardia, e confina con i comuni di Albavilla e Faggeto Lario, a Ovest, di Alserio – Monguzzo – Merone e Pusiano, a Sud, di Eupilio – Proserpio e Longone al Segrino, a Est, di Ponte Lambro e Caslino d'Erba, a Nord. L'inquadramento geomorfologico dell'area si basa sulla Carta Geomorfologica (scala 1:5000) pubblicata dal PGT del Comune di Erba (Fig. 2).



*Figura 2. Stralcio carta Geomorfologica, scala 1:5000 (Tav. 02 B); in verde l'area di studio.*



L'area ricade all'interno dei "Depositi Alluvionali" e non rientra in zone a rischio allagamento; c'è da segnalare un'opera principale di sbarramento, a nord dell'area di interesse, che interessa il Fiume Lambro. Il fiume è un tributario di sinistra del Po e nasce ai monti del gruppo San Primo (Triangolo Iariano), a 942 metri, nell'area di Piano Rancio nel comune di Magreglio.

L'area è compresa tra 2 laghi (Fig. 2.1): Lago di Alselio e Lago di Pulsiano; entrambi fanno parte del Parco regionale della Valle del Lambro. Il Parco comprende un territorio che si estende da nord a sud per circa 25 km; occupa una superficie di 8.348 ettari nella Valle del Lambro ed ha un'altitudine che varia da 167 a 376 m s.l.m. Include numerose aree urbane, ma soprattutto zone boschive che affiorano lungo il Lambro e i suoi affluenti Bevere e Rii (Rio Pegorino, Rio Cantalupo). A nord del Parco regionale si trovano i due laghi nel quale il Lambro, prima si getta col nome di Lambrone, poi esce e continua il suo percorso fino ad incontrare il Po presso Orio Litta.

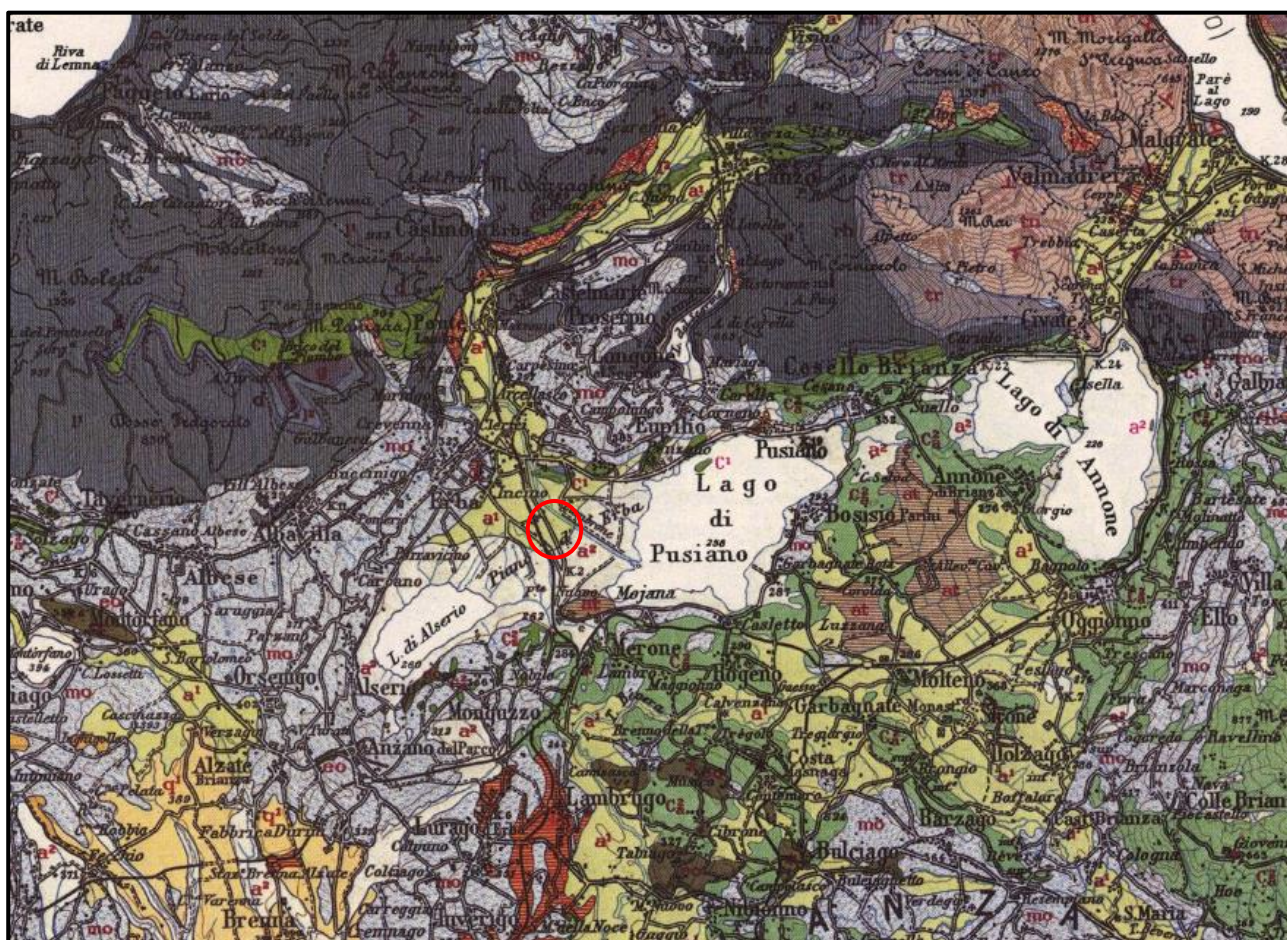


*Figura 2.1. Foto aerea del Comune di Erba; in rosso l'area di studio.*



### 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

La interpretazione delle rocce del substrato prequaternario risulta abbozzata già nel secolo scorso e il rapporto tra terreni prequaternari e quaternari, già definito nelle linee essenziali nel Foglio Como della Carta d'Italia 1:100.000 (R.Ufficio Geologico 1937, Fig. 3), seppure con la consueta amplificazione delle aree a roccia litoide affiorante e scapito di quelle coperte da depositi glaciali o genericamente detritici più recenti.





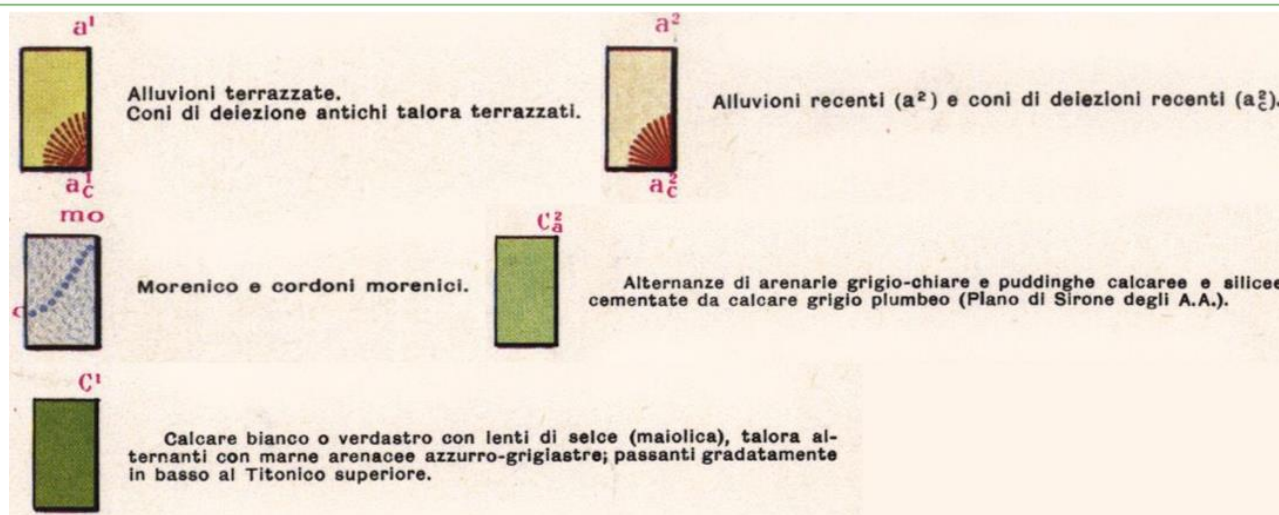


Figura 3. Stralcio Carta Geologica D'Italia in scala 1:100.000 "Como"; in rosso l'area di studio.

Alcuni degli elementi fondamentali della geologia delle aree meridionali del territorio di studio sono i depositi glaciali e glacio-lacustri. Queste aree facenti parte della provincia della città di Como sono interessate dalle cerchie interne e più recenti, e loro depositi lacustri, del lobo comasco del ghiacciaio abduano nella fase della sua massima ultima espansione, LGM (Last Glacial Maximum).

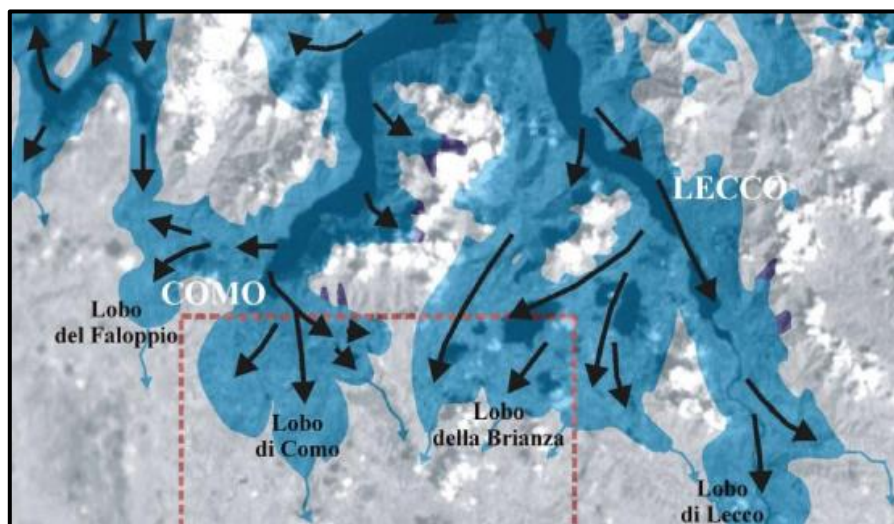


Figura 3.1. LGM – Ghiacciaio dell'Adda

La interpretazione delle coperture quaternarie di varia genesi rispetta i canoni della interpretazione classica alpina, che fino a pochi anni orsono ha riconosciuto valida la suddivisione dei depositi glaciali in 3-4 principali glaciazioni e relativi cerchie moreniche e terrazzi fluvioglaciali.



Dalle note della Carta Geologica Foglio Seregno (Figura 3.2) si evince che il Lobo di Como è caratterizzato, nella sua parte più recente a partire dal Sintema della Specola (Pleistocene medio-inferiore), da morene ad andamento semicircolare, separate le une dalle altre da piane fluvio-glaciali ad identica disposizione. La morfologia assunta dalle morene è ben riconoscibile tra Senna Comasco e Figino Serenza, mentre diviene più articolata spostandosi verso W dove il fitto reticolo di piane fluvio-glaciali ha smantellato e frammentato le morene, dando origine a quattro importanti valli; da E verso W: valle del Seveso, valle tra S. Michele e Cermenate, valle della Lura e valle tra Cirimido e Lomazzo. La valle del Seveso costituisce il principale scaricatore del ghiacciaio del ramo di Como del Lario e si è formata durante le prime glaciazioni che hanno interessato il territorio, mentre è stata più volte riempita di sedimenti e reincisa durante le glaciazioni più recenti.

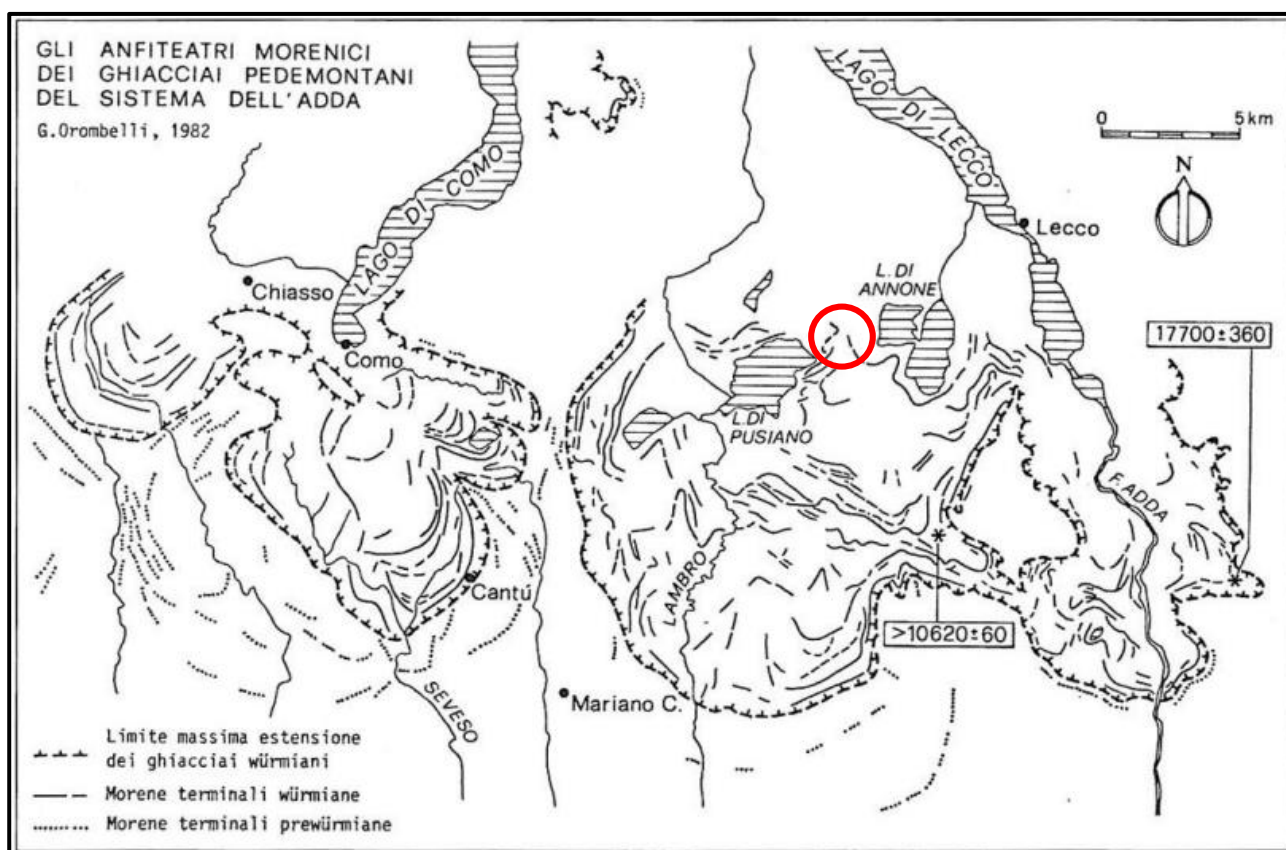
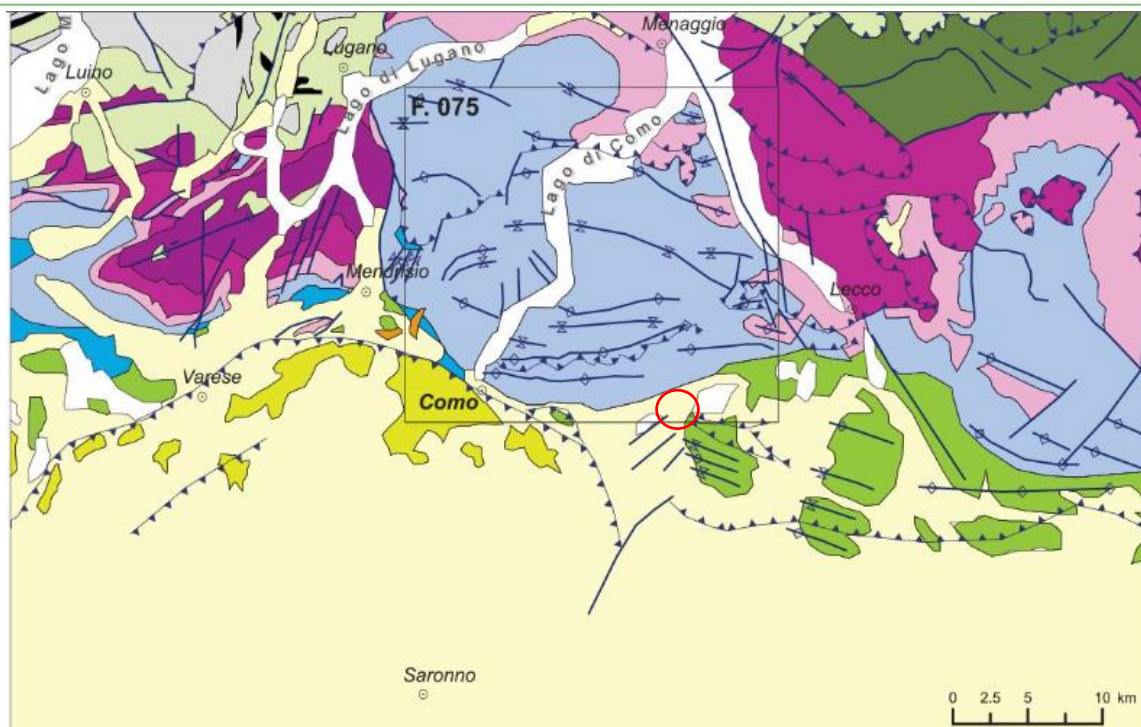


Figura 3.2. "I depositi wurmiani del Camasco" – Orombelli 1982.

Dall'inquadramento regionale del Foglio 075 (Carta Geologica Como), si evince che le coperture appartengono a depositi Quaternari, mentre al nord ci sono Unità synrift emipelagiche del Lias Medio – Cenomaniano.



- ◇— Traccia di superficie anticlinale
- X— Traccia di superficie sinclinale
- ▼▼ Sovrascorrimento
- Faglia

#### Quaternario



#### Plutoni Terziari



#### Coperture sedimentarie

- Conglomerato di Pontegana (Messiniano) e Argille di Castel di Sotto (Pliocene) Post-orogeno
- Gonfolite Lombarda (Oligo - Miocene p.p.) Sin-orogeno
- Unità torbiditiche (Flysch Lombardo) pelagiche e torbiditiche (Piano di Brenno, Fm. di Tabiago, Fm. di Ternate, Gallare) (Turoniano - Eocene)
- Unità pelagiche e emipelagiche (Lias Medio - Cenomaniano) Post-rift
- Unità synrift emipelagiche (Lias Medio - Cenomaniano) Post-Rift
- Unità synrift precoce e prerift (Norico - Retico)
- Unità pre-rift (Scitico - Carnico)
- Vulcaniti (Permiano)

#### Basamento ercinico

- Filiti, micascisti e paragneiss
- Ortogneiss
- Anticlinale orobica e coperture permiane
- Gabbri (Ivrea), rocce basiche ed ultrabasiche

#### Australpino

- Zona del Canavese
- Zona Sesia
- Zona del Tonale

#### Pennidico e Sub-pennidico

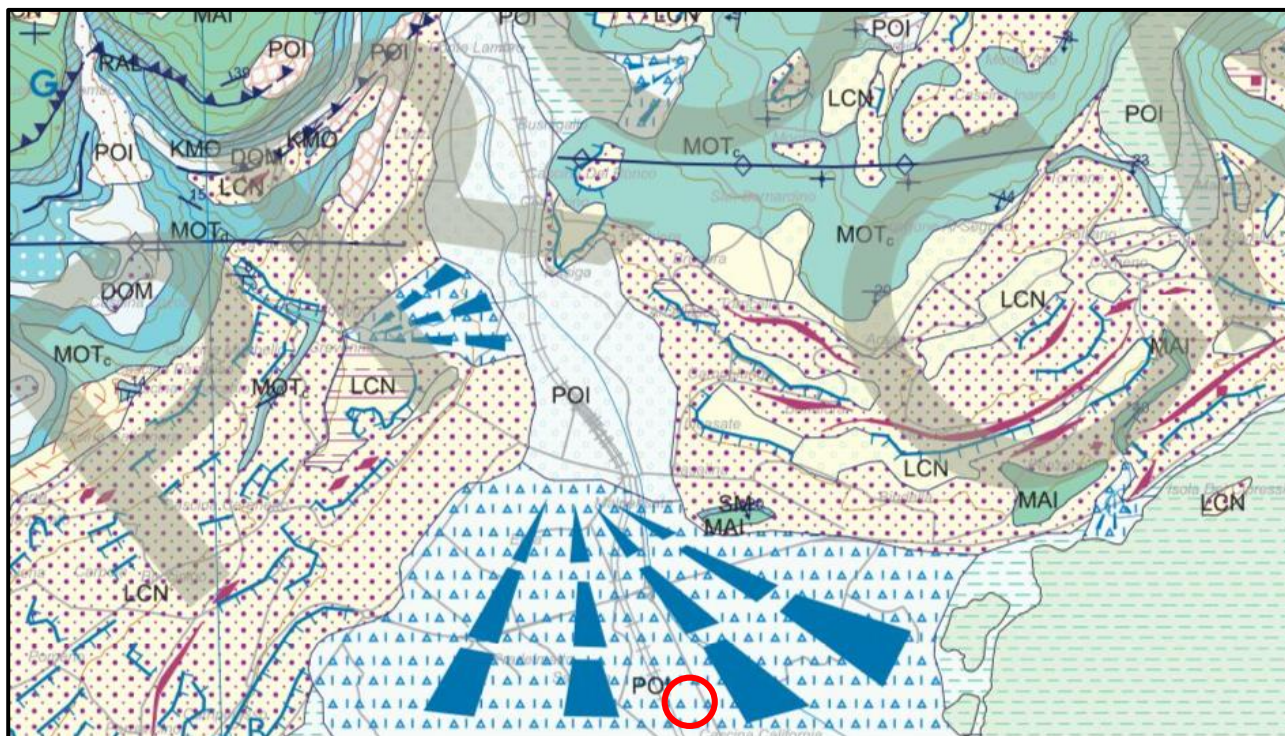
- Falda del Monte Rosa (Brianzonese)
- Zona di Orsellina - Bellinzona (Pennidico inferiore)
- Zona di Mergoscia - Falda di Antigorio (Sub-Pennidico)

*Figura 3.3 – Schema di Inquadramento Regionale*



### 3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO LOCALE

L'area in esame è situata nell'area di Erba tra il Lago di Pusiano ed il Lago di Alserio, e rientra nel foglio Como 075 a scala 1:50.000 della Carta Geologica D'Italia (Figura 3.4):



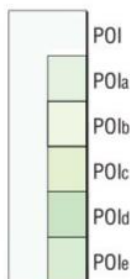
#### SINTEMA DEL PO

Ghiaie massive da fini a grossolane, a supporto clastico o di matrice limoso-argillosa, clasti da spigolosi ad arrotondati (depositi di versante); ghiaie stratificate da fini a grossolane, a supporto clastico o di matrice sabbiosa, clasti da subangolosi ad arrotondati, possibile embricatura dei clasti; sabbie da massive a laminate, limi massivi o debolmente laminati; corpi lenticolari a diversa granulometria (depositi fluviali); sabbie a supporto di matrice, ghiaie fini con sabbia grossolana a supporto di clasti (depositi di conoide dominati da *debris flow*); limi laminati, sabbie fini, argille e torbe (depositi lacustri e di torbiera).

Alterazione assente e morfologie ben conservate ed ancora in evoluzione.

Superficie limite superiore in genere coincidente con la superficie topografica o con il fondo lacustre; superficie limite inferiore, con limiti discontinui e discordanti con il substrato o le unità neogeniche più antiche.

#### PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE



POIa: Sedimento pelagico di fondo

POIb: Sedimento pelagico - torbido

POIc: Sedimento torbido

POId: Sedimento ad alto contenuto organico

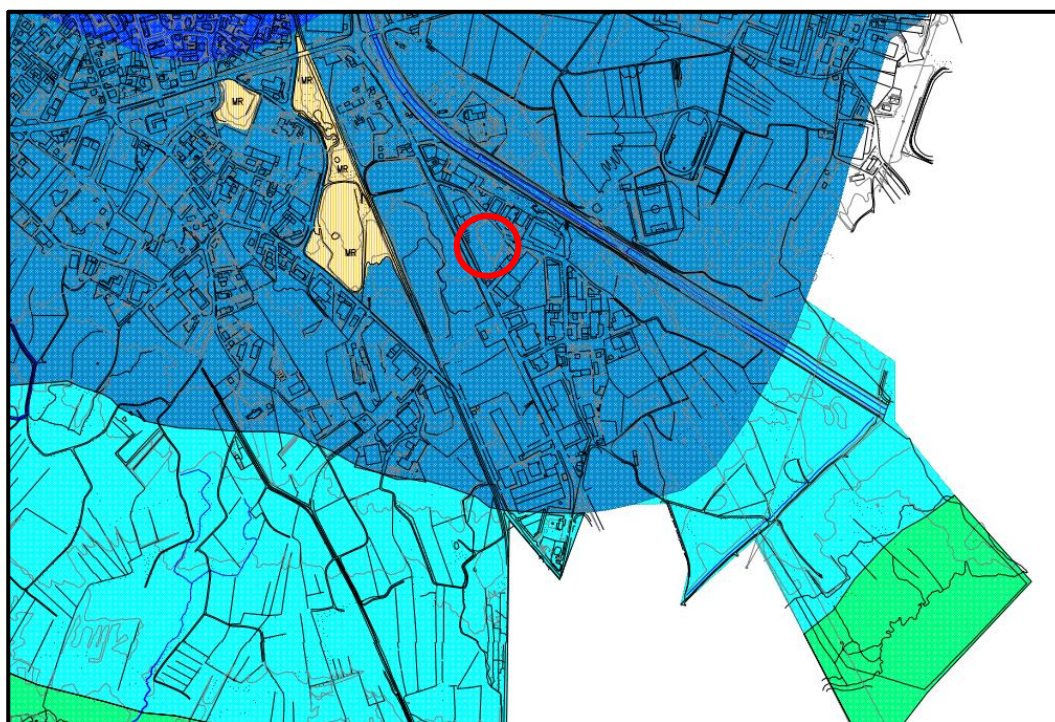
POIe: Sedimento rimobilizzato

Figura 3.4. – Stralcio Carta Geologica 1:50:000 Foglio 075 Como, Progetto CARG, con indicazione area d'intervento.



L'area insiste su una conoide di origine mista (depositi glaciali wurmiani e depositi fluvioglaciali wurmiani) con materiali ghiaiosi (da fini a grossolani) a supporto clastico, di matrice limoso – argillosa o di matrice sabbiosa. I depositi di conoide, dominati da debris flow, possono essere formati da corpi lenticolari a diversa granulometria composti da sabbie e ghiaie; si differenziano i livelli lacustri, i quali tendono ad avere una granulometria inferiore: limi laminati, sabbie fini, argille e torbe.

Viene mostrata, inoltre, la carta geolitologica del Comune di Erba (scala 1:5000), da cui si evince che l'area di interesse ricade all'interno di depositi "Alluvionali caratterizzati da terreni sabbiosi" (Figura 3.5).



- Alluvioni caratterizzate da terreni ghiaiosi
- Alluvioni caratterizzate da terreni sabbiosi
- Alluvioni caratterizzate da terreni limosi
- Depositi lacustri caratterizzati da terreni argillosi e torbosi

*Figura 3.5 – Stralcio Carta Geolitologica, in scala 1:5000; in rosso c'è l'area di interesse.*

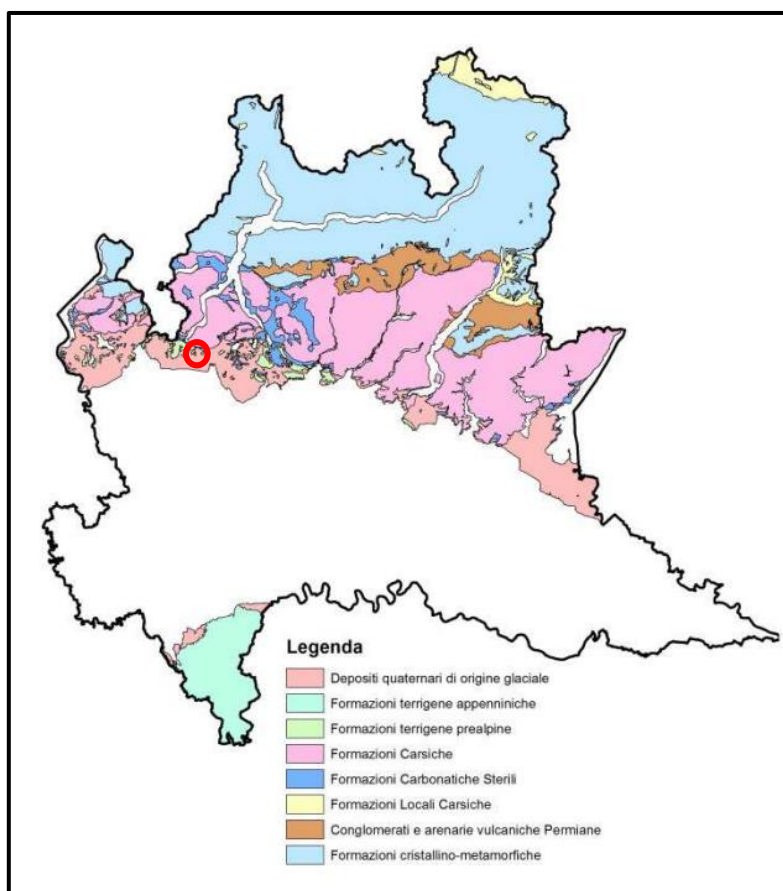
#### 4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Dall'analisi delle perimetrazioni dei complessi idrogeologici della regione Lombardia (Figura 4), si asserisce che l'area di interesse ricade all'interno del subcomplesso:

- Depositi Quaternari di origine glaciale.

Il subcomplesso fa parte del “Complesso dei Depositi Sciolti Quaternari”, ed occupa tutta la porzione di territorio lombardo di collegamento tra i rilievi prealpini e la Pianura padana occupato da depositi quaternari di origine prevalentemente glaciale e/o fluvioglaciale.

A nord dell'area di interesse vi è il subcomplesso Formazioni Carsiche, facente parte del “Complesso delle formazioni calcareo-dolomitiche terziarie-giurassiche”, la quale occupa tutta la porzione prealpina, dove affiora la successione carbonatico-triassico del bacino lombardo caratterizzata dalla presenza di condotti carsici.



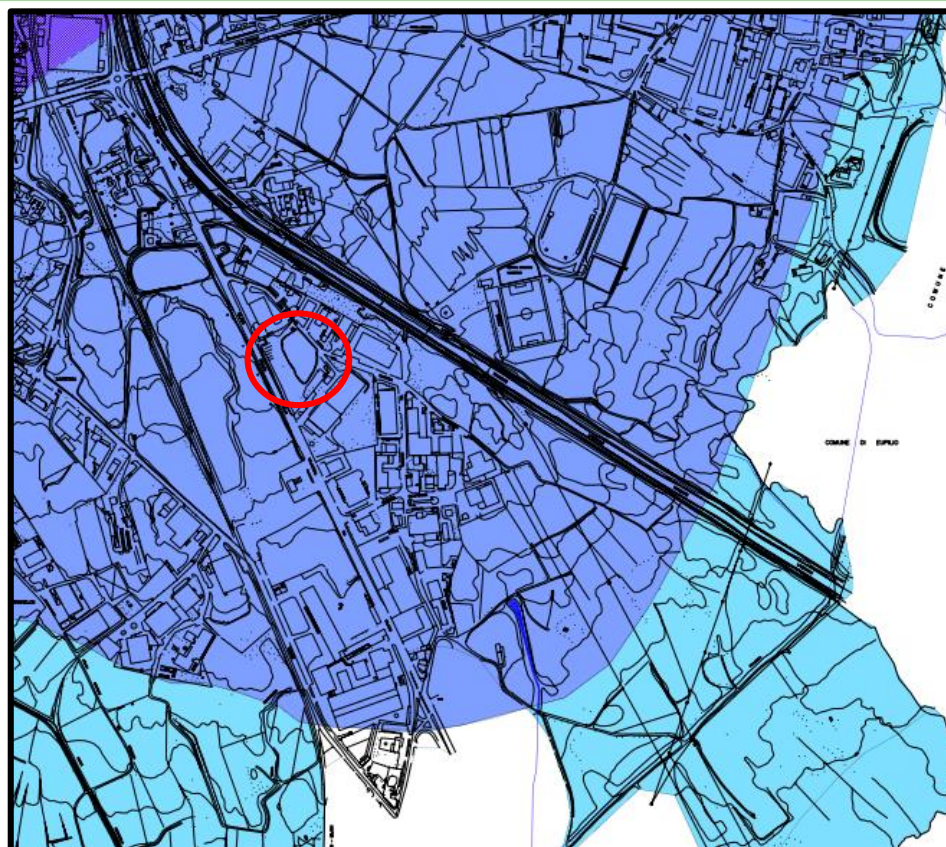
*Figura 4 – Complessi e subcomplessi idrogeologici dell'aggiornamento sessennale (2015) del PdG*

L'unità sabbioso-ghiaiosa (classificazione ENI – Regione Lombardia) si caratterizza per una successione di sedimenti sabbioso-ghiaiosi e sabbiosi, con frequenti intercalazioni lenticolari limoso-argillose. La portata specifica si attesta su valori compresi tra 5 e 15 l/s m mentre la trasmissività è compresa tra  $5 \times 10^{-3}$  e  $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , anche se si possono avere valori più elevati in corrispondenza di paleoalvei fluviali laddove prevalgono le granulometrie sabbiose.




Nel settore della media pianura, al tetto di questa Unità è presente un livello limoso - argilloso, con uno spessore medio di una decina di metri circa, la cui continuità laterale determina il carattere semiconfinato della falda contenuta nella Unità sabbioso - ghiaiosa. Alla base dell'Unità sabbioso-ghiaiosa, non è infrequente trovare una serie di livelli a conglomerati e arenarie, che alcuni Autori tendono a distinguere come una vera e propria Unità idrogeologica, che si raccorda con gli affioramenti del Ceppo Lombardo. Essa risulta costituita da depositi prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi caratterizzati da vari gradi di cementazione; dove presente, il cemento è sempre di tipo calcareo. Per la sua importanza idrogeologica, essa è stata distinta da Avanzini M. e altri, nella classificazione già descritta. Questa Unità è facilmente riconoscibile nel settore pedemontano e dell'alta pianura in corrispondenza dei primi 50 - 100 m di profondità, dove costituisce il primo acquifero.

Dall'analisi della carta delle permeabilità, Tav. 03-B del PGT del Comune di Erba, è possibile valutare la permeabilità dei terreni:





#### Terreni alluvionali

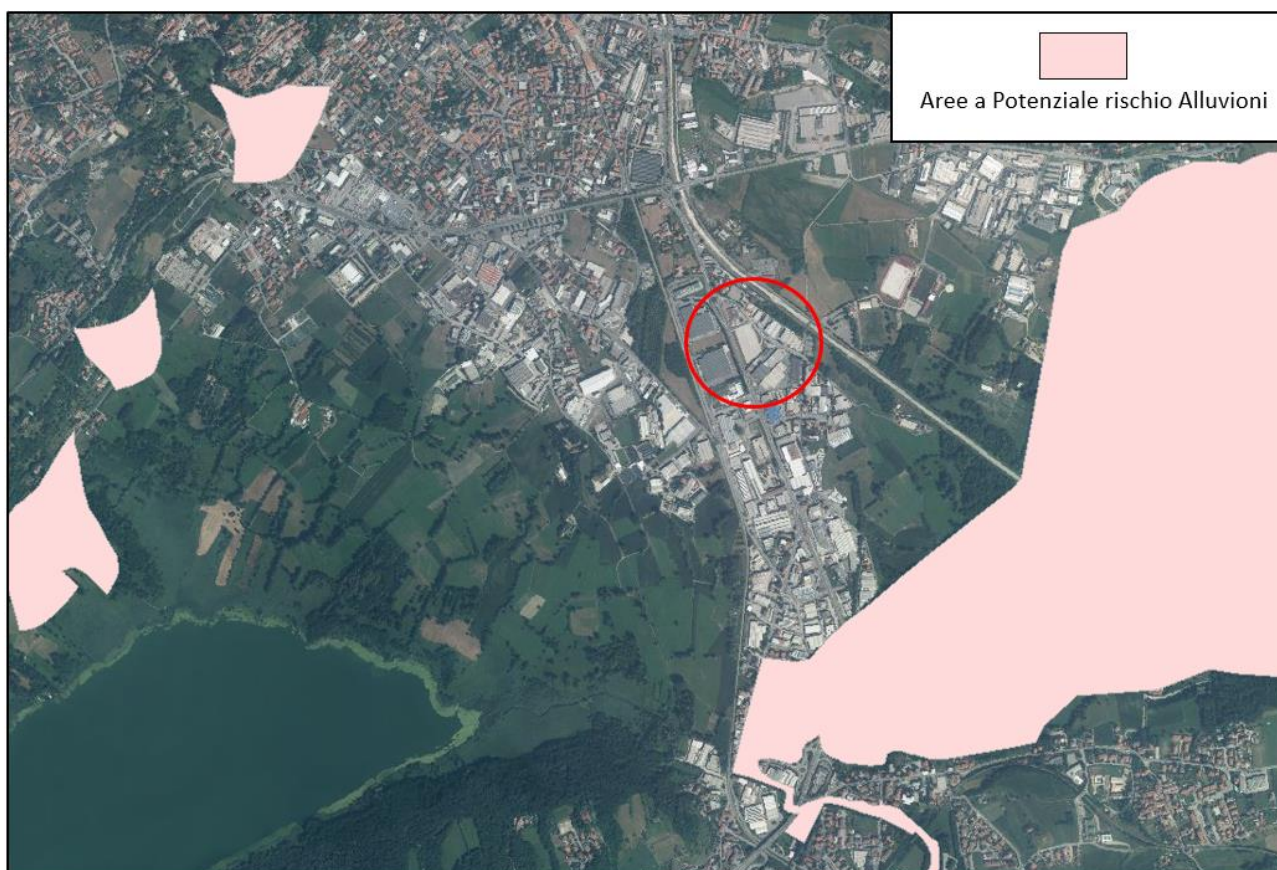
	Terreni molto permeabili
	Terreni mediamente permeabili
	Terreni poco permeabili
	Terreni impermeabili

*Figura 4.1 – Carta Permeabilità, Tav. 03 – B – Scala 1:5000; in rosso l'area di interesse*

L'area ricade nei "Terreni mediamente Permeabili".

## 5. CARTE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO

Dall'esame delle cartografie di riferimento ottenibili dal geoportale di MinAmbiente è stato possibile valutare che l'area di interesse (Figura 5) è al di fuori delle aree a rischio alluvione secondo le APSFR (Areas of Potential Significant Flood Risk); la valutazione preliminare del rischio e la definizione delle aree a rischio potenziale significativo sono state sviluppate ai sensi degli artt. 4 e 5 della Direttiva 2007/60/CE. L'attività consiste nell'individuazione, attraverso una ricognizione delle alluvioni avvenute in passato ed una valutazione delle potenziali conseguenze negative di future alluvioni, delle aree per le quali si ritiene che esista un rischio potenziale significativo di alluvioni o che sia probabile che questo si generi.

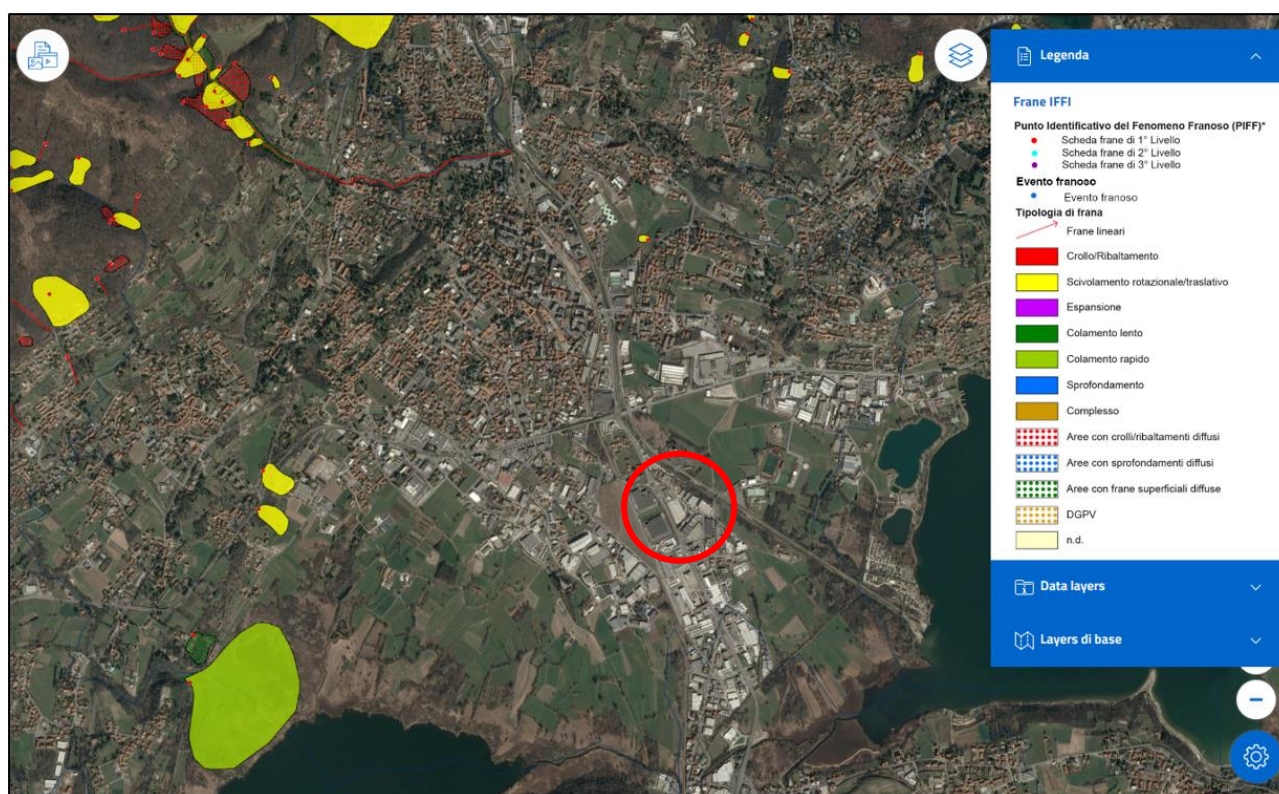


*Figura 5 - Aree a potenziale rischio di alluvioni; in rosso l'area di interesse.*

Dall'analisi del catalogo IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) l'area in esame non ricade in aree a rischio frana; Il Progetto IFFI, realizzato dall'ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome, fornisce un quadro dettagliato sulla distribuzione dei fenomeni franosi sul territorio italiano.

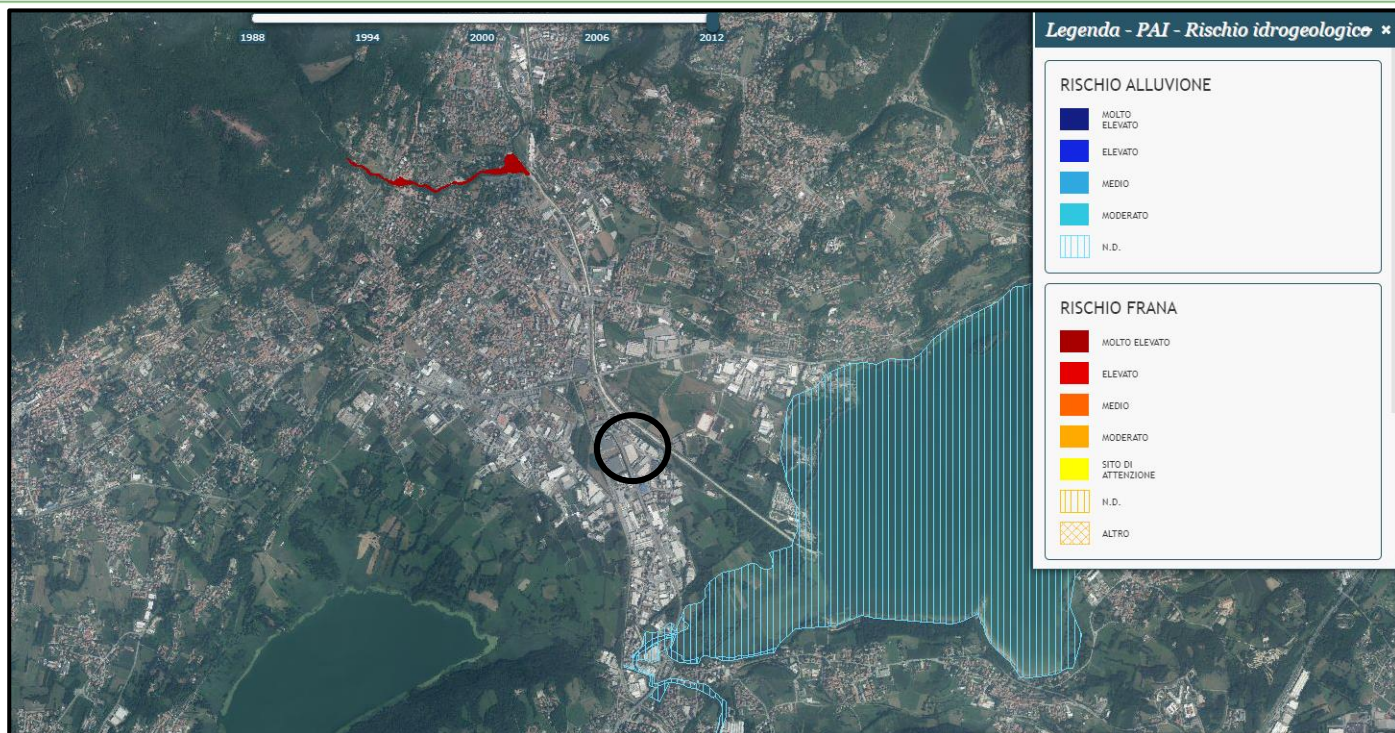


L'inventario ha censito ad oggi 620.808 fenomeni franosi che interessano un'area di circa 23.700 km<sup>2</sup>, pari al 7,9% del territorio nazionale. I dati sono aggiornati al 2017 per la Regione Umbria; al 2016 per le regioni: Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Piemonte, Sicilia, Valle d'Aosta e per la Provincia autonoma di Bolzano; al 2015 per la Toscana; al 2014 per la Basilicata e la Lombardia. Per le restanti regioni i dati sono aggiornati al 2007.



*Figura 5.1 – Mappa delle aree franose – Catalogo IFFI; in rosso l'area di studio.*

Il comune di Erba fa parte dell'Autorità di Bacino del Lario e dei Laghi Minori; dall'analisi del PAI non risultano esserci rischi nell'intorno dell'area di interesse (Figura 5.2).



*Figura 5.2 – Cartografia PAI – Rischio Idrogeologico; in nero l'area di interesse.*



## 6. INDAGINI GEOGNOSTICHE EFFETTUATE

Nell'area parcheggio che insiste su Via Cascina California, nel Comune di Erba (CO), è stata effettuata la seguente campagna di indagini geognostiche:

- n°3 Sondaggi Geognostici a carotaggio continuo;
- n°1 Penetrometrica pesante (DPSH);
- n°2 Campioni indisturbati;
- n°1 Campione indisturbato;
- n° 9 Prove Lefranc a carico variabile;
- n° 3 Standard Penetration Test.

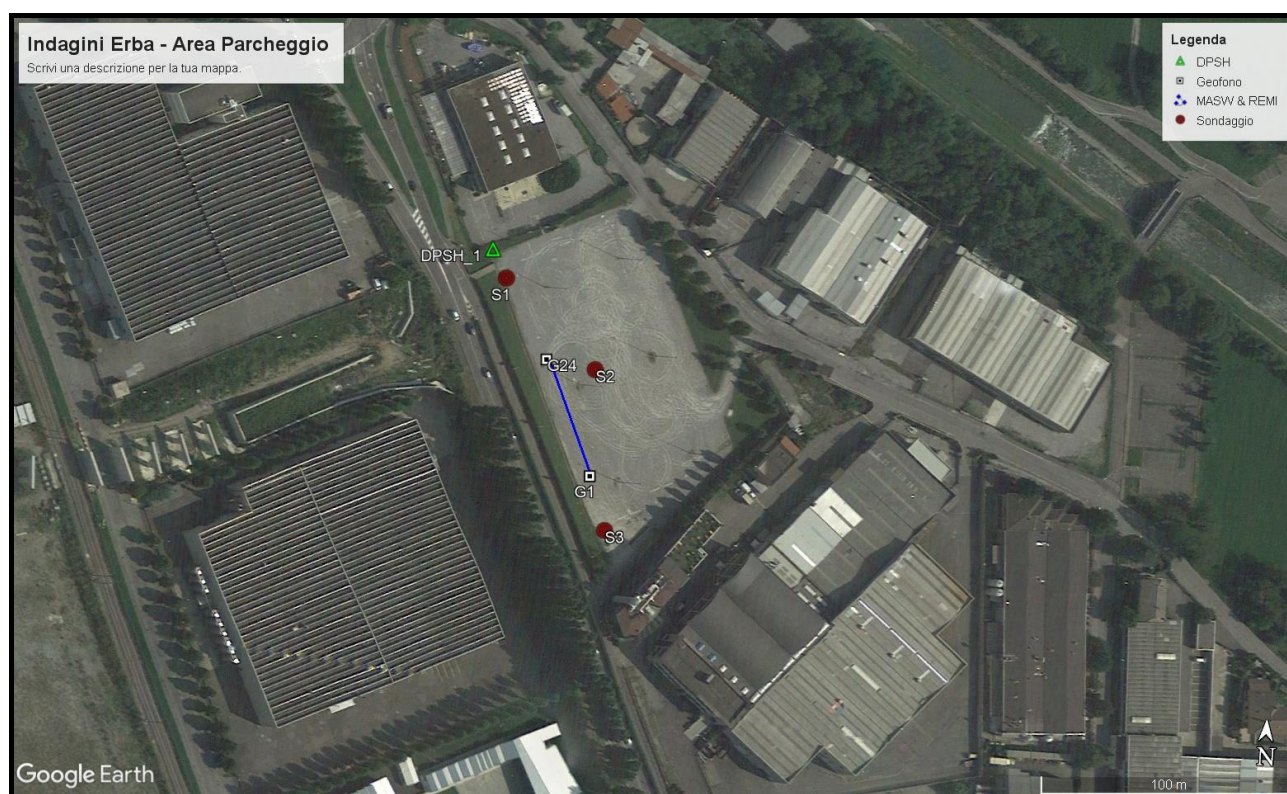
Le indagini geognostiche sono state correlate con le indagini geofisiche (1 MASW e 1 REMI) e sono riassunte complessivamente in tabella 6.

Nome	Data	Profondità (m)	Ubicazione
<b>Sondaggio 1</b>	16/11/2022	10.00	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°
<b>Sondaggio 2</b>	17/11/2022	10.00	Lat: 45.800863° Lon: 9.238297°
<b>Sondaggio 3</b>	18/11/2022	10.00	Lat: 45.800305° Lon: 9.238398°
<b>Penetrometrica 1</b>	15/11/2022	11.00	Lat: 45.801260° Lon: 9.237746°
<b>Lefranc 1_S1</b>	16/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 1
<b>Lefranc 2_S1</b>	16/11/2022	3.00-3.50	Sondaggio 1
<b>Lefranc 3_S1</b>	16/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 1
<b>Lefranc 1_S2</b>	17/11/2022	1.00-1.50	Sondaggio 2
<b>Lefranc 2_S2</b>	17/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 2
<b>Lefranc 3_S2</b>	17/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 2
<b>Lefranc 1_S3</b>	18/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 3
<b>Lefranc 2_S3</b>	18/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 3

Lefranc 3_S3	18/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 3
Campione Indisturbato	16/11/2022	1.00-1.50	Sondaggio 1
Campione Rimaneggiato_1	16/11/2022	3.00-3.50	Sondaggio 1
Campione Rimaneggiato_2	16/11/2022	4.50-5.00	Sondaggio 1
SPT 1_S2	17/11/2022	1.00-1.45	Sondaggio 2
SPT 2_S2	17/11/2022	3.00-3.45	Sondaggio 2
SPT 3_S2	17/11/2022	5.50-5.95	Sondaggio 2

*Tabella 6 – Indagini Geonostiche effettuate*

Tutte le indagini sono riassunte nella seguente immagine:



*Figura 6 – Indagini effettuate*



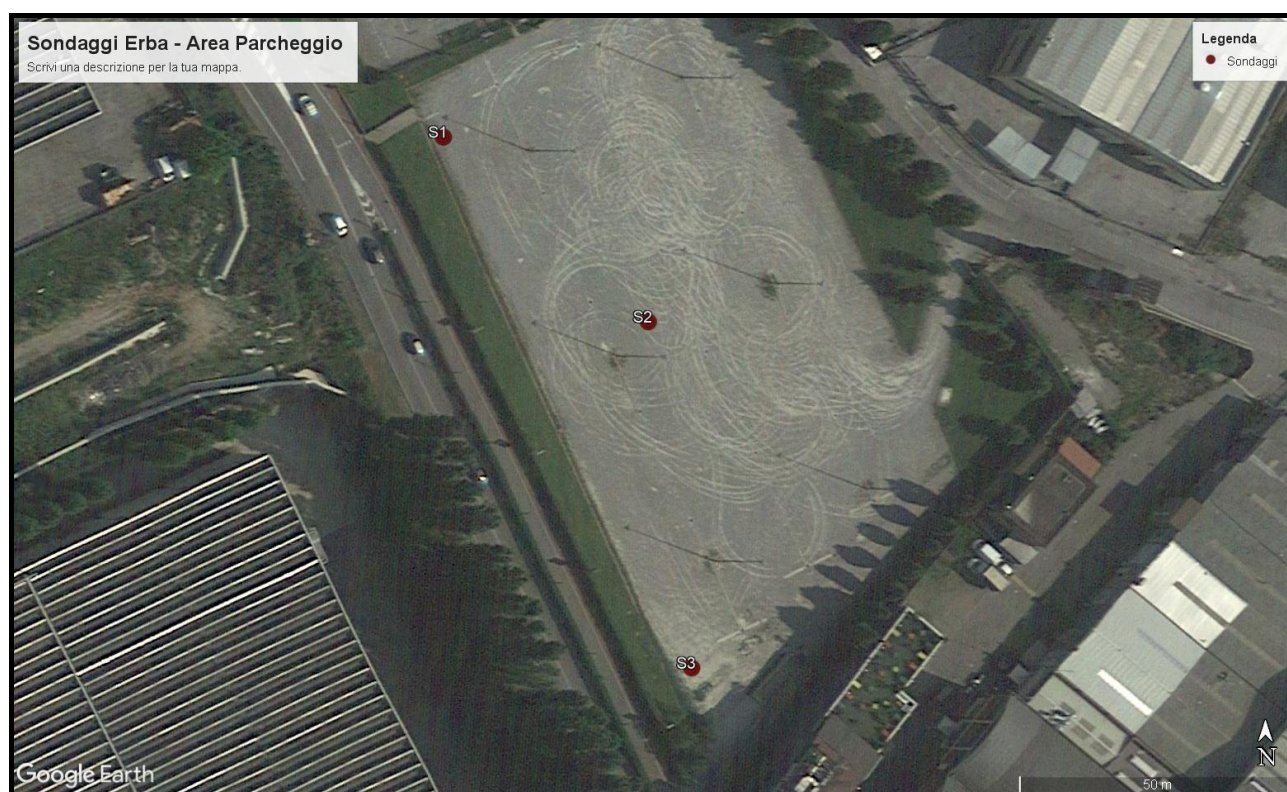
## 6.1 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO

In data 16, 17 e 18 novembre 2022 sono stati effettuati i sondaggi a carotaggio continuo con la finalità di ricostruire l'esatta colonna stratigrafica, utile anche per lo studio di caratterizzazione sismica, lo studio della permeabilità dei terreni e per il prelievo di campioni rappresentativi dell'areale di interesse.

I sondaggi effettuati sono tre e sono stati spinti fino ad una profondità di 10 metri; essi distano tra di loro 50/60 metri.

Nome	Data	Profondità (m)	Ubicazione
Sondaggio 1	16/11/2022	10.00	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°
Sondaggio 2	17/11/2022	10.00	Lat: 45.800863° Lon: 9.238297°
Sondaggio 3	18/11/2022	10.00	Lat: 45.800305° Lon: 9.238398°

*Tabella 6.1 – Dati Sondaggio.*



*Figura 6.1 – Ubicazione Sondaggi a carotaggio continuo*

## ➤ SONDAGGIO 1

Nel sondaggio Nr.1 è stato prelevato un campione indisturbato e 2 campioni rimaneggiati; ed è stata realizzata una prova di permeabilità a carico costante (profondità in tabella 6.1); in figura 6.2 è mostrata la foto di campo del sondaggio a carotaggio continuo.



*Figura 6.2 – Foto di Campo Sondaggio 1*



La stratigrafia ricostruita, risulta essere la seguente:

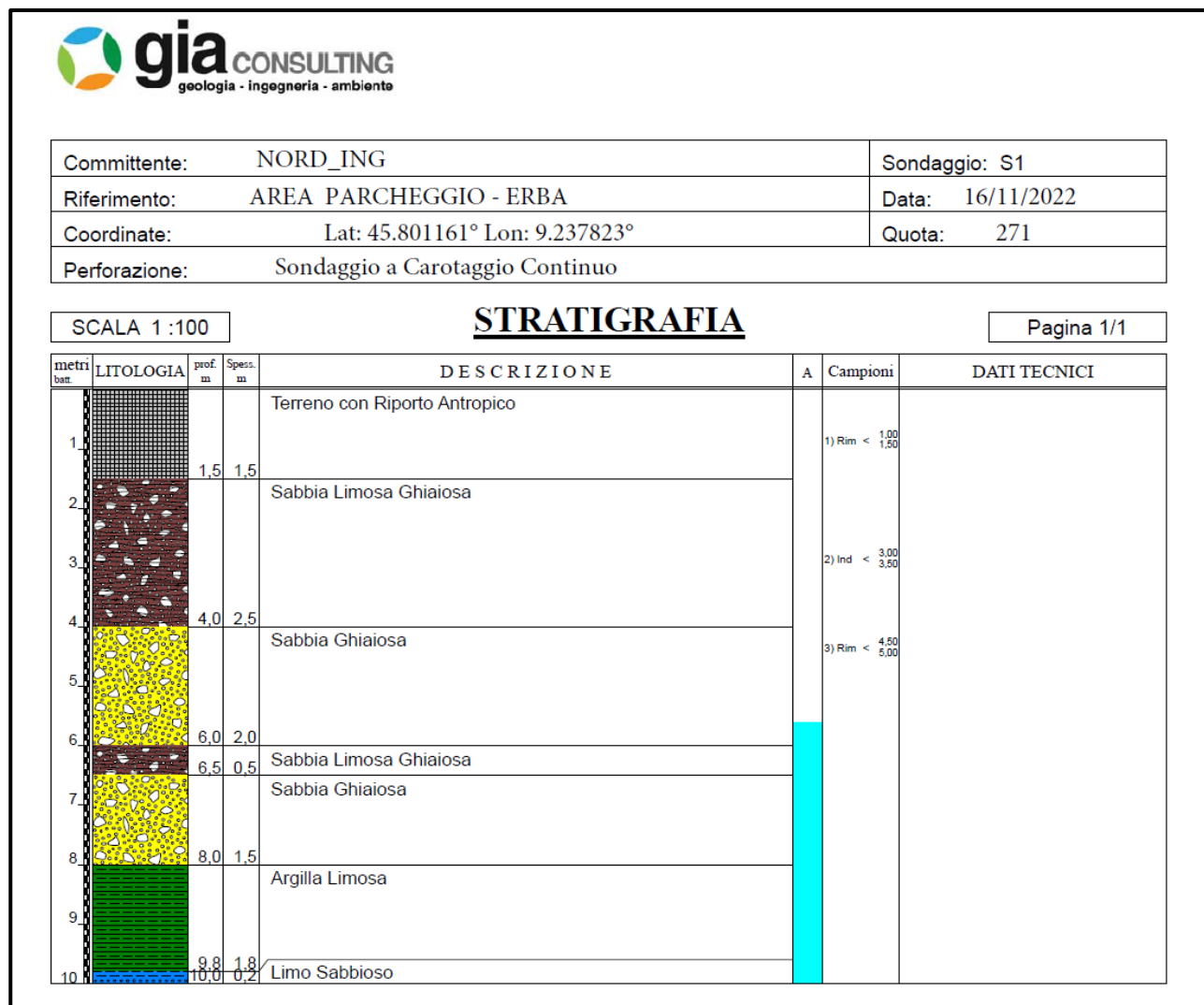


Figura 6.3 – Stratigrafia Sondaggio 1

La stratigrafia riscontrata risulta essere la seguente:

- (0.00 – 1.50) – **Terreno con riporto antropico;**
- (1.50 – 4.00) – **Sabbia Limosa Ghiaiosa;**
- (4.00 – 6.00) – **Sabbia Ghiaiosa;**
- (6.00 – 6.50) – **Sabbia limosa Ghiaiosa;**
- (6.50 – 8.00) – **Sabbia Ghiaiosa;**

- (8.00 – 9.80) – **Argilla Limosa;**
- (9.80 – 10.00) – **Limo Sabbioso.**

La falda è stata intercettata alla profondità di 5.60 metri.

Di seguito sono mostrate le foto delle cassette catalogatrici:



*Figura 6.4 – Cassetta Catalogatrice 0-5 m*





*Figura 6.5 – Cassetta Catalogatrice 5-10 m*

## ➤ SONDAGGIO 2

Nel sondaggio Nr.2 sono state effettuate 3 prove SPT e 3 prove di permeabilità a carico variabile (profondità in tabella 6); in figura 6.6 è mostrata la foto di campo del sondaggio a carotaggio continuo.



*Figura 6.6 – Foto di Campo Sondaggio 2*

La stratigrafia ricostruita, risulta essere la seguente:



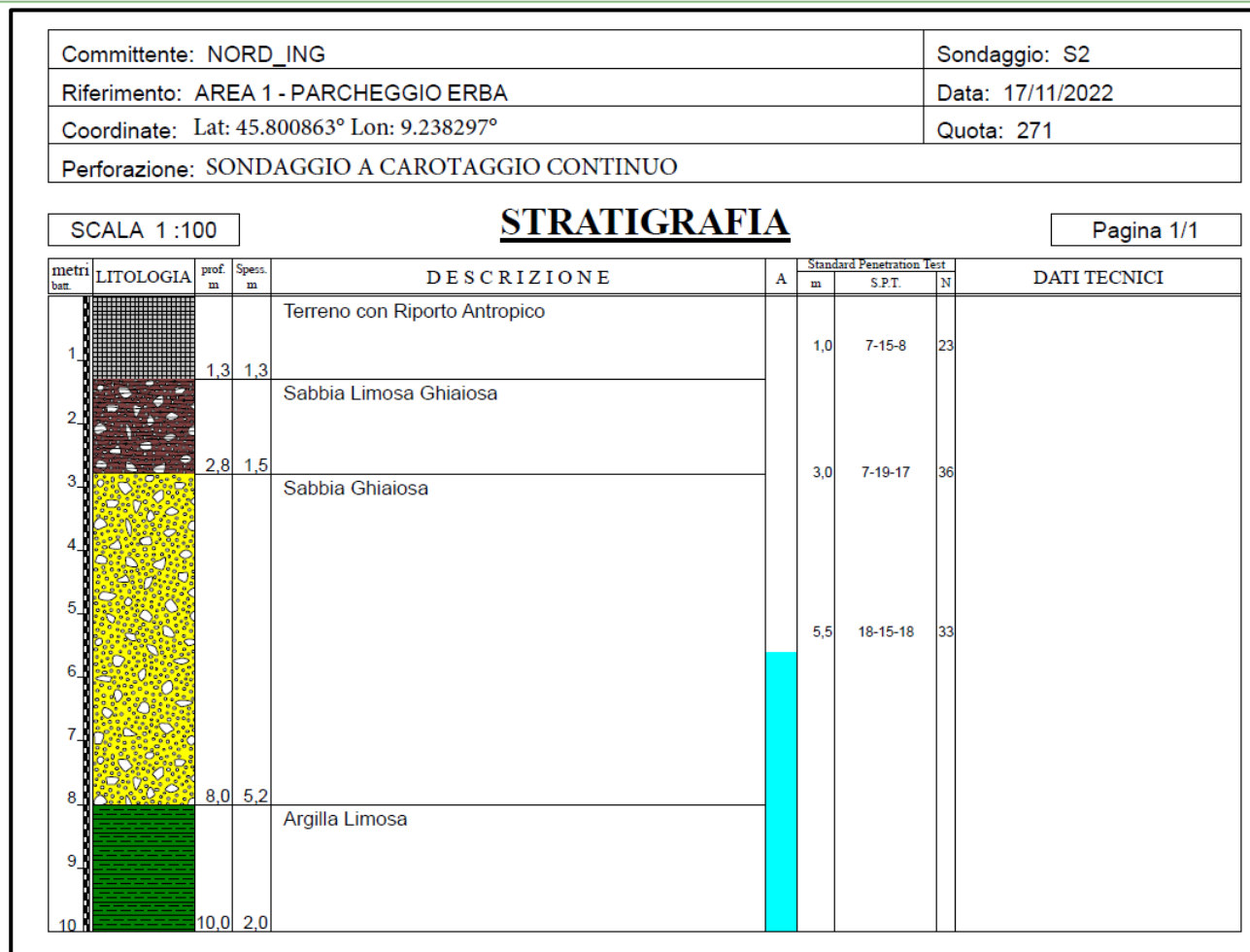


Figura 6.7 – Stratigrafia Sondaggio 2

La stratigrafia riscontrata risulta essere la seguente:

- (0.00 – 1.30) – **Terreno con Riporto Antropico;**
- (1.30 – 2.80) – **Sabbia Limosa Ghiaiosa;**
- (2.80 – 8.00) – **Sabbia Ghiaiosa;**
- (8.00 – 10.00) – **Argilla Limosa.**

La falda è stata intercettata ad una profondità di 5.60 metri.

Di seguito sono mostrate le foto delle cassette catalogatrici:



*Figura 6.8 – Casseta Catalogatrice 0-5 m*



*Figura 6.9 – Casseta Catalogatrice 5-10 m*



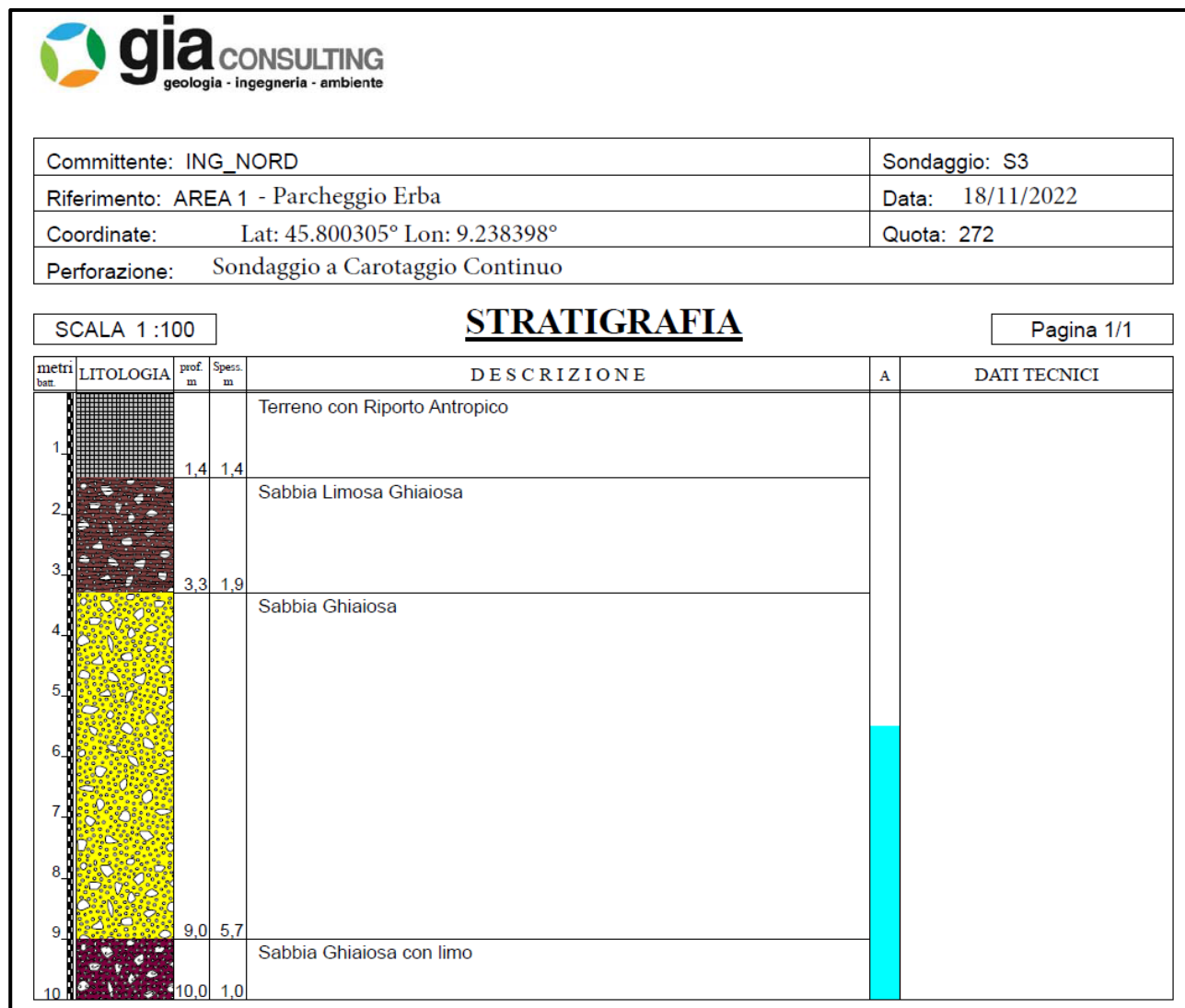
## ➤ SONDAGGIO 3

Nel sondaggio Nr.3 sono state effettuate 3 prove di permeabilità a carico variabile (profondità in tabella 1); in figura 6.10 è mostrata la foto di campo del sondaggio a carotaggio continuo.



*Figura 6.10 – Foto di Campo Sondaggio 3*

La stratigrafia ricostruita, risulta essere la seguente:



*Figura 6.11 – Stratigrafia Sondaggio 3*

La stratigrafia riscontrata risulta essere la seguente:

- (0.00 – 1.30) – **Terreno con Riporto Antropico;**
- (1.30 – 2.80) – **Sabbia Limosa Ghiaiosa;**
- (2.80 – 8.00) – **Sabbia Ghiaiosa;**
- (8.00 – 10.00) – **Argilla Limosa.**

La falda è stata intercettata a 5.50 metri.





Di seguito vengono mostrate le foto delle cassette catalogatrici:



*Figura 6.12 – Cassetta Catalogatrice 0-5 m*





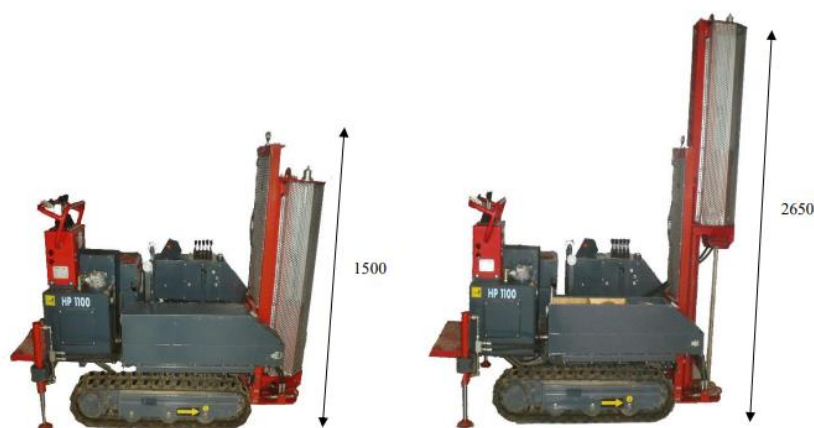
*Figura 6.13 – Cassetta Catalogatrice 5-10 m*



## 6.2 PROVA PENETROMETRICA DPSH

La prova penetrometrica dinamica DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica di dimensioni standard, infissa per battitura nel terreno, per mezzo di un idoneo dispositivo di percussione. Viene registrato il numero di colpi necessari per l'infissione ogni 20 cm di affondamento. L'attrezzatura è composta da una batteria di aste lunghe 1 metro, con diametro di 32 mm, alla cui estremità inferiore è collegata una punta conica avente angolo di apertura di 60° e da un maglio battente di 63.5 kg che viene fatto cadere da un'altezza di 75 cm

Peso complessivo:	800 Kg
Altezza massima:	2650 mm
Altezza minima:	1500 mm
Lunghezza:	1500 mm
Larghezza:	1000 mm



*Figura 6.14. – Penetrometro DPSH*

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi d) misurando il numero di colpi N necessari.

Le Prove Penetrometriche Dinamiche sono molto diffuse ed utilizzate nel territorio da geologi e geotecnici, data la loro semplicità esecutiva, economicità e rapidità di esecuzione.

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di “catalogare e parametrizzare” il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette inoltre di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la quota di eventuali falde e superfici di rottura sui pendii, e la consistenza in generale del terreno.

L'utilizzo dei dati, ricavati da correlazioni indirette e facendo riferimento a vari autori, dovrà comunque essere trattato con le opportune cautele e, possibilmente, dopo esperienze geologiche acquisite in zona.

Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono i seguenti:

- peso massa battente M;
- altezza libera caduta H;
- punta conica: diametro base cono D, area base A (angolo di apertura  $\alpha$ );
- avanzamento (penetrazione) d ;
- presenza o meno del rivestimento esterno (fanghi bentonitici).

Con riferimento alla classificazione ISSMFE (1988) dei diversi tipi di penetrometri dinamici (vedi tabella sotto riportata) si rileva una prima suddivisione in quattro classi (in base al peso M della massa battente) :

- tipo LEGGERO (DPL);
- tipo MEDIO (DPM);
- tipo PESANTE (DPH);
- **tipo SUPERPESANTE (DPSH).**



Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici:

Tipo	Sigla di riferimento	peso della massa M (kg)	prof. max indagine battente (m)
Leggero	DPL (Light)	$M < 10$	8
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$	20-25
Pesante	DPH (Heavy)	$40 < M < 60$	25
Super pesante (Super Heavy)	DPSH	$M \geq 60$	25

*Tabella 6.2. – Penetrometro DPSH*

#### ➤ Penetrometri in uso in Italia

In Italia risultano attualmente in uso i seguenti tipi di penetrometri dinamici (non rientranti però nello Standard ISSMFE):

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-30) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)

massa battente  $M = 30$  kg, altezza di caduta  $H = 0.20$  m, avanzamento  $d = 10$  cm, punta conica ( $\alpha = 60-90^\circ$ ), diametro  $D = 35.7$  mm, area base cono  $A = 10$  cm<sup>2</sup> rivestimento / fango bentonitico : talora previsto;

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-20) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)

massa battente  $M = 20$  kg, altezza di caduta  $H = 0.20$  m, avanzamento  $d = 10$  cm, punta conica ( $\alpha = 60-90^\circ$ ), diametro  $D = 35.7$  mm, area base cono  $A = 10$  cm<sup>2</sup> rivestimento / fango bentonitico : talora previsto;

- DINAMICO PESANTE ITALIANO (SUPERPESANTE secondo la classifica ISSMFE)

massa battente  $M = 73$  kg, altezza di caduta  $H = 0.75$  m, avanzamento  $d = 30$  cm, punta conica ( $\alpha = 60^\circ$ ), diametro  $D = 50.8$  mm, area base cono  $A = 20.27$  cm<sup>2</sup> rivestimento: previsto secondo precise indicazioni;

- DINAMICO SUPERPESANTE (Tipo EMILIA)

massa battente  $M=63.5$  kg, altezza caduta  $H=0.75$  m, avanzamento  $d=20-30$  cm, punta conica ( $\alpha = 60^\circ-90^\circ$ ) diametro  $D = 50.5$  mm, area base cono  $A = 20$  cm<sup>2</sup>, rivestimento / fango bentonitico : talora previsto.

### ➤ Correlazione con Nspt

Poiché la prova penetrometrica standard (SPT) rappresenta, ad oggi, uno dei mezzi più diffusi ed economici per ricavare informazioni dal sottosuolo, la maggior parte delle correlazioni esistenti riguardano i valori del numero di colpi Nspt ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con Nspt. Il passaggio viene dato da:

$$NSPT = \beta_t \cdot N$$

Dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui  $Q$  è l'energia specifica per colpo e  $Q_{SPT}$  è quella riferita alla prova SPT.

L'energia specifica per colpo viene calcolata come segue:

$$Q = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot \delta \cdot (M + M')}$$

in cui

- M      peso massa battente.
- M'     peso aste.
- H      altezza di caduta.
- A      area base punta conica.
- d      passo di avanzamento.

Valutazione resistenza dinamica alla punta Rpd



## Formula Olandesi

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

- R<sub>pd</sub> resistenza dinamica punta (area A).  
e infissione media per colpo (d/ N).  
M peso massa battente (altezza caduta H).  
P peso totale aste e sistema battuta.

## Calcolo di (N 1)60

(N1)60 è il numero di colpi normalizzato definito come segue:

$$(N_1)_{60} = CN \cdot N_{60} \text{ con } CN = \sqrt{(Pa' / \sigma_{v0})} \quad CN < 1.7 \quad Pa = 101.32 \text{ kPa} \quad (\text{Liao e Whitman 1986})$$

$$N_{60} = N_{SPT} \cdot (ER/60) \cdot C_S \cdot C_r \cdot C_d$$

- ER/60 rendimento del sistema di infissione normalizzato al 60%.  
C<sub>s</sub> parametro funzione della controcamicia (1.2 se assente).  
C<sub>d</sub> funzione del diametro del foro (1 se compreso tra 65-115mm).  
C<sub>r</sub> parametro di correzione funzione della lunghezza delle aste.

### ➤ Metodologia di Elaborazione e correlazioni effettuate

Le elaborazioni sono state effettuate mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della GeoStru Software. Gli autori presi come riferimento sono citati nelle tabelle inerenti alla prova e interessano la granulometria osservate nei sondaggi. I terreni sono stati trattati come incoerenti.

## 6.2.1. Risultati Prova Penetrometrica

In totale è stata effettuata una prova penetrometrica, prossima ai sondaggi a carotaggio continuo, con l'obiettivo di caratterizzare geo-meccanicamente gli orizzonti rinvenuti durante i sondaggi (figura 15).



*Figura 6.15. – Indagini Penetrometriche DPSH*

La prova penetrometrica è stata spinta fino ad una profondità di 11.00 metri.

Nome	Data	Profondità (m)	Ubicazione
Penetrometrica 1	16/11/2022	11.00	Lat: 45.801260° Lon: 9.237746°

*Tabella 6.3. – Indagini Penetrometriche DPSH*



➤ **DPSH\_1**

Di seguito viene riportata la foto della prova DPSH\_1 (Fig.6.16):



*Figura 6.16 – Foto di campo delle Indagini Penetrometriche DPSH\_1*

In tabella 6.4 sono mostrati il numero di colpi per le DPSH\_1, e successivamente i parametri geomeccanici stimati; la penetrometrica si è spinta fino ad una profondità di 11.00.

In figura 6.17 i risultati della prova in forma grafica.

Strumento utilizzato...DPSH TG 63-200 PAGANI

Prova eseguita in data 21-11-2022

Profondità prova 11.00 mt

Falda rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0.20	1	0.855	8.98	10.51	0.90	1.05
0.40	3	0.851	26.82	31.52	2.68	3.15
0.60	2	0.847	16.34	19.29	1.63	1.93
0.80	3	0.843	24.40	28.93	2.44	2.89
1.00	3	0.840	24.29	28.93	2.43	2.89
1.20	3	0.836	24.19	28.93	2.42	2.89
1.40	7	0.833	56.22	67.50	5.62	6.75
1.60	5	0.830	36.96	44.55	3.70	4.46
1.80	3	0.826	22.09	26.73	2.21	2.67
2.00	4	0.823	29.34	35.64	2.93	3.56
2.20	3	0.820	21.92	26.73	2.19	2.67
2.40	7	0.817	50.97	62.38	5.10	6.24
2.60	5	0.814	33.72	41.41	3.37	4.14
2.80	3	0.811	20.16	24.85	2.02	2.48
3.00	1	0.809	6.70	8.28	0.67	0.83
3.20	2	0.806	13.35	16.56	1.34	1.66
3.40	4	0.803	26.61	33.13	2.66	3.31
3.60	3	0.801	18.59	23.21	1.86	2.32
3.80	11	0.798	67.94	85.09	6.79	8.51
4.00	23	0.696	123.83	177.92	12.38	17.79
4.20	24	0.694	128.79	185.65	12.88	18.57
4.40	23	0.691	123.02	177.92	12.30	17.79
4.60	13	0.739	69.74	94.34	6.97	9.43
4.80	11	0.787	62.83	79.83	6.28	7.98
5.00	4	0.785	22.79	29.03	2.28	2.90
5.20	7	0.783	39.78	50.80	3.98	5.08
5.40	16	0.731	84.88	116.11	8.49	11.61
5.60	18	0.729	89.69	123.01	8.97	12.30
5.80	17	0.727	84.50	116.18	8.45	11.62
6.00	9	0.775	47.70	61.51	4.77	6.15
6.20	14	0.724	69.24	95.68	6.92	9.57
6.40	18	0.722	88.82	123.01	8.88	12.30
6.60	17	0.720	79.08	109.78	7.91	10.98
6.80	18	0.719	83.55	116.24	8.35	11.62
7.00	11	0.767	54.50	71.04	5.45	7.10
7.20	9	0.766	44.50	58.12	4.45	5.81
7.40	9	0.764	44.41	58.12	4.44	5.81
7.60	11	0.763	51.35	67.33	5.14	6.73
7.80	16	0.711	69.66	97.93	6.97	9.79
8.00	17	0.710	73.87	104.05	7.39	10.41
8.20	12	0.759	55.72	73.45	5.57	7.35
8.40	13	0.707	56.28	79.57	5.63	7.96
8.60	22	0.656	83.95	127.98	8.40	12.80



8.80	18	0.705	73.79	104.71	7.38	10.47
9.00	15	0.703	61.39	87.26	6.14	8.73
9.20	10	0.752	43.76	58.17	4.38	5.82
9.40	8	0.751	34.96	46.54	3.50	4.65
9.60	6	0.750	24.94	33.25	2.49	3.33
9.80	3	0.749	12.45	16.63	1.25	1.66
10.00	4	0.748	16.58	22.17	1.66	2.22
10.20	4	0.747	16.55	22.17	1.66	2.22
10.40	3	0.746	12.40	16.63	1.24	1.66
10.60	4	0.744	15.76	21.17	1.58	2.12
10.80	4	0.743	15.74	21.17	1.57	2.12
11.00	3	0.742	11.79	15.88	1.18	1.59

Tabella 6.4. – Numero di colpi DPSH\_1

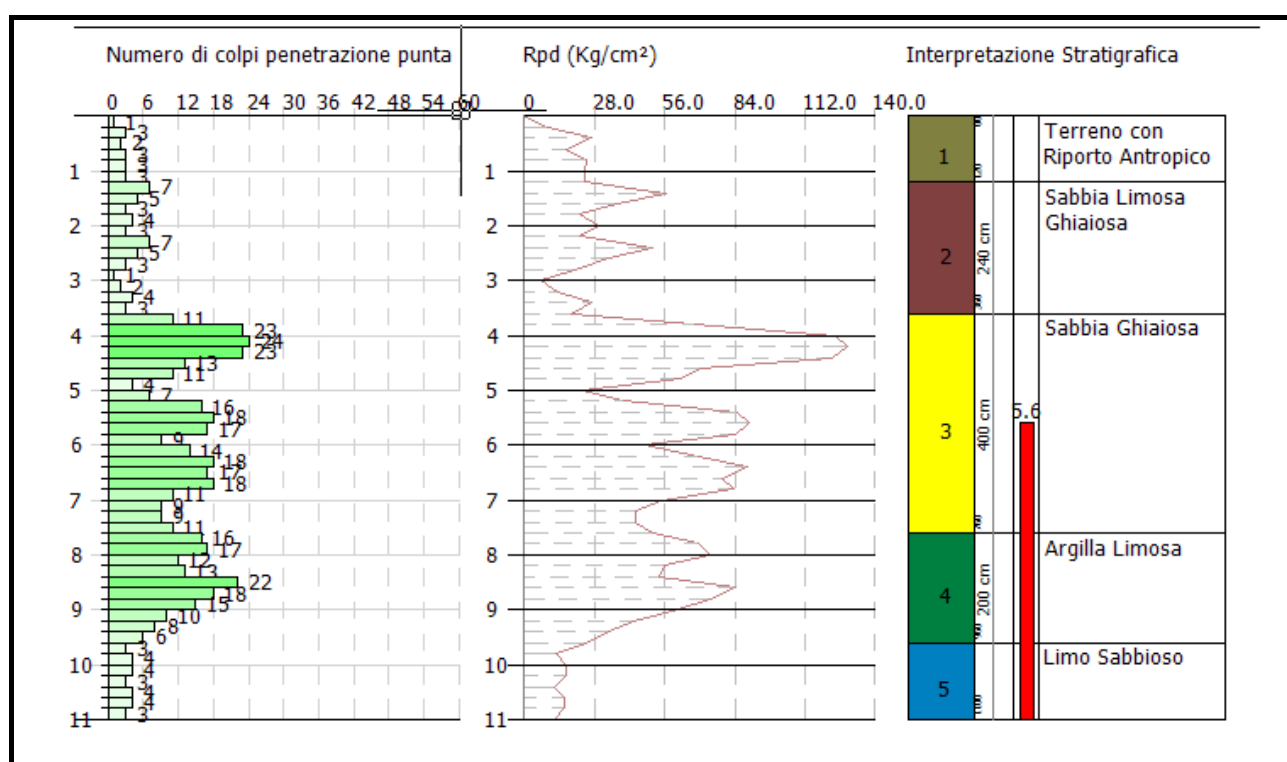


Figura 6.17 – Risultati prova penetrometrica DPSH\_1

La stratigrafia risultante risulta essere:

- (0.00 – 1.20) – Terreno con **Riporto Antropico**;
- (1.20 – 3.60) – **Sabbia Limosa Ghiaiosa**;
- (3.60 – 7.60) – **Sabbia Ghiaiosa**;
- (7.60 – 9.60) – **Argilla Limosa**;
- (9.60 – 11.00) – **Limo Sabbioso**.

**STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA DPSH\_1 (AREA A)**
**TERRENI COESIVI**
**Coesione non drenata (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	NSPT	Prof. Strato (m)	Terzaghi-Peck	Sanglerat
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	0.42	0.52
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	1.53	2.01
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	0.44	0.60

**Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)**

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Robertson (1983)	11.62
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	Robertson (1983)	41.64
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Robertson (1983)	10.90

**Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	NSPT	Prof. Strato (m)	Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner	Buisman-Sanglerat
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	61.05	72.63
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	214.14	208.20
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	57.38	68.13

**Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	NSPT	Prof. Strato (m)	Schultze	Apollonia
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	46.42	58.10
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	219.03	208.20
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	42.28	54.50

**Peso unità di volume**

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Meyerhof	1.80
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	Meyerhof	2.10
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Meyerhof	1.78



### Peso unità di volume saturo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Meyerhof	1.89
[4] - Argilla Limosa	20.82	9.60	Meyerhof	2.11
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Meyerhof	1.88

## TERRENI INCOERENTI

### Angolo di resistenza al taglio

	NSPT	Prof. Strato (m)	Meyerhof (1965)	De Mello
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	31.1	30.3
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	32.01	34.36
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	37.45	39.69
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	31.86	35.59

### Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Schmertmann (1978) (Sabbie)
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	30.20
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	47.48
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	170.24
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	44.60

### Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	26.92	54.28
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	41.25	63.91
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	151.09	132.91
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	38.69	62.31

### Classificazione AGI

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	3.65	Classificazione A.G.I	SCIOLTO
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	5.81	Classificazione A.G.I	POCO ADDENSATO
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	21.28	Classificazione A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	5.45	Classificazione A.G.I	POCO ADDENSATO

### Peso unità di volume

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m <sup>3</sup> )
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	Terzaghi-Peck 1948	1.39
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Terzaghi-Peck 1948	1.42
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	Terzaghi-Peck 1948	1.61
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Terzaghi-Peck 1948	1.42

### Peso unità di volume saturo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m <sup>3</sup> )
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	Terzaghi-Peck 1948	1.87
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Terzaghi-Peck 1948	1.89
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	Terzaghi-Peck 1948	2.00
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Terzaghi-Peck 1948	1.88



### Modulo di Poisson

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Poisson
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	(A.G.I.)	0.35
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	(A.G.I.)	0.34
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	(A.G.I.)	0.31
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	(A.G.I.)	0.34

### Modulo di deformazione a taglio dinamico (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Ohsaki (Sabbie pulite)
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	247.52
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	352.81
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	980.35
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	335.98

### Coefficiente spinta a Riposo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	K0
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	Navfac (1971-1982)	0.67
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	Navfac (1971-1982)	1.17
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	Navfac (1971-1982)	4.27
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	Navfac (1971-1982)	1.09

### Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
[1] - Terreno con Riporto Antropico	3.65	1.20	3.65	Robertson 1983	7.30
[2] - Sabbia Limosa Ghiaiosa	5.81	3.60	5.81	Robertson 1983	11.62
[3] - Sabbia Ghiaiosa	21.28	7.60	21.28	Robertson 1983	42.56
[5] - Limo Sabbioso	5.45	11.00	5.45	Robertson 1983	10.90

### 6.3 PROVA PERMEABILITA' LEFRANC – CARICO VARIABILE

La prova a carico variabile (modalità utilizzata per le indagini eseguite), è una prova in cui si esegue un riempimento del foro con acqua fino alla sommità del rivestimento; successivamente, si interrompe l'immissione di acqua e viene misurato, nel tempo, la diminuzione del livello dalla testa tubo del rivestimento fino al raggiungimento della falda; le prove a carico variabile al di sotto del livello di falda possono essere eseguite abbassando il livello dell'acqua nel foro di un'altezza nota e misurando la velocità di risalita del livello (prove in risalita), oppure riempiendo il foro d'acqua per un'altezza nota e misurando la velocità di abbassamento del livello (prova di abbassamento).

- Prova in risalita: si misura il livello di base della falda e successivamente si fa abbassare tale livello tramite una pompa sommersa fino ad una quota nota; si misura con un freatimetro la risalita del livello dell'acqua, fino al raggiungimento del livello iniziale.
- Prova in abbassamento: quando il livello della falda è stato misurato, si provvede ad immettere acqua sino ad una quota nota, misurando per tempi prestabiliti l'abbassamento per svariati minuti o fino a raggiungere il livello di base, ma bisognerà saturare il terreno in questione.

I risultati ottenuti saranno poi confrontati con la carta di Casagrande & Fauden (1940), mostrata in Figura 19.1.

CARATTERISTICHE DI PERMEABILITA' DEI TERRENI												
Coefficiente di permeabilità $k$ in cm/sec (scala logaritmica)												
Permeabilità	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
	Buona						Scarsa		Praticamente nulla			
Tipo di terreno	Ghiaia pulita		Sabbie pulite; mescolanze di sabbia pulita e ghiaia			Sabbie molto fini; limi organici e inorganici; mescolanze di sabbia, limo e argilla; tilli glaciali, depositi stratificati di argilla, ecc.			Terreni "impermeabili", cioè argille omogenee al di sotto della zona influenzata dagli agenti atmosferici			
						Terreni "impermeabili" modificati dall'azione della vegetazione e degli agenti atmosferici						
Determinazione diretta di $k$	Prova diretta sul terreno in sito mediante pompaggio, i cui risultati sono attendibili solo se propriamente eseguita. E' necessaria una considerevole esperienza.											
	Prova mediante parametro a carico costante. Non è necessaria una notevole esperienza.											
Determinazione indiretta di $k$			Permeametro a carico variabile. Attendibile. Non è necessaria notevole esperienza			Permeametro a carico variabile. Non attendibile. E' necessaria notevole esperienza			Permeametro a carico variabile. Abbastanza attendibile. E' necessaria notevole esperienza.			
	Calcolo in base alla distribuzione granulometrica, applicabile solo a ghiaie e sabbie pulite e incoerenti										Calcolo in base ai risultati delle prove di consolidazione. Attendibile. E' necessaria notevole esperienza	

Da Casagrande e Fadum (1940)

Da Casagrande e Fauden (1940)

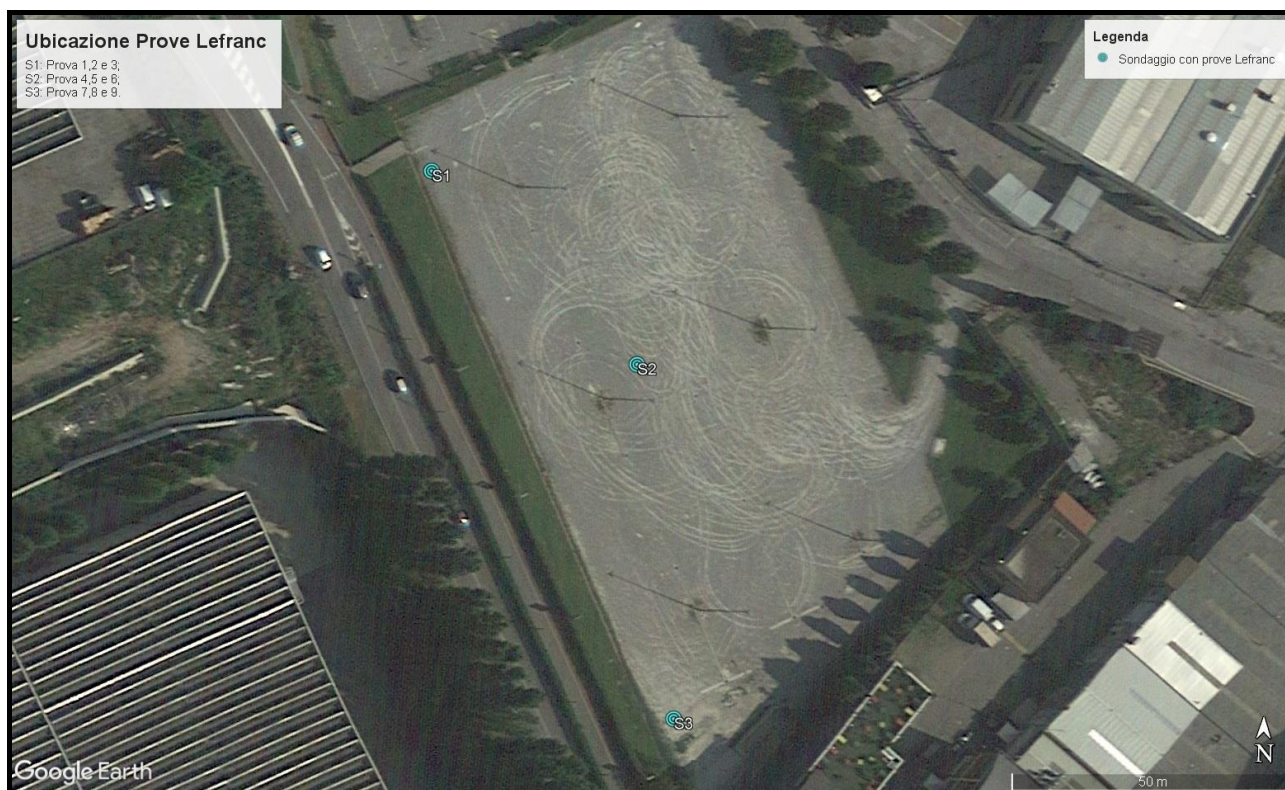
Figura 6.18 – Carta di Casagrande e Fauden



Tutte le prove sono state eseguite sopra falda, con la metodologia del carico variabile, in particolare “prova in abbassamento”, previa saturazione dei terreni causa della mancanza del livello di falda.

### 6.3.1. Risultati Prova Permeabilità Lefranc

In totale sono state effettuate 9 prove di permeabilità in foro a carico variabile (prova in abbassamento), con l'obiettivo di caratterizzare la permeabilità dei terreni investigati. Le informazioni delle profondità sono presenti in tabella 1, mentre le ubicazioni corrispondono ovviamente con quelle dei sondaggi a carotaggio continuo effettuati (Fig. 6.19).



*Figura 6.19 – Ubicazione Prove Lefranc*



➤ **Prove Lefranc S1**

Le prove Lefranc in sondaggio 1 sono state eseguite per diversi range di profondità visibili in tabella 6.5:

<b>Lefranc 1_S1</b>	16/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 1
<b>Lefranc 2_S1</b>	16/11/2022	3.00-3.50	Sondaggio 1
<b>Lefranc 3_S1</b>	16/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 1

*Tab. 6.5 – Ubicazione Prove Sondaggio 1*

Di seguito viene riportata le foto delle prove Lefranc in Sondaggio 1 (Fig. 6.20):



*Figura 6.20 – Foto di campo della prova Lefranc1*

➤ **PROVA LEFRANC 1\_S1:**

La prova Lefranc 1\_S1 è stata eseguita nel primo metro di profondità, con rivestimento a 50 centimetri, e ricadente all'interno del materiale di riporto antropico. La colonna d'acqua è stata sostenuta per 15/30 secondi; questo, probabilmente, è causato dalla scarsa compattazione del materiale e dall'elevata presenza di vuoti tra gli inerti.

La prova è stata ripetuta due volte, trattasi quindi di terreni con permeabilità molto elevata, variabile tra:  $10^{-1}$  ed 1.

➤ **PROVA LEFRANC 2\_S1:**

La prova Lefranc 2\_S1 è stata eseguita alla profondità di 3.50 metri, con rivestimento a 3.00 metri, e ricadente all'interno della: "Sabbia Limosa Ghiaiosa".

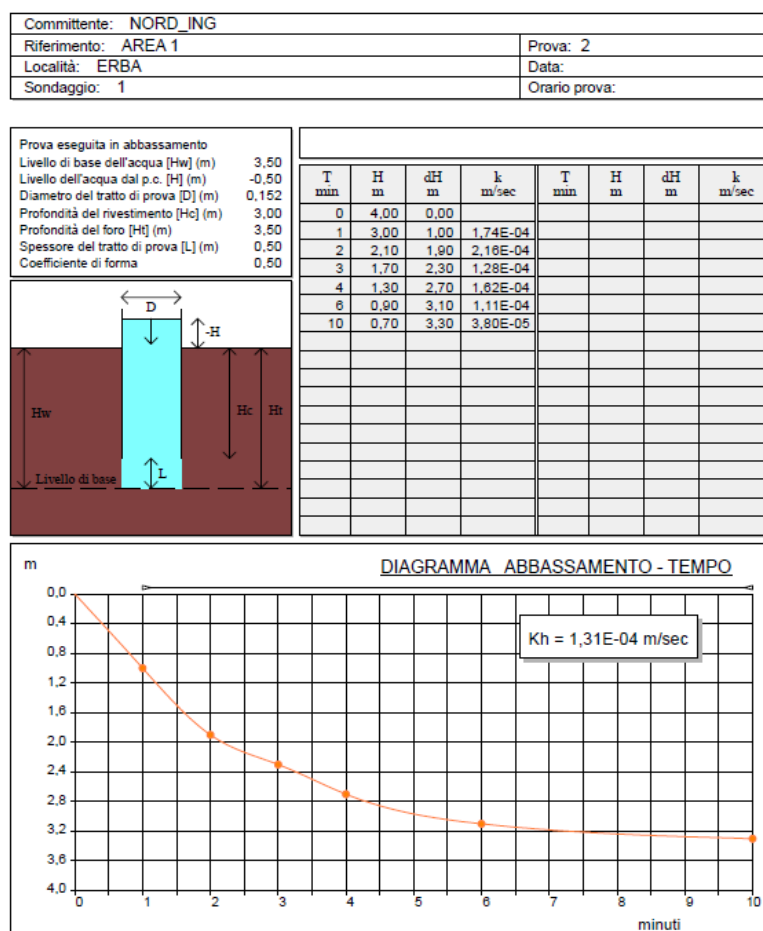


Figura 6.21 – Risultati prova Lefranc 2\_S1

Questi terreni hanno una permeabilità di  $1.31E-04$  m/s. Permeabilità Scarsa





➤ **Prove Lefranc S2**

Le prove Lefranc in sondaggio 2 sono state eseguite per diversi range di profondità visibili in tabella 6.6:

<b>Lefranc 1_S2</b>	17/11/2022	1.00-1.50	Sondaggio 2
<b>Lefranc 2_S2</b>	17/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 2
<b>Lefranc 3_S2</b>	17/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 2

*Tab. 6.6 – Ubicazione Prove Sondaggio 2*

Di seguito viene riportata le foto delle prove Lefranc in Sondaggio 2 (Fig. 6.23):



*Figura 6.23 – Foto di campo delle prove in S2*











➤ **Prove Lefranc S3**

Le prove Lefranc in sondaggio 3 sono state eseguite per diversi range di profondità visibili in tabella 6.7:

<b>Lefranc 1_S3</b>	18/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 3
<b>Lefranc 2_S3</b>	18/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 3
<b>Lefranc 3_S3</b>	18/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 3

*Tab. 6.7 – Ubicazione Prove Sondaggio 3*

Di seguito viene riportata le foto delle prove Lefranc in Sondaggio 3 (Fig. 6.27):



*Figura 6.27 – Foto di campo delle prove in S3*









## 6.4 PROVA PENETROMETRICA STANDARD

La prova SPT (figura 6.30) si esegue durante la perforazione. Consiste nel registrare il numero di colpi necessari per far penetrare di 45 cm nel terreno a fondo foro un tubo campionatore di dimensioni standard, collegato alla superficie mediante batteria di aste in testa alle quali agisce un maglio del peso di 63.5 kg che cade liberamente da un'altezza di 0.76 m.

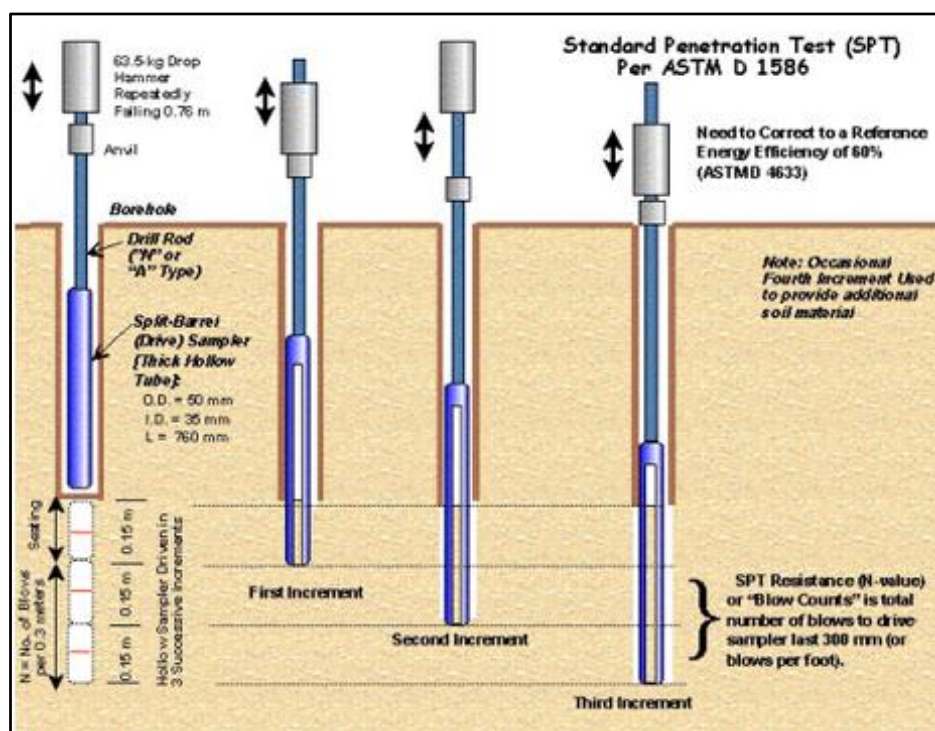


Figura 6.30. Schema della prova S.P.T.

Durante la prova si misura:

$N_1$  = numero di colpi di maglio necessari a provocare l'avanzamento del campionatore per i primi 15 cm, assunti come tratto di "avviamento";

$N_2$  = numero di colpi che provoca la penetrazione del campionatore nei successivi 15 cm;

$N_3$  = numero di colpi necessari per gli ultimi 15 cm di avanzamento.

Si assume come resistenza alla penetrazione il valore:

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

Si utilizzano le seguenti attrezzature standard:

- Aste d'infissione del diametro esterno 50 mm e peso di 7 kg/m;
- Testa di battuta di acciaio avvitata sulle aste;
- Maglio di acciaio di 63.5 kg;
- Dispositivo automatico che consente la caduta del maglio da un'altezza di 0.76 m;
- Centratore di guida per le aste fra la testa di battuta e il piano campagna.
- Carotiere munito di una punta conica di diametro 51 mm, angolo 60°.

Vi sono numerose correlazioni tra la resistenza alla penetrazione ( $N_{SPT}$ ) e i parametri geotecnici dei terreni sia granulari che coesivi:

### ➤ TERRENI GRANULARI

Le correlazioni ritenute più attendibili tra la resistenza alla penetrazione ( $N_{SPT}$ ) ed alcuni parametri geotecnici sono le seguenti:

#### 1) Correlazione di Gibbs-Holtz

Permette di determinare la densità relativa dei terreni granulari mediante la relazione tra la resistenza alla penetrazione e la pressione verticale efficace.

#### 2) Correlazione di De Mello

Permette di ricavare l'angolo di attrito in funzione dello sforzo verticale efficace.

#### 3) Le correlazioni di Schmertmann

Pongono in relazione l'angolo di attrito efficace con la densità relativa in funzione di differenti granulometrie, utilizzando sia i valori della densità relativa  $D_r$  elaborati con il metodo di *Gibbs-Holtz* che con il metodo di *Terzaghi-Pech-Skempon*.

$$f = 28 + 0.14 \cdot D_r$$

$$f = 31.5 + 0.115 \cdot D_r$$

$$f = 34.5 + 0.10 \cdot D_r$$

$$f = 38 + 0.08 \cdot D_r$$

#### 4) Correlazioni tra la resistenza alla penetrazione $N_{SPT}$ e la compressibilità

I metodi si dividono in due gruppi.

Il primo gruppo collega il valore della resistenza penetrometrica dinamica al cedimento; questo comprende il metodo di *Terzaghi e Peck*, di *Meyerhof e di Peck-Bazaraa*.

Il secondo gruppo si basa su correlazioni empiriche tra  $N_{SPT}$  ed il modulo di deformazione delle sabbie; il gruppo comprende il metodo di *Alpan*, di *D'Apollonia*, di *Parry*.

Dal confronto dei cedimenti calcolati con i vari metodi e dei cedimenti reali misurati in America da *Peck (1948)* – *Bazaraa (1967)* – *Baker (1965)*, *Parry (1971)* sembra che il metodo di Parry risulta più attendibile, mentre i metodi più sperimentati sono quelli di *Meyerhof*, *Peck-Bazaraa*, *Alpan* e di *Burland-Burbidge (1984)*.



#### 6.4.1 Risultati Prova Penetrometrica Standard

Le prove SPT (figura 3.31) eseguite sono 3 in totale, e sono riassunti nella seguente tabella 6.8:

ID SONDAGGIO	ID SPT	PROFONDITÀ (m dal p.c.)	Nr. COLPI	Nspt	TIPO DI PUNTA	Litologia
<b>S02</b>	SPT_1(S2)	1.00 m	7 – 15 - 8	23	Punta Conica Chiusa	Riporto
	SPT_2(S2)	3.00 m	7- 19 – 17	24	Punta Conica Chiusa	Sabbia Ghiaiosa
	SPT_3(S2)	5.50 m	18 – 15 - 18	33	Punta Conica Chiusa	Sabbia Ghiaiosa

*Tab. 6.8 Dettagli delle prove S.P.T.*



*Figura 6.31. Foto di campo della prova S.P.T.*

## PROVA ...SPT\_SONDAGGIO 2

Strumento utilizzato...PROVE SPT IN FORO

Prova eseguita in data 21/11/2022

Falda rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi
<b>SPT1_S2: 1.15</b>	7
1.30	15
1.45	8
<b>SPT2_S2: 3.15</b>	7
3.30	19
3.45	17
<b>SPT3_S2: 5.65</b>	18
5.80	15
5.95	18

## STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA SPT\_SONDAGGIO 2

### TERRENI COESIVI

#### Coesione non drenata (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Terzaghi-Peck
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	1.55

#### Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	Robertson (1983)	46.00

#### Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner	Buisman-Sanglerat
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	236.38	230.00

#### Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Schultze	Apollonia
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	244.10	230.00

### Classificazione AGI

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE

### Peso unità di volume

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	Meyerhof	2.11

### Peso unità di volume saturo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )
Sabbia Limosa Ghiaiosa	23	1.45	Meyerhof	2.17

### TERRENI INCOERENTI

#### Densità relativa

	NSPT	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957
Riporto	23	1.45	59.1
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	63.12
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	48.53

#### Angolo di resistenza al taglio

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION)
Riporto	23	1.45	23	33.90
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	36.80
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	36.20

#### Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa)
Riporto	23	1.45	23	268.10
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	370.50
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	276.20



### Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Farrent 1963
Riporto	23	1.45	23	128.30
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	192.60
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	135.40

### Classificazione AGI

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Riporto	23	1.45	23	Classificazione A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Classificazione A.G.I	ADDENSATO
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Classificazione A.G.I	ADDENSATO

### Peso unità di volume

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m <sup>3</sup> )
Riporto	23	1.45	23	Terzaghi-Peck 1948	1.63
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Terzaghi-Peck 1948	1.75
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Terzaghi-Peck 1948	1.64

### Peso unità di volume saturo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m <sup>3</sup> )
Riporto	23	1.45	23	Terzaghi-Peck 1948	2.01
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Terzaghi-Peck 1948	2.09
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Terzaghi-Peck 1948	2.02

### Modulo di Poisson

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Poisson
Riporto	23	1.45	23	(A.G.I.)	0.31
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	(A.G.I.)	0.28
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	(A.G.I.)	0.31

### Modulo di deformazione a taglio dinamico (Kg/cm<sup>2</sup>)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Ohsaki (Sabbie pulite)	Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982)
Riporto	23	1.45	23	1238.62	849.04
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	1887.29	1116.38
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	1289.18	871.40

### Velocità onde di taglio

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Velocità onde di taglio (m/s)
Riporto	23	1.45	23	Ohta & Goto (1978) Limi	110.6
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Ohta & Goto (1978) Limi	151.17
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Ohta & Goto (1978) Limi	159.81

i

### Coefficiente spinta a Riposo

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	K0
Riporto	23	1.45	23	Navfac (1971-1982)	4.56
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Navfac (1971-1982)	6.40
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Navfac (1971-1982)	4.72

### Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)

	NSPT	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
Riporto	23	1.45	23	Robertson 1983	70
Sabbia Limosa Ghiaiosa	36	3.45	36	Robertson 1983	110
Sabbia Ghiaiosa	33	5.95	24	Robertson 1983	76

## 6.5 RISULTATI PROVE DI LABORATORIO

Le prove di laboratorio sono state effettuate dal laboratorio certificato ILAG s.r.l. con sede presso Via Terracina 169/d, Napoli. I campioni analizzati sono 3 (S1-C1, S1-C2 e S1-C3), e le prove eseguite risultano essere riassunte nella tabella seguente:

- Analisi granulometrica;
- Prova di taglio diretto per il campione S1-C2;
- Prova edometrica per il campione S1-C2.

I risultati dettagliati delle prove eseguite sono inseriti nell'**Allegato 1**, mentre vengono qui mostrati i principali valori ottenuti per ogni campione indisturbato analizzato.

Campione	Profondità (m)	Apertura e descrizione	Caratteristiche fisiche generali	Analisi granulometrica	Prova di taglio diretto	Prove edometrica
S1-C1	1.00:1.50	X	-	X	-	-
S1-C2	3.00:3.50	X	X	X	X	X
S1-C3	4.50:5.00	X	-	X	-	-

*Tabella 6.9 – Indagini effettuate sui Campioni prelevati*



➤ **S1-C1**

Il Campione rimaneggiato è stato prelevato ad una profondità di 1.00/1.50 metri dal piano campagna, lungo il Sondaggio S1 (Figura 6.32):

Committente:	NORD_ING	Sondaggio: S1
Riferimento:	AREA PARCHEGGIO - ERBA	Data: 16/11/2022
Coordinate:	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°	Quota: 271
Perforazione:	Sondaggio a Carotaggio Continuo	

SCALA 1:100				<b>STRATIGRAFIA</b>		Pagina 1/1	
metri batt.	LITOLOGIA	prof. m	Spess. m	DESCRIZIONE	A	Campioni	DATI TECNICI
1				Terreno con Riporto Antropico			
1		1.5	1.5	<b>S1-C1</b>		1) Rim < 1.00 1.50	
2				Sabbia Limosa Ghiaiosa			
3						2) Ind < 3.00 3.50	
4		4.0	2.5	Sabbia Ghiaiosa			
5						3) Rim < 4.50 5.00	
6		6.0	2.0	Sabbia Limosa Ghiaiosa			
6		6.5	0.5	Sabbia Ghiaiosa			
7							
8		8.0	1.5	Argilla Limosa			
9							
10		9.8	1.8	Limo Sabbioso			
10		10.0	0.2				

Fig. 6.32 – Ubicazione Campione S1-C1

La descrizione del campione all'apertura della fustella, risulta essere:

*“Materiale di riporto costituito da una matrice di sabbia grossolana, di colore grigio scuro, con all'interno materiale lapideo eterometrico (con diametro massimo pari a 3,5 cm) ed eterogeneo (anche di natura antropica).”*

- Analisi Granulometrica per Setacciatura:

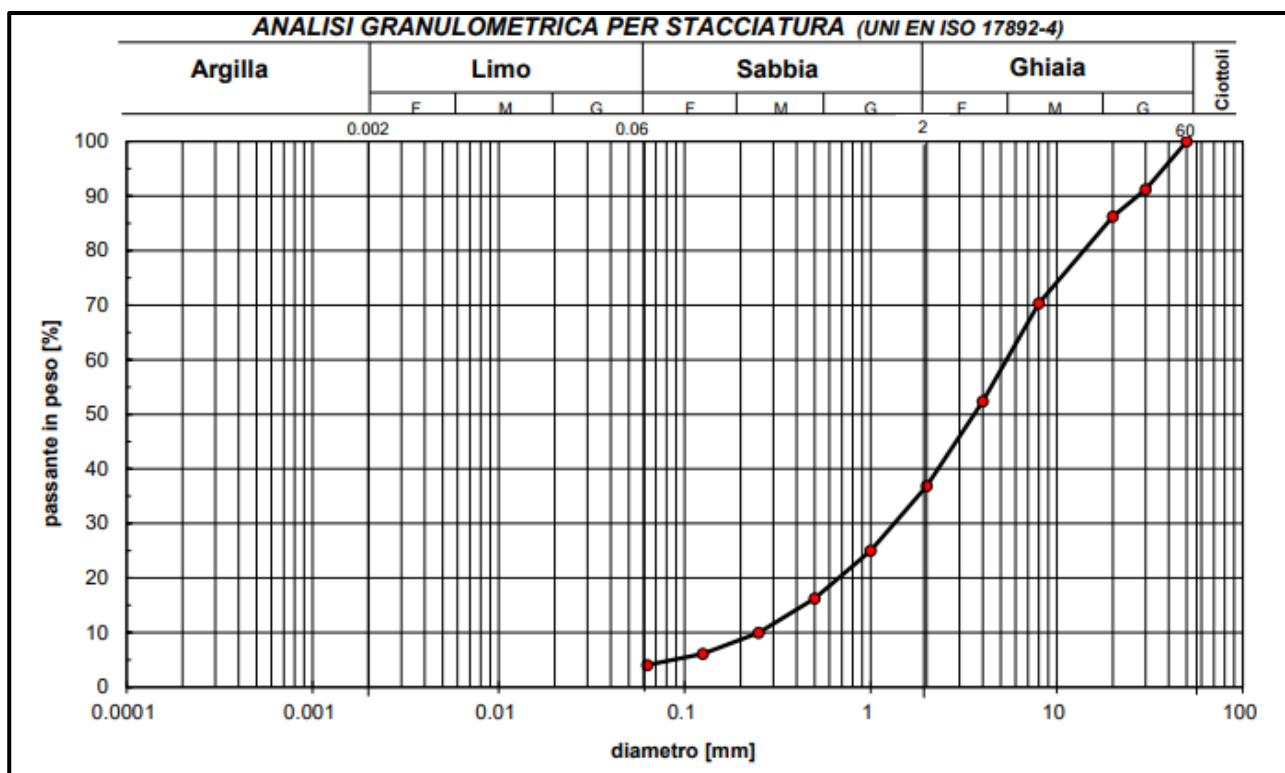


Fig. 6.33 – Curva Granulometrica SI-CI

<b>Argilla (%)</b>	0.00
<b>Limo (%)</b>	4.07
<b>Sabbia (%)</b>	32.80
<b>Ghiaia (%)</b>	63.13

Tab. 6.10 – Percentuali delle frazioni granulometriche presenti (SI-CI)

Classificazione: **Ghiaia con sabbia**

➤ S1-C2

Il Campione indisturbato è stato prelevato ad una profondità di 3.00/3.50 m, lungo il Sondaggio S1 (Figura 6.34):

Committente:	NORD_ING	Sondaggio:	S1
Riferimento:	AREA PARCHEGGIO - ERBA	Data:	16/11/2022
Coordinate:	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°	Quota:	271
Perforazione:	Sondaggio a Carotaggio Continuo		

SCALA 1 :100				<b>STRATIGRAFIA</b>		Pagina 1/1	
metri batt.	LITOLOGIA	prof. m	Spes. m	DESCRIZIONE	A	Campioni	DATI TECNICI
1.				Terreno con Riporto Antropico		1) Rim < 1.00 1.50	
2.		1.5	1.5	Sabbia Limosa Ghiaiosa			
3.						2) Ind < 3.00 3.50	
4.		4.0	2.5	Sabbia Ghiaiosa		3) Rim < 4.50 5.00	
5.							
6.		6.0	2.0	Sabbia Limosa Ghiaiosa			
7.		6.5	0.5	Sabbia Ghiaiosa			
8.		8.0	1.5	Argilla Limosa			
9.							
10.		9.8	1.8	Limo Sabbioso			
		10.0	0.2				

Fig. 6.34 – Ubicazione Campione S1-C2



La descrizione del campione all'apertura della fustella, risulta essere:

*“Campione non omogeneo. La parte superiore (20 cm) è costituita da una matrice sabbio-limosa di colore grigio-verde, con inclusi lapidei eterometrici (diametro massimo pari a 3 cm) ed eterogenei, a spigoli da vivi ad arrotondati, da sciolto a mediamente addensato. Molto umida. La parte inferiore (25 cm) è costituita da una sabbia con limo di colore grigio-verde, con inclusi lapidei millimetrici, presenti solo nella zona di passaggio con il livello superiore. Tracce nerastre di sostanza organica. Mediamente addensata, umida.”.*

- Caratteristiche Fisiche Generali:

<b>Peso specifico dei grani</b>	26.32 kN/m <sup>3</sup>
<b>Contenuto d'acqua</b>	0.274
<b>Peso di volume naturale</b>	19.32 kN/m <sup>3</sup>
<b>Peso di volume secco</b>	15.16 kN/m <sup>3</sup>
<b>Porosità</b>	0.424
<b>Indice di porosità</b>	0.736
<b>Grado di saturazione</b>	1.000

*Tab. 6.11 – Dati Parametri fisici generali S1-C2*



- Analisi Granulometrica per Setacciatura e Sedimentazione:

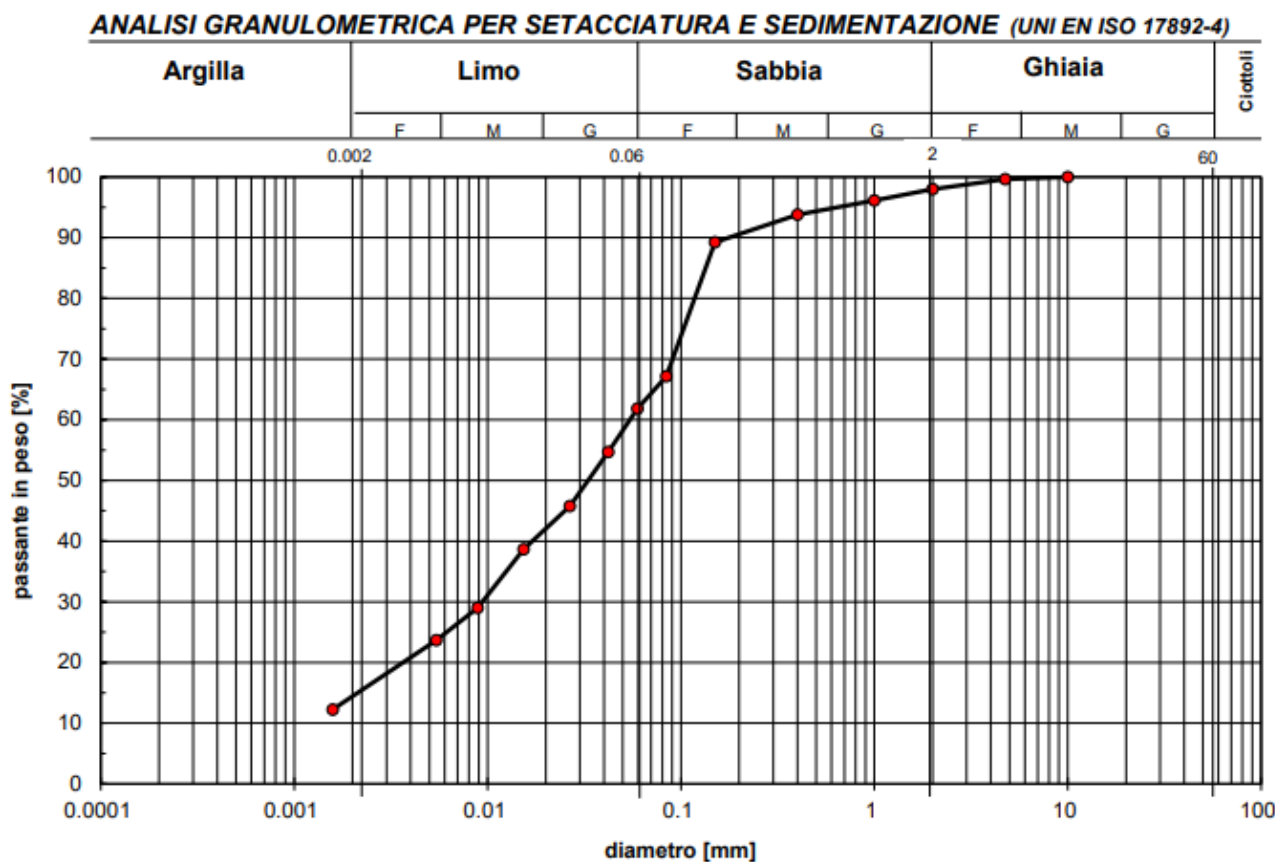


Fig. 6.35 – Curva Granulometrica S1-C2

Argilla (%)	13.49
Limo (%)	48.43
Sabbia (%)	36.08
Ghiaia (%)	1.99

Tab. 6.12 – Percentuali delle frazioni granulometriche presenti (S1-C2)

Classificazione: **Limo con sabbia argilloso**

- Prova di taglio diretto CD:

Coesione efficace $c'$	<b>12 kPa</b>
Angolo di attrito efficace $\varphi'$	<b>36°</b>

*Tab. 6.13 – Dati Prova di taglio diretto CD S1-C2*

- Prova di compressione edometrica:

INTERVALLO TRA <b>78 e 147 kPa</b>	7.3 MPa
INTERVALLO TRA <b>147 e 294 kPa</b>	11.5 MPa
INTERVALLO TRA <b>294 e 588 kPa</b>	20.6 MPa
INTERVALLO TRA <b>588 e 1176 kPa</b>	31.0 MPa

*Tab. 6.14 – Dati Prova di Compressione Edometrica S1-C2*



➤ S1-C3

Il Campione rimaneggiato è stato prelevato ad una profondità di 4.50/5.00 m, lungo il Sondaggio S1 (Figura 6.36):

Committente:	NORD_ING	Sondaggio:	S1
Riferimento:	AREA PARCHEGGIO - ERBA	Data:	16/11/2022
Coordinate:	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°	Quota:	271
Perforazione:	Sondaggio a Carotaggio Continuo		

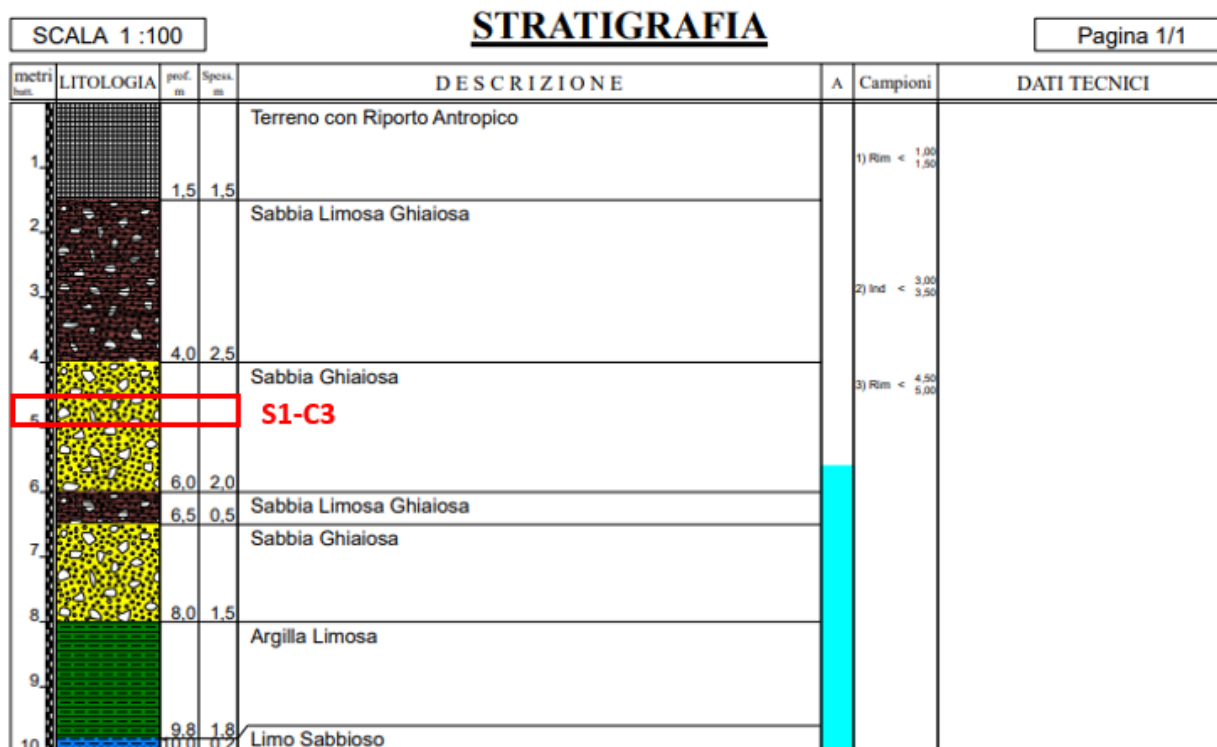


Fig. 6.36 – Ubicazione Campione S1-C3

La descrizione del campione all'apertura della fustella, risulta essere:

*“Campione rimaneggiato costituito da una matrice di sabbia fine di colore grigio con inclusi lapidei eterometrici (da millimetrici a centimetrici, con diametro massimo pari a 3,5 cm) ed eterogenei, anche di natura antropica.”*



- Analisi Granulometrica per Setacciatura:

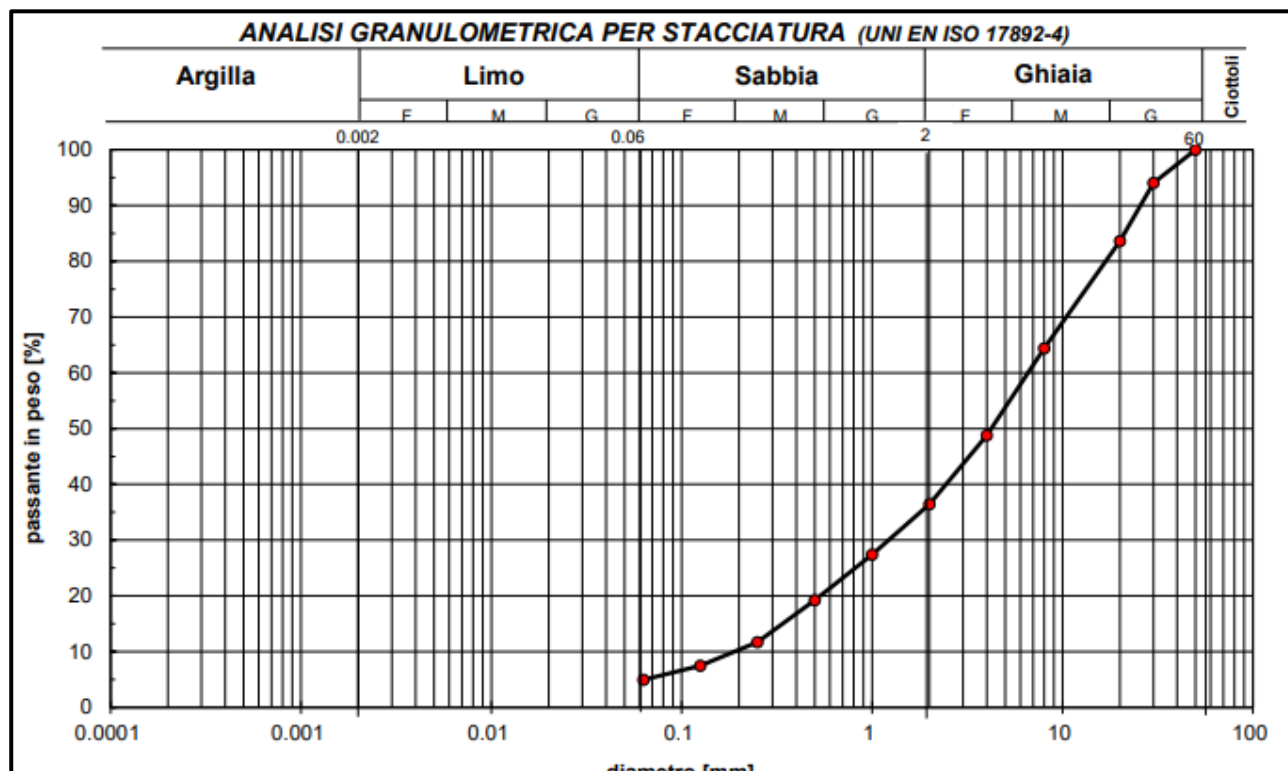


Fig. 6.37 – Curva Granulometrica S1-C3

Argilla (%)	0.00
Limo (%)	4.96
Sabbia (%)	31.50
Ghiaia (%)	63.54

Tab. 6.15 – Percentuali delle frazioni granulometriche presenti (S1-C3)

Classificazione: **Ghiaia con Sabbia debolmente Limosa.**

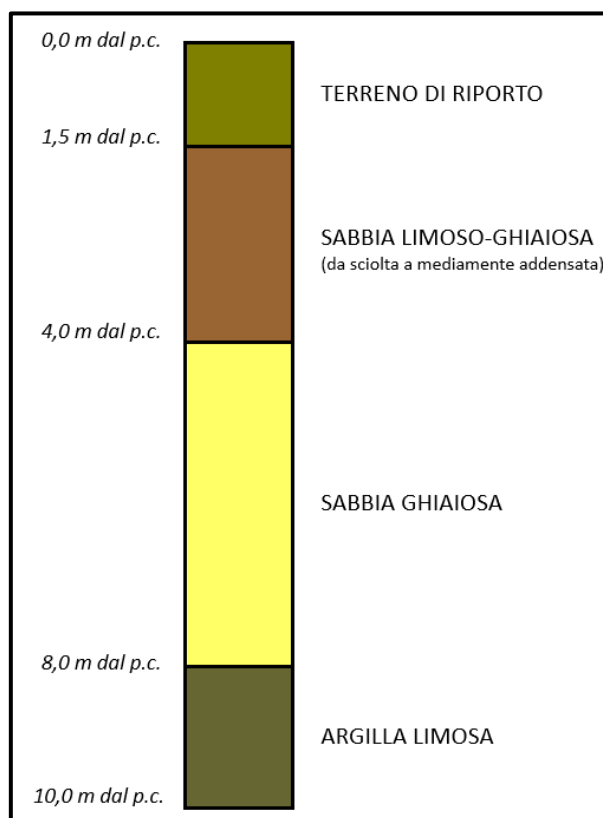
## 6.6 MODELLO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Il modello geotecnico è stato individuato grazie alla campagna di indagini eseguita e all'analisi dei campioni prelevati e analizzati in laboratorio, che ha compreso:

- n° 3 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (10 metri per ogni sondaggio);
- n°1 Penetrometrica pesante (DPSH);
- n°3 Standard Penetration Test;
- n°1 Campione indisturbato;
- n°2 Campioni Rimaneggiati.

I risultati delle prove di laboratorio sono espone nel Paragrafo 6.4 della seguente relazione e riportati nell'**Allegato 1**.

Si riassumono, quindi, di seguito i litotipi principali individuati, nell'areale di interesse.



*Fig. 6.38 – Modello Geotecnico dell'area di studio*



- **TERRENO DI RIPORTO:** raggiunge uno spessore di circa 1,5 m ed è costituito da un terreno rimaneggiato sabbioso grossolano;

Descrizione	Valore
Angolo di resistenza al taglio	$\approx 32^\circ$
Modulo di Young	$\approx 30.2 \text{ Kg/cm}^2$
Modulo di Poisson	0.33
Peso unità di volume naturale	$\approx 14.81 \text{ KN/m}^3$
Peso unità di volume saturo	$\approx 19.02 \text{ KN/m}^3$

*Tab. 6.16 – Riassunto parametri geotecnici medi per il terreno di riporto*

- **SABBIA LIMOSO-GHIAIOSA:** raggiunge uno spessore di circa 2 m ed è costituito da una matrice sabbioso-limosa con inclusi lapidei eterometrici, da sciolta a mediamente addensata;

Descrizione	Valore
Angolo di resistenza al taglio	$\approx 36^\circ$
Coesione	$\approx 0.12 \text{ Kg/cm}^2$
Modulo di Young	$\approx 52 \text{ Kg/cm}^2$
Modulo di Poisson	0.34
Peso specifico dei grani	$26.32 \text{ kN/m}^3$
Contenuto d'acqua	0.274
Peso unità di volume naturale	$\approx 19.32 \text{ KN/m}^3$
Peso unità di volume secco	$\approx 15.16 \text{ KN/m}^3$
Indice di porosità	$\approx 0.736$
Grado di saturazione	$\approx 1.000$
Porosità	$\approx 0.424$

*Tab. 6.17 – Riassunto parametri geotecnici medi per il livello di sabbia limoso-ghiaiosa*



- **SABBIA GHIAIOSA:** caratterizzata da uno spessore di circa 4 metri e raggiunge circa 8 metri dal piano campagna. Risulta costituita da una matrice sabbiosa fine con inclusi lapidei eterometrici.

Descrizione	Valore
Angolo di resistenza al taglio	$\approx 37^\circ$
Modulo di Young	$\approx 199 \text{ Kg/cm}^2$
Modulo di Poisson	0.31
Peso unità di volume naturale	$\approx 15.9 \text{ KN/m}^3$
Peso unità di volume saturo	$\approx 19.7 \text{ KN/m}^3$

*Tab. 6.18 – Riassunto parametri geotecnici medi per il livello di sabbia ghiaiosa*

- **ARGILLA LIMOSA:** rappresenta una lente a matrice argilloso-limosa che raggiunge uno spessore di circa 2 metri nella porzione nord-occidentale dell'area di studio (sondaggi S1-S2), mentre non è stata rinvenuta nel settore sud-orientale (sondaggio S3).

Descrizione	Valore
Coesione non drenata	$\approx 1.77 \text{ Kg/cm}^2$
Modulo di Young	$\approx 208 \text{ Kg/cm}^2$
Peso unità di volume naturale	$\approx 20.6 \text{ KN/m}^3$
Peso unità di volume saturo	$\approx 20.7 \text{ KN/m}^3$

*Tab. 6.19 – Riassunto parametri geotecnici medi per il livello di argilla limosa*

## 7. INDAGINI GEOFISICHE EFFETTUATE

La Campagna di indagini geofisiche effettuate (Figura 7) consiste nell'acquisizione ed elaborazione di:

- 1 Indagine MASW;
- 1 Indagine REMI.



*Figura 7 – Ubicazione indagini geofisiche eseguite*



## 7.1 INDAGINI MASW

In accordo con il piano d'indagini, sono state eseguite acquisizioni di sismica attiva di tipo MASW le cui coordinate sono indicate in Tab. 7, per la caratterizzazione sismica del sottosuolo. In particolare, l'attività si è articolata in:

- ✓ n. 1 rilievo sismico per onde superficiali di tipo attivo MASW. Gli stendimenti, costituiti da n. 24 geofoni, sono finalizzati alla ricostruzione del profilo di velocità  $V_s$  per la determinazione del parametro  $V_{s,eq}$  e la definizione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle NTC 2018.

Di seguito (Tab. 7) sono riportati i dettagli delle indagini sismiche MASW eseguite:

ID Indagine	Geofoni (nr.)	Distanza Intergeofonica	Frequenza geofoni	Lunghezza Stendimento	G1/G24 Lat.	G1/G24 Lon.
<b>MASW 1</b>	24	2 m	4.5 Hz	48 m	45.800494°/ 45.800891°	9.238309°/ 9.238053°

*Tabella 7. – Dettagli MASW 1*

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame sono state effettuate una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al.,1999) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio). Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 gennaio 2018. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

con:

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

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30.0 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30.0$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il rilievo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

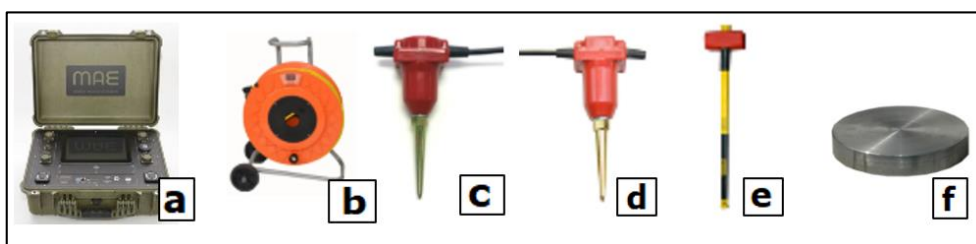
La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi.

Il metodo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30.0 m-50.0 m, in funzione della rigidità del suolo.

## 7.2. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E TECNICHE OPERATIVE

La strumentazione utilizzata per la registrazione del segnale (vedi Fig. 7.1) è costituita da:

- a) Sismografo digitale MAE X820S a 24 bit 24-96 canali;
- b) Cavo sismico MAE con 24 multi coppie per collegamento dei geofoni al sismografo;
- c) 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz;
- d) Geofono verticale trigger completo di cavo e connettore da 4.5 Hz;
- e) Mazza battente non strumentata di 8 Kg per energizzare onde compressionali;
- f) Piastra di battuta in alluminio con diametro = 210 mm e spessore = 28 mm.



*Figura 7.1. – Attrezzatura utilizzata per effettuare le indagini sismiche di tipo MASW.*

Il profilo sismico eseguito ha una lunghezza di 48 metri costituito da 24 geofoni distanziati di 2.0m.

In riferimento agli stendimenti delle indagini sismiche eseguite sono state effettuate 2 energizzazioni ad entrambi gli estremi degli stendimenti ottenendo più registrazioni di onde superficiali, al fine di fornire un modello sismo-stratigrafico del sottosuolo più affidabile.



### 7.3. ELABORAZIONE DEI DATI

Dopo l'acquisizione dei dati, l'elaborazione con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

- La prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale;
- La seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica;
- La terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

Tramite il processo di picking dei massimi di ampiezza del modo fondamentale e degli eventuali modi superiori. Successivamente mediante il processo di inversione, si ottiene il profilo di velocità con la profondità che permette di definire i parametri  $V_{Seq}$  e  $V_{s30}$ .

## 7.4. RISULTATI PROVE MASW

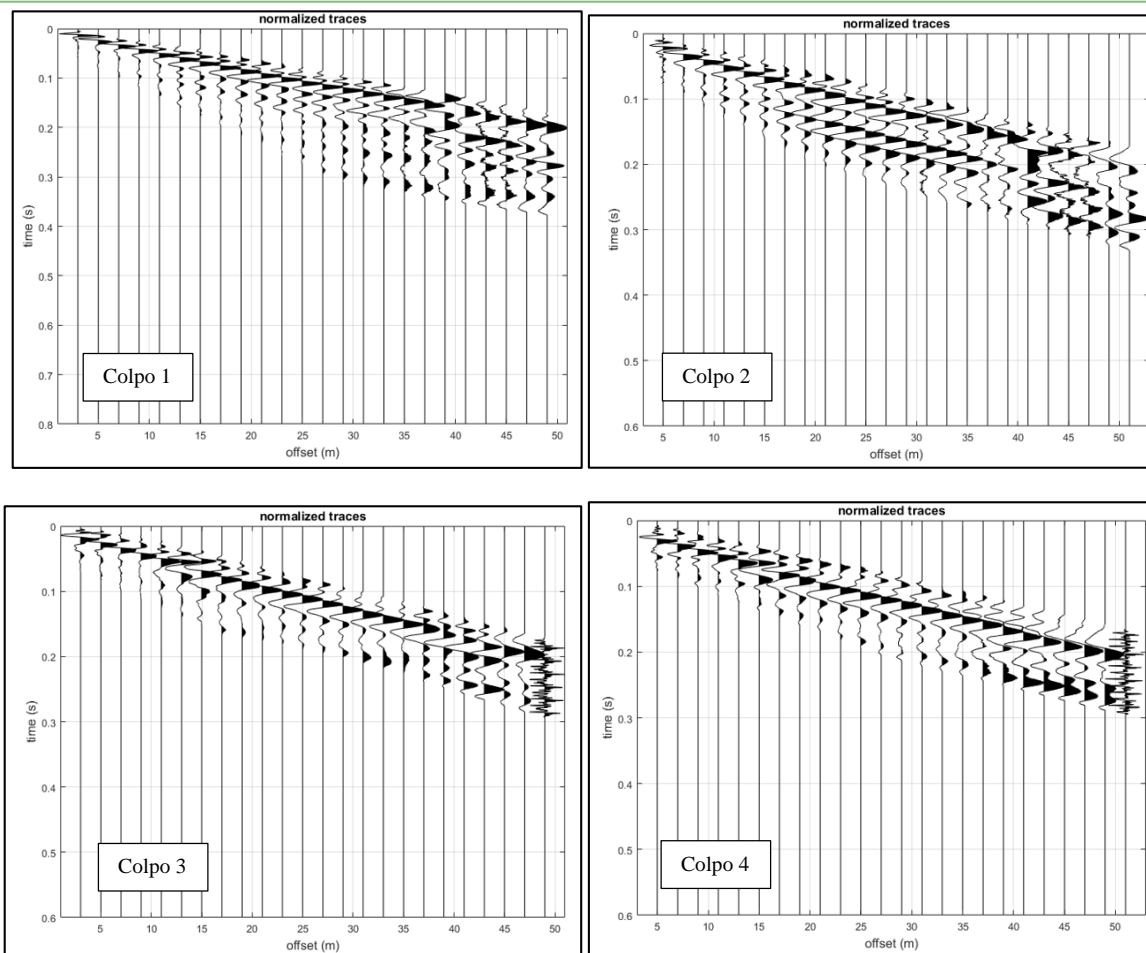
La prova MASW\_1 (Figura 7.2) è stata ubicata all'interno dell'area parcheggio comunale del Comune di Erba, in prossimità Via Cascina California. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento di lunghezza pari a 48 metri, costituito da 24 geofoni distanziati di 2 m. I colpi 1 e 3 sono stati eseguiti ad una distanza di 3 metri rispetto all'inizio dello stendimento, diversamente i colpi 2 e 4 ad una distanza di 5 metri.



*Figura 7.2. – Stendimento MASW 1.*

Frequenza minima di elaborazione (Hz)	5
Frequenza massima di elaborazione (Hz)	70
Velocità minima di elaborazione (m/s)	190
Velocità massima di elaborazione (m/s)	900

*Tabella 7.1. – Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati.*



*Figura 7.3. – Sismogrammi acquisiti e filtrati a seguito degli shots effettuati*

Per il proseguo dell'elaborazione, qui è stato scelto di mostrare solamente il colpo P3, avente un offset pari a 5 metri.



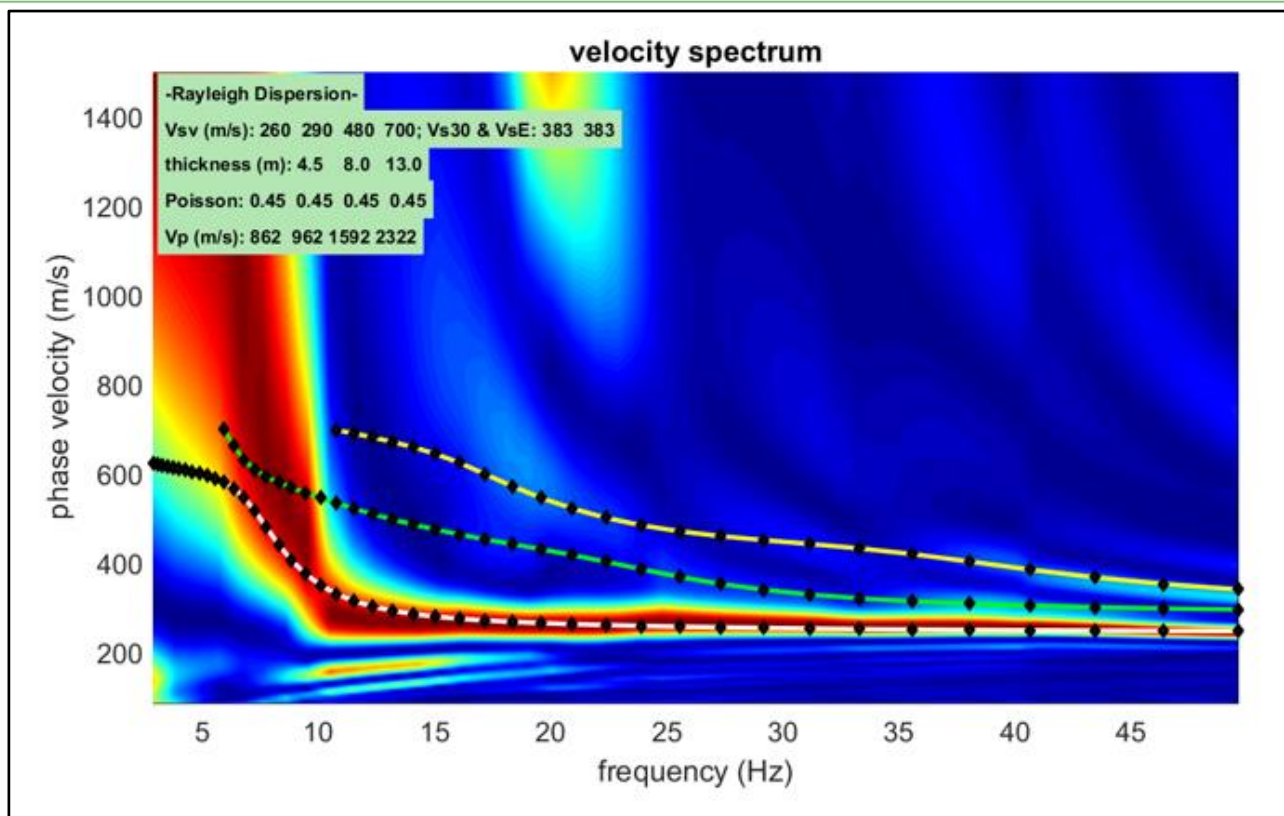


Figura 7.4. – Spettro velocità di fase – frequenza e relativo picking della traccia acquisita

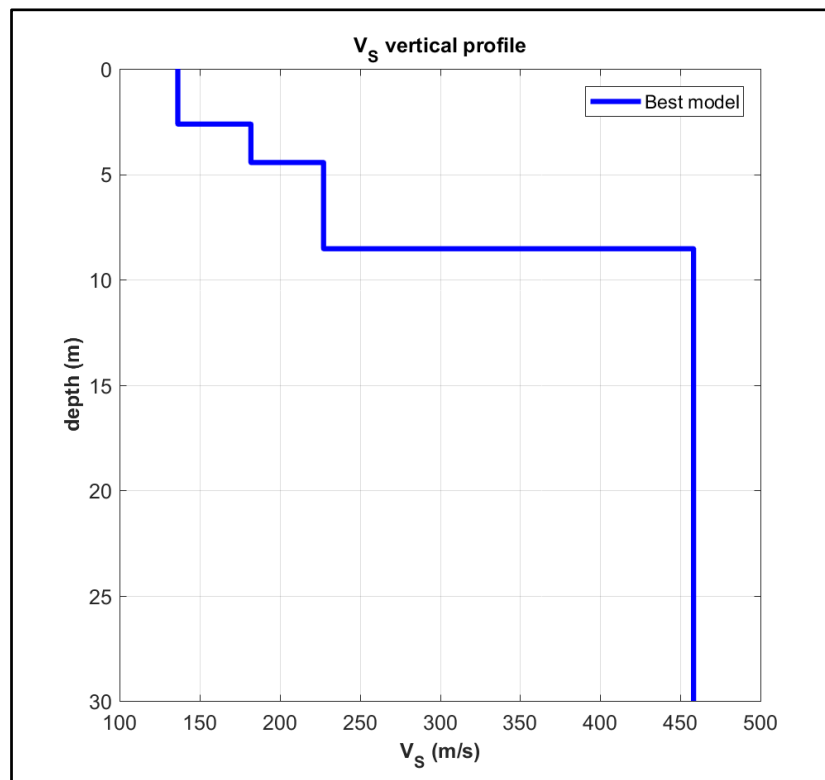
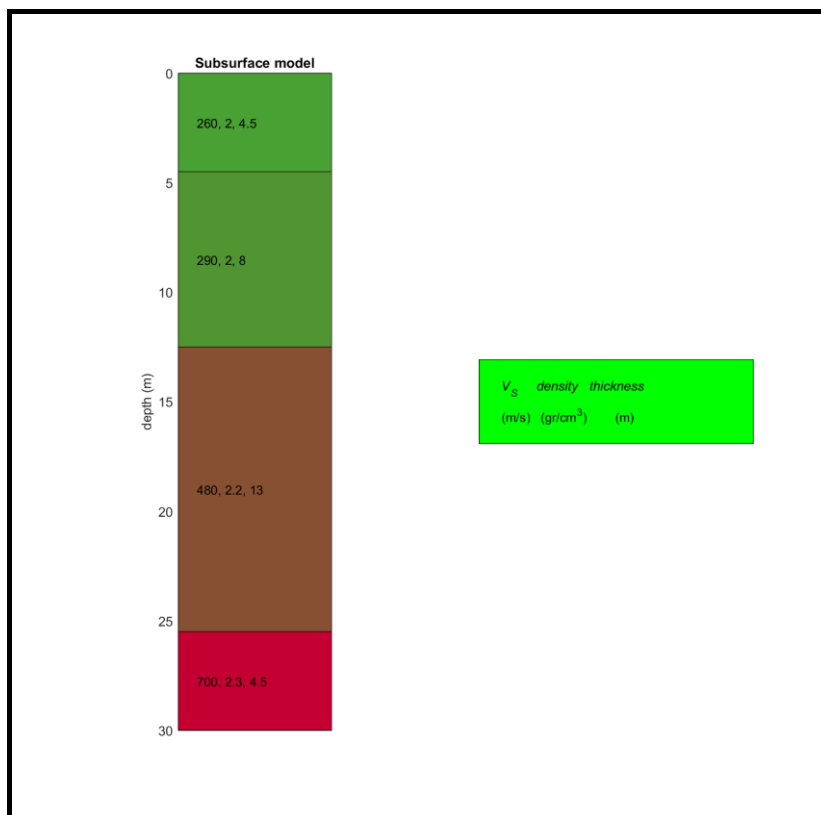
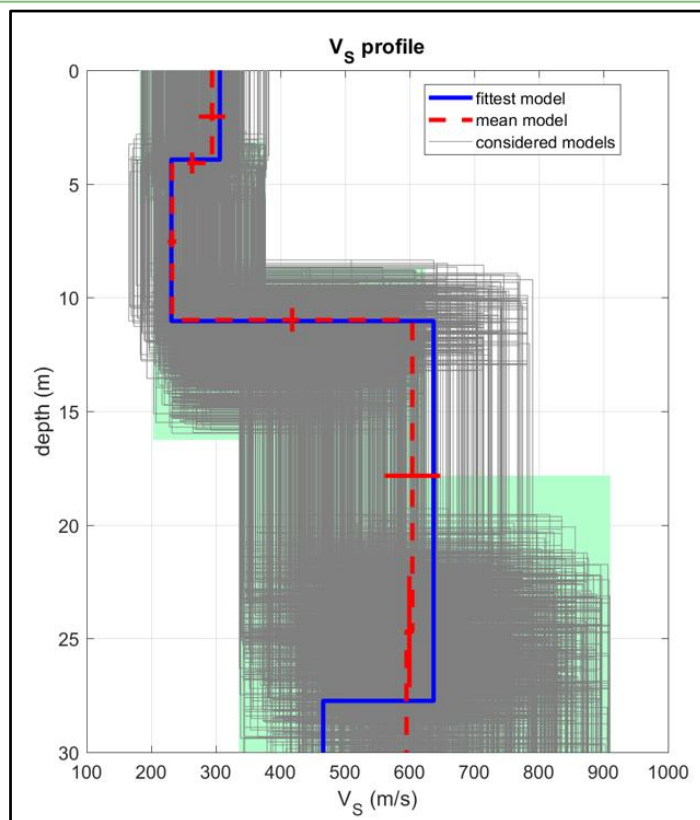


Figura 7.5 – Profilo verticale del sottosuolo



*Figura 7.6. – Risultati dell'approccio di inversione (sinistra) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (destra).*

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. Dal momento che il substrato ha una profondità maggiore di 30 metri, i parametri  $V_{s30}$  e  $V_{seq}$  si equivalgono, ottenendo un valore di:

$$V_{s30} = \mathbf{383 \text{ m/s}}$$

Categoria di suolo: **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.



## 7.5. INDAGINE REMI

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso dei microtremori prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J.Louie presso la Nevada University. Si possono così registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza copre un range da 25-30Hz fino a 2 Hz che, in condizioni ottimali, offre una dettagliata ricostruzione dell'andamento delle Vs relativamente ai primi cento metri di profondità. L'elaborazione del segnale consiste nell'operare una trasformata bidimensionale "slowness-frequency" (p-f) che analizza l'energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni della linea sismica e nel rappresentarne lo spettro di potenza su un grafico p-f.

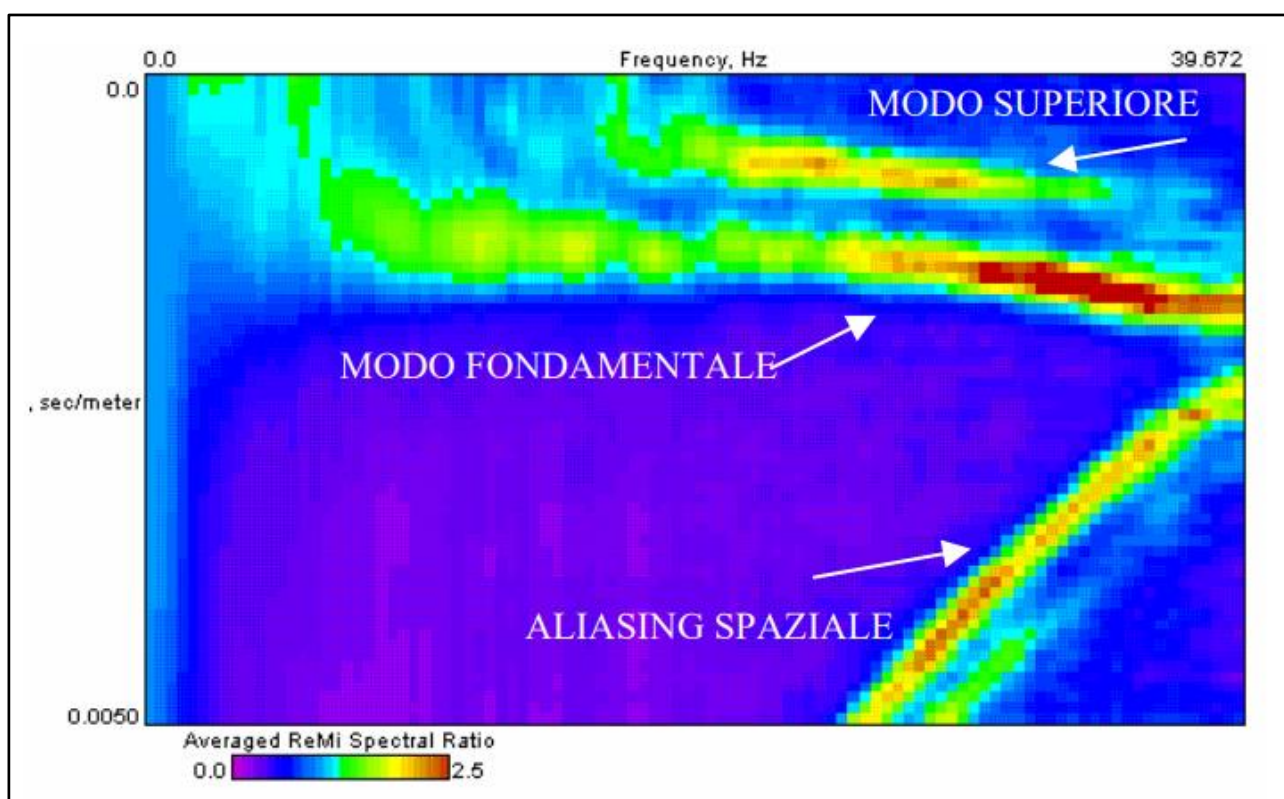
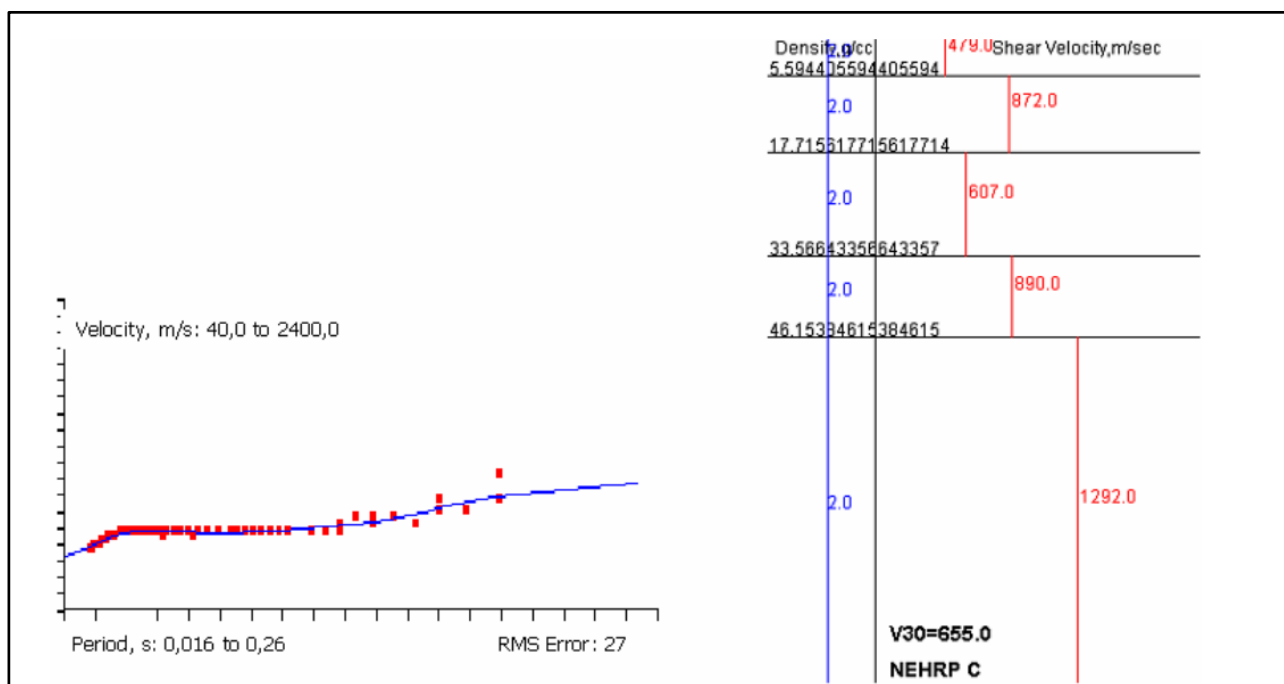


Figura 7.7 – Esempio di spettro di potenza p-f

Nell'immagine di figura 7.7 risaltano gli andamenti che possiedono sia una spiccata coerenza di fase che una potenza significativa, ed è possibile un riconoscimento visivo delle onde di Rayleigh, che hanno carattere dispersivo, da quelle riconducibili ad altri modi e tipi di onde (onde di Rayleigh di ordine superiore, onde di pressione, suono e rumore incoerente). A questo punto l'operatore, in maniera arbitraria ed in base all'esperienza, esegue un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness (p o 1/velocità di fase) per alcune frequenze. Tali valori vengono in seguito

plottati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello diretto.

I dati selezionati dall'immagine p-f vengono plottati su un diagramma nel quale compare anche una curva di dispersione calcolata a partire da un modello di Vs che è modificabile dall'interprete. Variando il numero di strati, la loro velocità e la densità nel modello, la curva di dispersione calcolata viene adattata fino a farla aderire il più possibile a quella sperimentale ottenuta con il picking (fig.2).



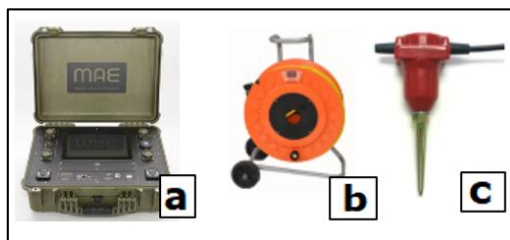
**Figura 7.8** – Esempio di modellizzazione diretta interattiva: curva di dispersione calcolata (blu) e picking (puntinato rosso) a sinistra e modello del profilo Vs/profondità a destra.

Si tratta di una modellazione diretta, monodimensionale, che può accettare inversioni di velocità con la profondità ed in cui conta molto il peso che deriva dall'abilità e dall'esperienza del geofisico. I profili di Vs ricavati con questa metodologia non presentano una soluzione univoca e cioè più di un modello può fornire curve di dispersione simili tra loro e con il medesimo RMS.

### 7.5.1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI

La strumentazione utilizzata per la registrazione del segnale (vedi Fig. 7.9) è costituita da:

- a) Sismografo digitale MAE X820S a 24 bit 24-96 canali;
- b) Cavo sismico MAE con 24 multi coppie per collegamento dei geofoni al sismografo;
- c) 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz.



*Figura 7.9 – Attrezzatura utilizzata per effettuare le indagini sismiche di tipo REMI.*

Il profilo sismico eseguito ha una lunghezza di 48 metri costituiti da 24 geofoni distanziati di 2.0m, con un tempo di acquisizione pari a 7 minuti.



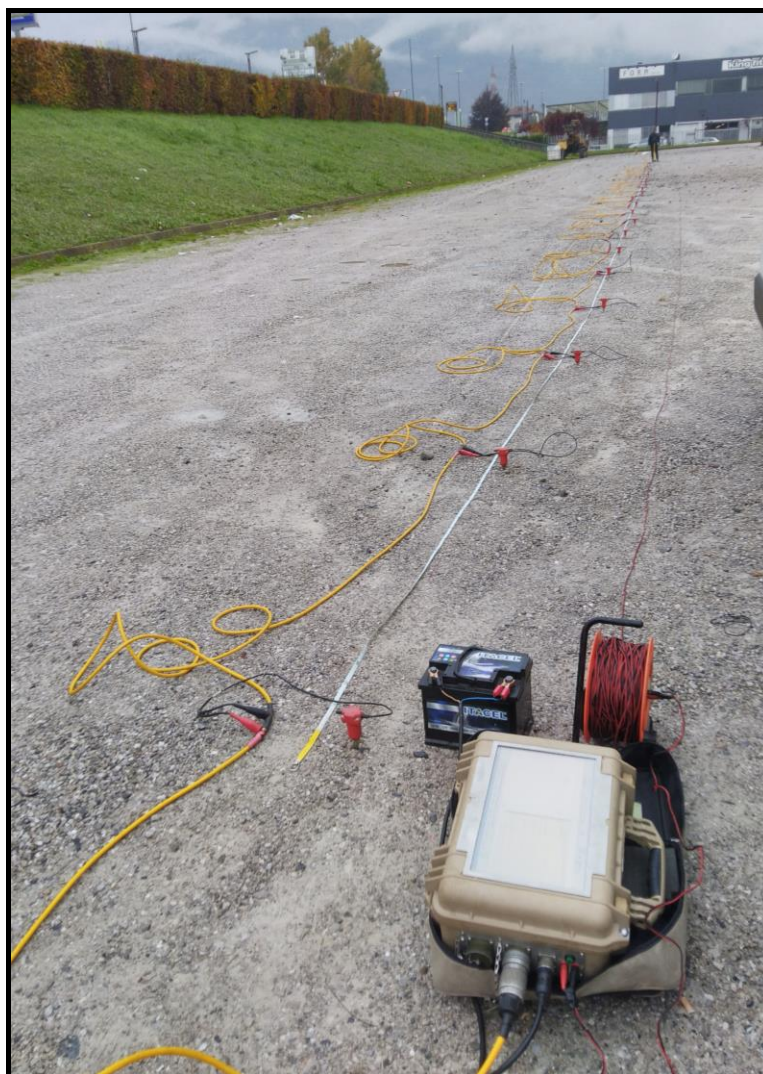
## 7.5.2. REMI\_1

L'indagine REMI\_1 (Figura 7.10) è stata svolta sulle stesse coordinate dell'indagine MASW\_1, in modo tale da poter confrontare i 2 risultati ottenuti dalle diverse prove.

Di seguito (Tab. 7.2) sono riportati i dettagli delle indagini sismiche REMI eseguite:

ID Indagine	Geofoni (nr.)	Distanza Intergeofonica	Frequenza geofoni	Lunghezza Stendimento	G1/G24 Lat.	G1/G24 Lon.
<b>REMI 1</b>	24	2 m	4.5 Hz	48 m	45.800494°/ 45.800891°	9.238309°/ 9.238053°

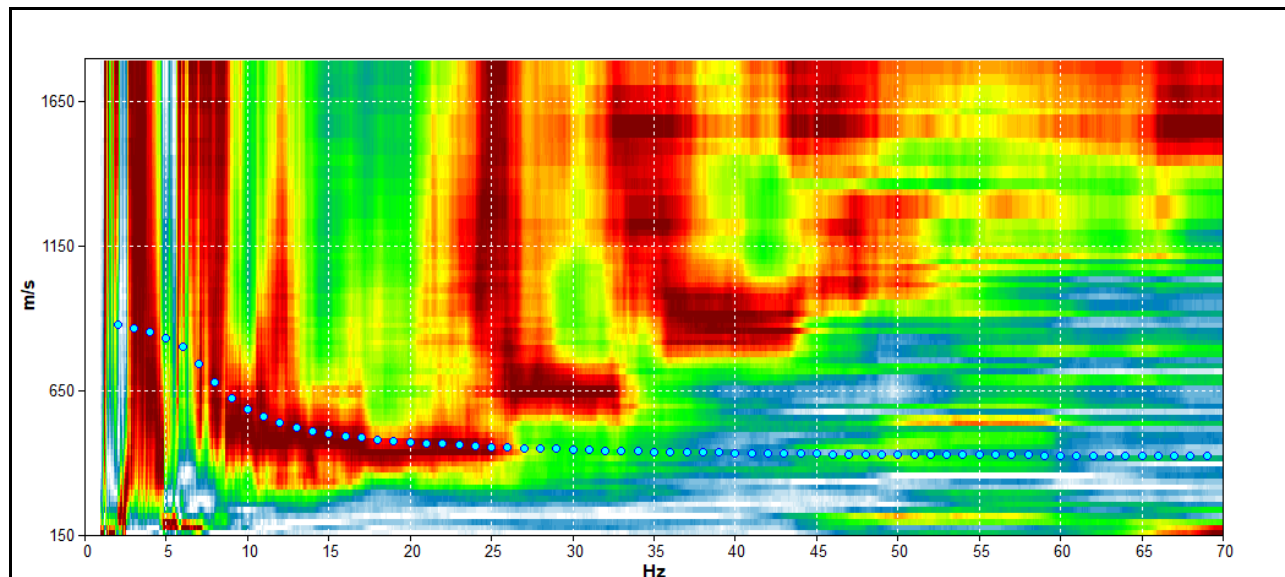
*Tabella 7.2. – Dettagli REMI\_1*



*Figura 7.10 – Ubicazione indagine REMI\_1*

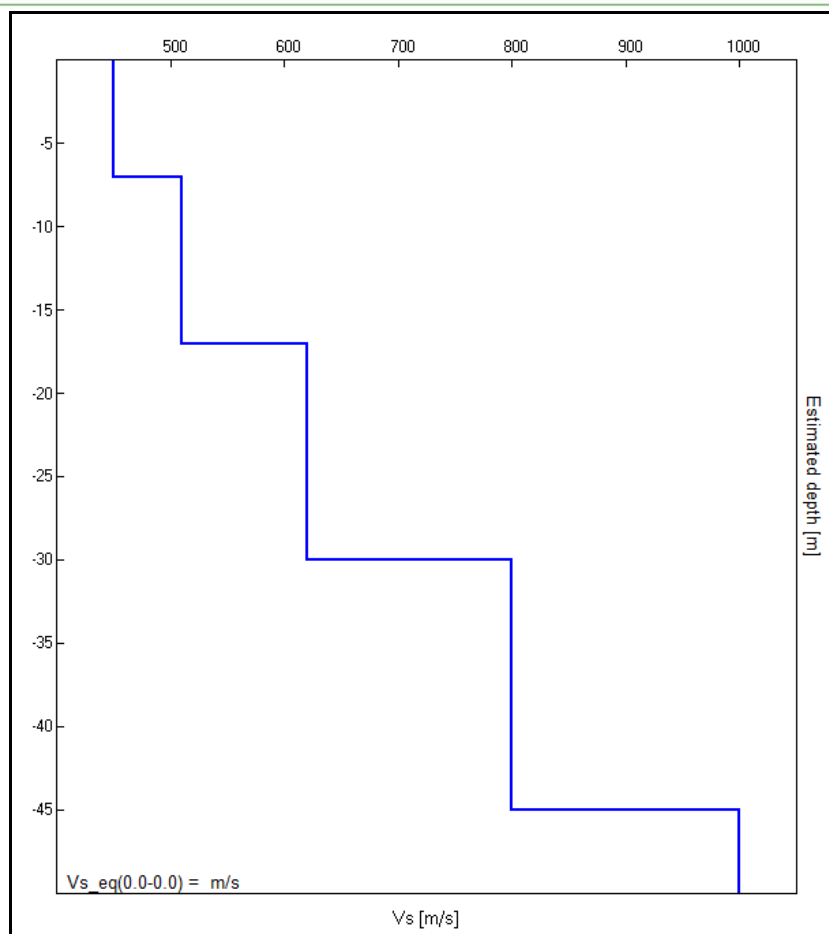


È stata analizzata la seguente curva di dispersione (Figura 7.11), da cui è possibile vedere anche il picking utilizzato (modo fondamentale) per la ricostruzione del modello di velocità del sottosuolo profondo, utile per lo studio della risposta sismica locale (Capitolo 8).



*Figura 7.11 – Curva di dispersione per indagine REMI\_1*

I risultati ottenuti sono visibili in Tab 7.3 ed in figura 7.12; è stato ricostruito il profilo di velocità delle onde S fino alla profondità di 50 metri.



*Figura 7.12 – Curva di dispersione per indagine REMI\_1*

Profondità (m)	Velocità (m/s)
0.00 – 7.00	450
7.00 – 17.00	520
17.00 – 30.00	630
30.00 – 45.00	800
45.00 – 50.00	1000

*Tab. 7.3 – Ricostruzione del modello di Velocità*



## 8. MODELLAZIONE SISMICA

Ai fini della determinazione delle azioni sismiche di progetto nei modi previsti dalle NTC, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita convenzionalmente facendo riferimento ad un sito rigido (di categoria A) con superficie topografica orizzontale (di categoria T1), in condizioni di campo libero, cioè in assenza di manufatti. Il sito di riferimento sarà dunque caratterizzato da sottosuolo di categoria A e superficie topografica di categoria T1. In particolare, i caratteri del moto sismico su sito di riferimento rigido orizzontale sono descritti dalla distribuzione sul territorio nazionale delle seguenti grandezze, sulla base delle quali sono compiutamente definite le forme spettrali per la generica PVR:

- $a_g$  = accelerazione orizzontale massima al sito in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A);
- $F_o$  = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $TC^*$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Facendo riferimento ad informazioni così dettagliate e puntuali è possibile adottare, nella progettazione e verifica delle costruzioni, valori dell'azione sismica meglio correlati alla pericolosità sismica del sito, alla vita nominale della costruzione e all'uso cui essa è destinata, consentendo soluzioni più appropriate ed anche economiche, e nello stesso tempo, trattare le problematiche connesse alla pericolosità sismica adottando una classificazione sismica riferibile anche a porzioni territoriali dei singoli comuni. Nei confronti delle azioni sismiche, riferendosi alla costruzione nella sua complessità, quindi includendo elementi strutturali, non strutturali ed impianti, vengono identificati.

→ stati limite di Esercizio, che sono:

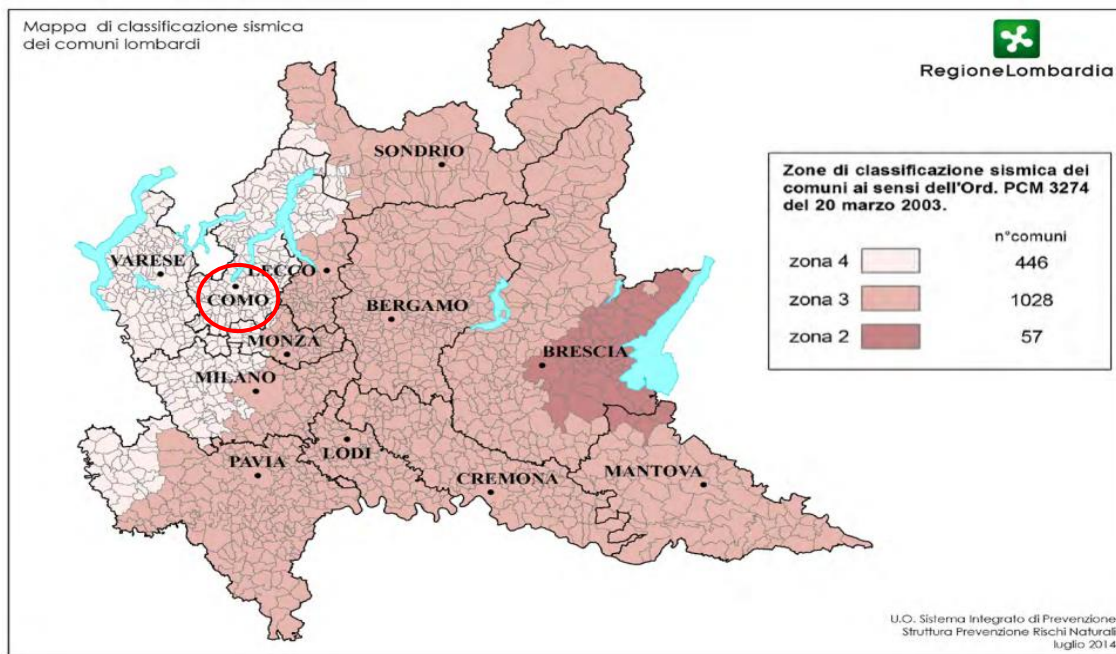
- ✓ Stato Limite di Operatività (SLO): al seguito del terremoto la costruzione, nel suo complesso, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significanti;
- ✓ Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione, nel suo complesso, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

→ stati limite Ultimi, che sono:

- ✓ Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una significativa rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- ✓ Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

### 8.1 Pericolosità sismica di “base”

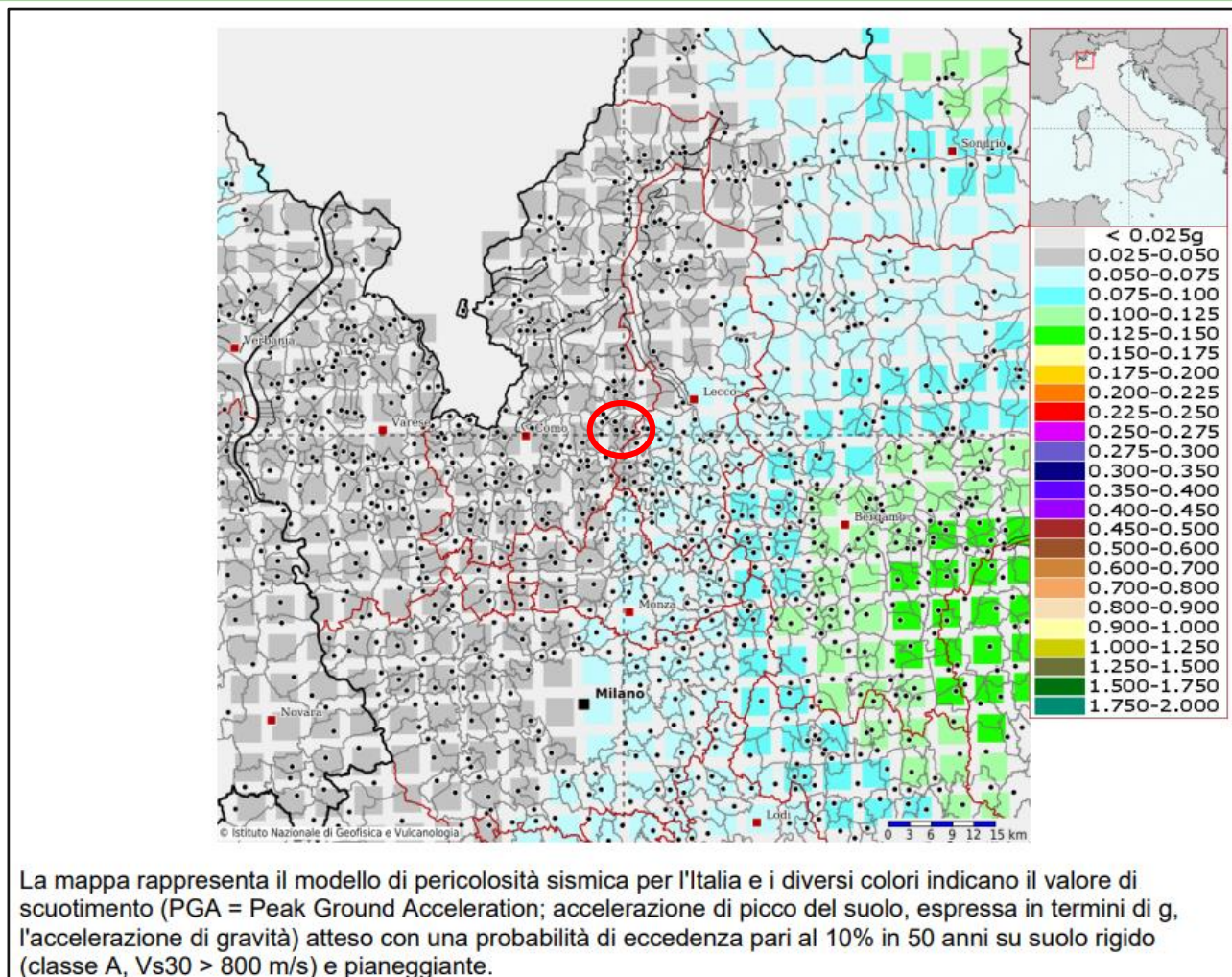
Nel caso specifico, il territorio comunale di Erba (CO), dove sono site le opere in oggetto, ricade in **zona 4** della zonazione sismica della regione Lombardia, ai sensi dell'art. 3, comma 1, e dell'art. 13, comma 1, della legge regionale n. 33 del 2015.



**Figura 8.1** – Mappa di classificazione sismica dei comuni lombardi

Per quanto riguarda la pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento, fornito dai dati pubblicati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1.mi.ingv.it/>), l'area in oggetto ricade sul nodo con **ID: 10708** che presenta valori di accelerazioni di picco del suolo con una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni su suolo rigido (classe A,  $V_{s30} > 800$  m/s), compreso tra  $0.025 < a_g < 0.050$  come mostrato nella Fig. 8.2





**Figura 8.2** – Modello di pericolosità sismica del territorio nazionale

I suddetti valori devono essere quindi riformulati in base ai parametri sismici riferibili ad un manufatto di classe II (costruzione con livelli di prestazione ordinari). È necessario infatti considerare la Vita Nominale dell'opera, intesa come il numero di anni nel quale la struttura, anche soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Per le opere in oggetto, tale valore VN dev'essere pari almeno a 50 anni e tale verrà ipotizzato nel calcolo dello spettro di risposta sismica. Le azioni sismiche saranno quindi valutate in relazione a un periodo di riferimento VR che si ricava moltiplicando la vita nominale VN per il coefficiente d'uso CU, quest'ultimo definito sulla base della classe d'uso dell'edificio. Per le attività in oggetto la classe d'uso dev'essere pari alla Classe III (costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi con non strategiche). Infine la valutazione della sicurezza e la progettazione dovranno essere eseguite, in

accordo a quanto prescritto nel Capitolo 7 delle NTC 2018, con riferimento agli Stati Limite Ultimi e di Esercizio. Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

Riassumendo dunque i suddetti parametri sismici:

- Coordinate geografiche del sito: Lat.45.801; Long. 9.238 (datum WGS84);
- Classe d'Uso: III (costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi con funzioni non strategiche);
- Vita Nominale: 50 anni.

Si ottengono per i vari stati limite previsti in normativa, le seguenti grandezze riassunte nelle tabelle seguenti:

Stato Limite	Tr (anni)	$a_g$ (g)	Fo	Tc'
Operatività (SLO)	45	0,2136	2,5659	0,1787
Danno (SLD)	75	0,2646	2,5979	0,1939
Salvaguardia vita (SLV)	712	0,5243	2,6638	0,2911
Prevenzione collasso (SLC)	1462	0,6329	2,7125	0,306

**Tabella 8.1** – Valori di  $T_r$ ,  $A_g$ ,  $F_o$  e  $T_c'$  per opere di classe III con  $V_n$  pari a 50 anni.

## 8.2 Definizione della categoria di sottosuolo e del coefficiente di amplificazione stratigrafica

Una volta definita la pericolosità sismica di base, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare anche l'effetto della risposta sismica locale mediante il ricorso ad un approccio rigoroso al fine di ottenere la categoria del suolo di fondazione del sito in esame così come definita nella tabella sottostante.

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

**Tabella 8.2** – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

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

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

Con:

$h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;

$V_{S,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;

$N$  numero di strati;



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

Come riportato nei paragrafi 6-7, nel sito è stata eseguita n. 1 prospezione sismica di superficie con metodologia “M.A.S.W.” (Multichannel Analysis of Surface Waves) e n.1 prospezione sismica mediante l’uso di microtremori REMI (Refraction Microtremors) che hanno permesso di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  ed il calcolo della  $V_{s30}$ . Non sono state riscontrate velocità delle onde  $V_s$  superiori a 800 m/s nei primi 30 metri dal piano campagna. E’ stato quindi determinato il parametro  $V_{s30}$  del sito, definendo la categoria di suolo nell’area investigata:

$V_{s,eq} = 383 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **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.

A ciascuna categoria di sottosuolo è associato quindi un rispettivo coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  e coefficiente  $C_c$  che modifica il periodo  $T_c$  e di conseguenza gli altri periodi notevoli dello spettro (NTC 2018, §3.2.2-3).

Per sottosuolo di categoria A i coefficienti  $S_s$  e  $C_c$  valgono 1. Per le categorie di sottosuolo B, C, D ed E i coefficienti  $S_s$  e  $C_c$  possono essere calcolati, in funzione dei valori di  $F_0$  e  $T^*C$  relativi al sottosuolo di categoria A, mediante le espressioni fornite nella seguente Tabella (vedi Tab. 3.2.IV delle NTC2018), nelle quali  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e l’accelerazione di gravità e  $T^*C$  è espresso in secondi:

Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

**Tabella 8.3** – EEspressioni di  $S_s$  e di  $C_c$

### 8.3 Condizioni topografiche e coefficiente di amplificazione topografica

Per la progettazione o la verifica di opere e sistemi geotecnici realizzati su versanti e per l'analisi delle condizioni di stabilità dei pendii, la valutazione dell'amplificazione topografica può essere effettuata mediante analisi di risposta sismica locale o utilizzando il coefficiente di amplificazione topografica  $S_t$ . Il parametro  $S_t$  deve essere applicato nel caso di configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, di altezza superiore a 30 m. Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a  $15^\circ$ , altrimenti si applicano i criteri indicati nel capitolo 3.2.2. del D.M. 17.01.2018 secondo le categorie topografiche indicate nelle tabelle seguenti.

**Tab. 3.2.III – Categorie topografiche**

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

**Tabella 8.4** – Categorie Topografiche

Nel caso in esame l'area risulta caratterizzata da gradienti di pendenza  $<15^\circ$ , per cui ricade nella categoria T1 a cui va attribuito un coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  pari a 1,0 come riportato nella tabella 3.2 V delle N.T.C. 2018.

**Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$**

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

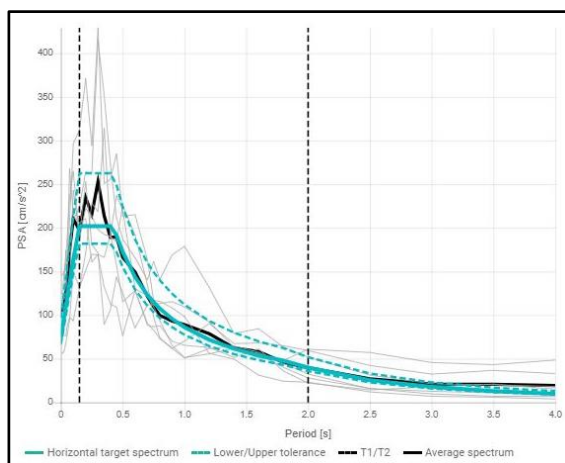
**Tabella 8.5 – Valori massimi del coefficiente di amplificazione Topografica  $S_T$**



## 8.4 Risposta Sismica Locale

Al fine di valutare la risposta sismica locale e la reale attendibilità delle Categorie di Sottosuolo e del coefficiente topografico è stato utilizzato il codice di calcolo STRATA, all'interno del quale ciascun punto della superficie esaminato viene definito mediante un modello di sottosuolo monodimensionale, ossia a strati paralleli, in cui bisogna specificare la stratigrafia lungo la verticale considerata. Nel rispetto della normativa vigente è stata effettuata una modellazione numerica assegnando una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento,  $P$ , e con il periodo di ritorno,  $T_r$ , relativi agli stati limite considerati. In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione ( $V_n$ ) di 50 anni, una classe d'uso ( $C_u$ ) di III con il relativo coefficiente pari a 1,5 e quindi una vita di riferimento  $V_r = 75$  anni. A partire da queste indicazioni si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di 712 anni corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

Una volta estrapolati gli accelerogrammi spettrocompatibili con il sito di esame, e dopo aver costruito un adeguato modello di terreno, si è proceduti all'analisi di risposta sismica locale facendo propagare gli accelerogrammi di input, opportunamente scalati rispetto alla PGA di riferimento per ciascun stato limite, dal bedrock alla superficie.



Gli *input* sismici utilizzati sono rappresentati da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello per lo stato limite considerato e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia sub-orizzontale ( $T_1$ ) e correttamente deconvoluto (v. Dynamic Analysis della ITASCA, 2018). In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL 3.5 -

*computer aided record selection for code-based seismic structural analysis.*

Per la caratterizzazione meccanica dei vari litotipi presenti è stato necessario definire le curve di decadimento del modulo di rigidità al taglio normalizzata  $G/G_{max}$  e di incremento del fattore di smorzamento  $D$  rispetto alla deformazione tangenziale. Non essendo disponibili misurazioni dirette effettuate in laboratorio attraverso la prova triassiale ciclica o tramite colonna risonante, si è fatto

ricorso a curve di letteratura, scegliendo tra quelle associate a terreni aventi caratteristiche simili a quelli del caso di studio.

A seguire si mostra il modello sismo - stratigrafico impiegato per l'analisi di risposta sismica locale 1D.

Site Profile				
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	4.50	Deposito sabbioso limoso ghiaioso	260.00
2	4.50	8.00	Deposito sabbioso ghiaioso	290.00
3	12.50	13.00	Deposito sabbioso ghiaioso compatto	480.00
4	25.50	9.00	Deposito conglomeratici	650.00
5	34.50	35.00	Deposito sabbioso ghiaioso	680.00
6	69.50	Half-Space	Bedrock	810.00

Soil Types						
	Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	G/G_max Model	Damping Model	Damp. Limit (%)	Notes
1	Deposito sabbioso limoso ghiaioso	17.50	Vucetic & Dobry, PI = 15	Vucetic & Dobry, PI = 15	2	
2	Deposito sabbioso ghiaioso	18.50	EPRI (93) PI=10	EPRI (93), PI=10	1,5	
3	Deposito sabbioso ghiaioso compatto	19.00	Vucetic & Dobry, PI = 0	Vucetic & Dobry, PI = 0	1,5	
4	Deposito conglomeratici	20.50	EPRI (93), 120-250 ft	EPRI (93), 120-250 ft	1	
5	Deposito sabbioso ghiaioso	21.00	Vucetic & Dobry, PI = 0	Vucetic & Dobry, PI = 0	1	

Bedrock Layer	
Unit weight:	23,00 kN/m <sup>3</sup>
Damping:	0,50 %

Water Table Depth	
Depth:	5,60 m

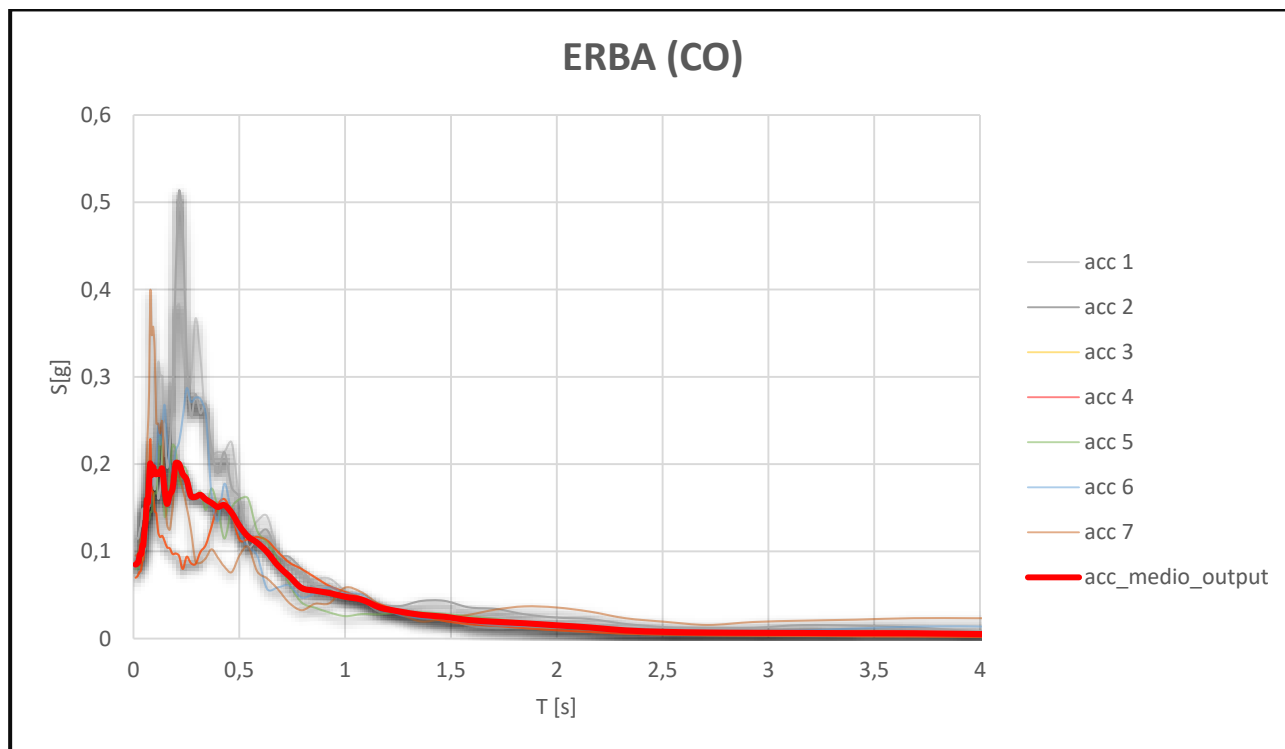
**Figura 8.3** – Modello sismostratigrafico utilizzato nel software STRATA per l'analisi di RSL

1D



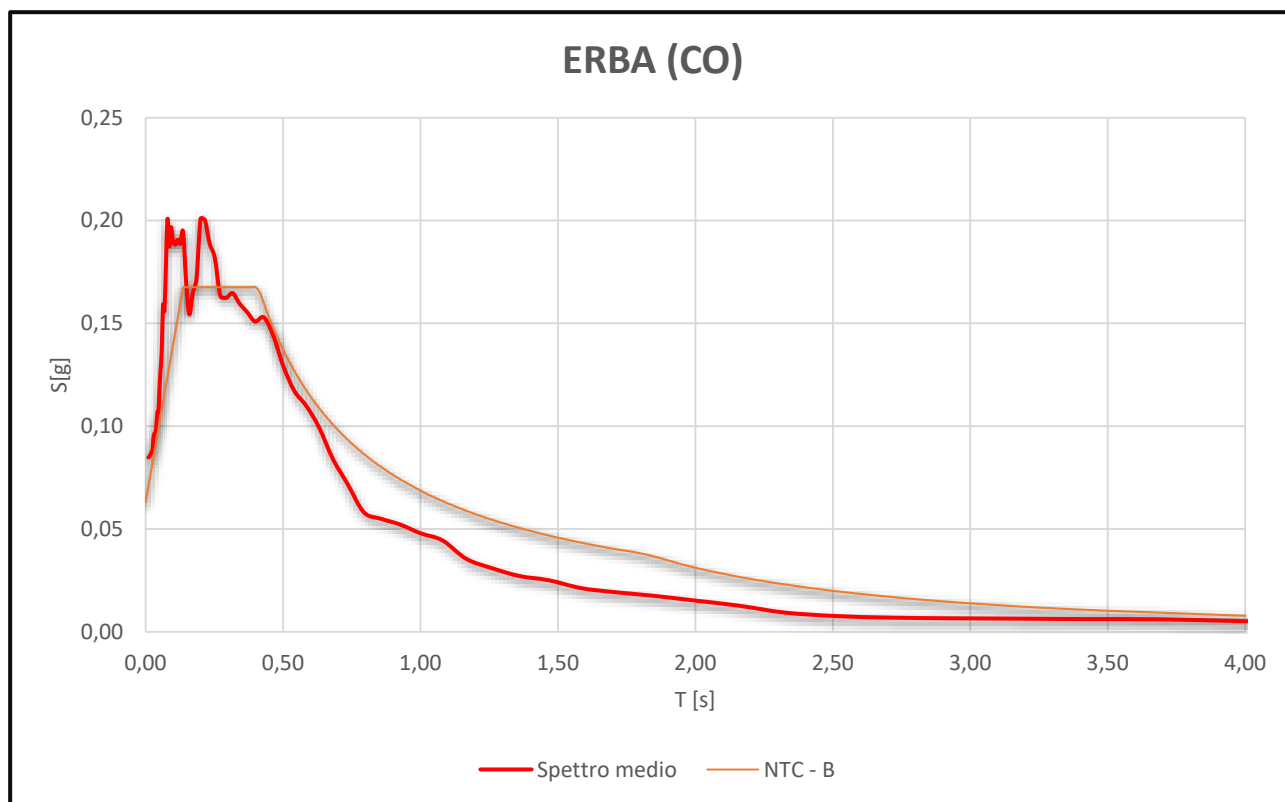
## ANALISI ALLO STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (SLV)

*Step n.1: le linee acc1, acc2, acc3, acc4, acc5, acc6 e acc7 rappresentano gli spettri di risposta elastica calcolati in superficie (tetto del modello) per ogni evento sismico modellizzato. La media di questi è rappresentata dalla linea rossa (acc\_medio; v. Tabella seguente).*



*Step n.2: lo spettro di risposta medio viene confrontato con quelli derivanti dalla procedura semplificata di risposta sismica locale e identificabile nelle categorie di sottosuolo.*

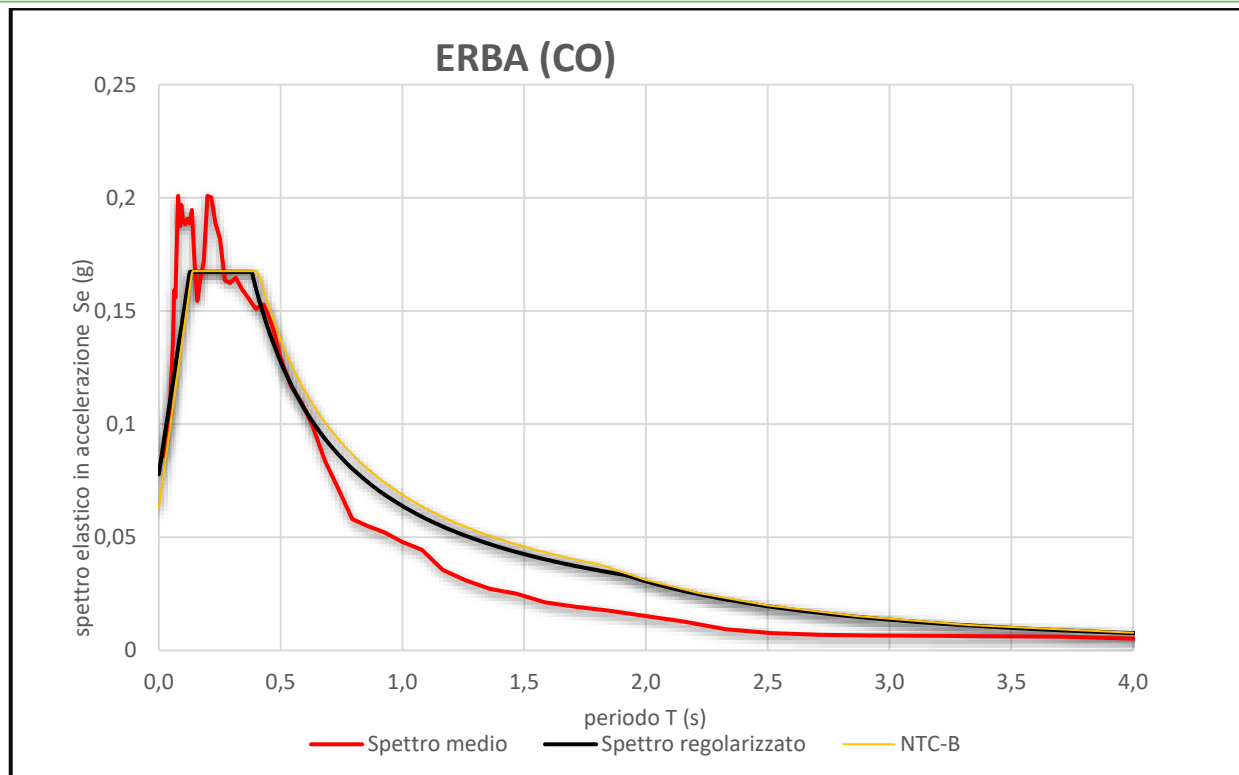




Lo spettro di risposta elastico ottenuto, presenta valori massimi di  $a_g$  di circa 0,201  $g$  a circa 0,079s.

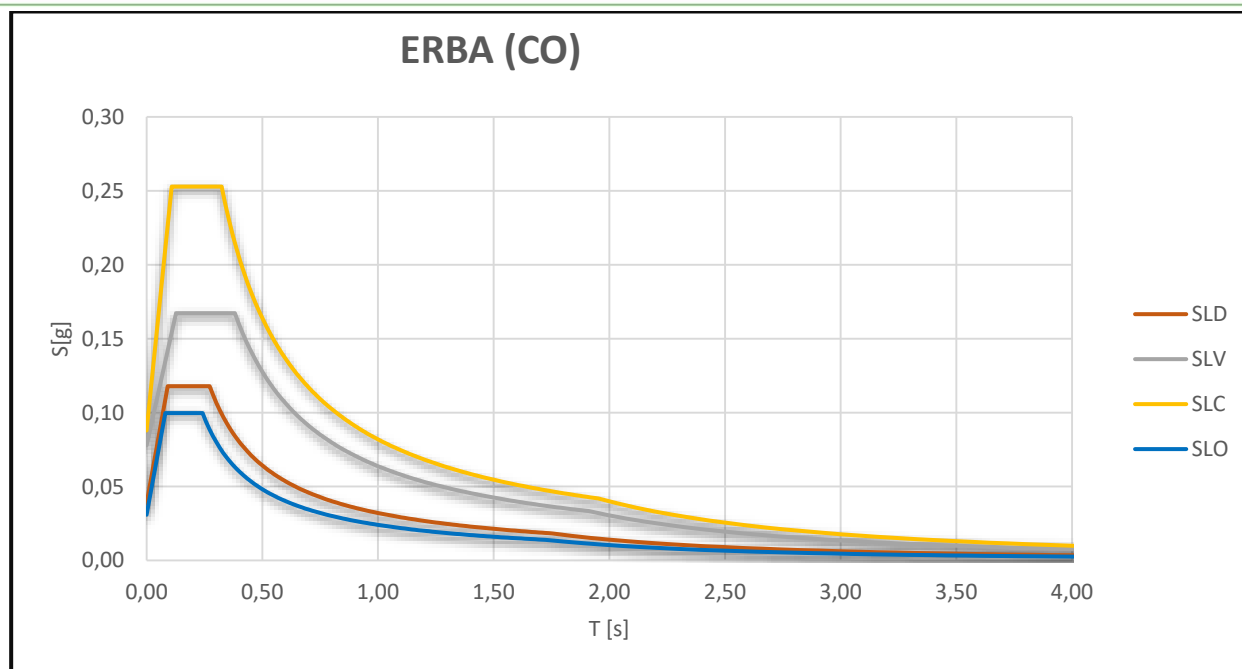
Dal grafico sopra riportato, si può osservare che:

- Per periodi compresi tra circa 0,04 e 0,13s e tra 0,20 e 0,25 s la Categoria di appartenenza B-T1 sottostima i valori di  $a_g$  ottenuti con la modellazione, al contrario, per periodi compresi tra 0,13 e 0,20 s e per periodi inferiori a circa 0,25 s lo spettro di sottosuolo di categoria B-T1 delle NTC sovrastima i valori  $a_g$  ottenuti.



- Considerando lo spettro regolarizzato, possiamo inoltre notare che lo spettro di sottosuolo di categoria B-T1 delle NTC, al quale il sito appartiene, risulta circa concorde con lo spettro di risposta modellato per periodi inferiori a 0,4 s, mentre per periodi maggiori la sovrastima.

Analogamente a quanto fatto per lo stato limite di salvaguardia, attraverso il software STRATA, sono stati valutati gli spettri di risposta elastici per i restanti stati limite previsti in normativa (SLO; SLD; SLC). Di seguito si riportano i seguenti parametri sismici e relativi spettri di risposta:



**Figura 8.4** – Spettri elastici degli stati limite ultimi e stati limite di esercizio della componente orizzontale

Stato Limite	$a_{max}$ (g)	$F_0$	TB [s]	TC [s]	TD [s]	$S_e$ (g)
SLO	0,0309	3,2256	0,0806	0,2417	1,7236	0,0997
SLD	0,0384	3,0644	0,0909	0,2726	1,7539	0,1179
SLV	0,0778	2,1492	0,1272	0,3815	1,9113	0,1672
SLC	0,0879	2,8764	0,108	0,324	1,9517	0,2528

**Tabella 8.6** – Tabella riassuntiva parametri estrapolati dall'analisi di risposta sismica locale





SPETTRI NORMALIZZATI							
SLC		SLV		SLD		SLO	
Periodo (s)	Se (g)	Periodo (s)	Se (g)	Periodo (s)	Se (g)	Periodo (s)	Se (g)
0,0000	0,0879	0,0000	0,0778	0,0000	0,0385	0,0000	0,0309
0,1080	0,2529	0,1272	0,1672	0,0909	0,1179	0,0806	0,0997
0,3240	0,2529	0,3815	0,1672	0,2726	0,1179	0,2417	0,0997
0,3402	0,2408	0,3968	0,1608	0,2874	0,1118	0,2566	0,0939
0,3565	0,2298	0,4121	0,1548	0,3022	0,1063	0,2714	0,0888
0,3728	0,2198	0,4274	0,1493	0,3170	0,1013	0,2862	0,0842
0,3891	0,2106	0,4427	0,1441	0,3318	0,0968	0,3010	0,0800
0,4053	0,2021	0,4580	0,1393	0,3466	0,0927	0,3158	0,0763
0,4216	0,1943	0,4733	0,1348	0,3615	0,0889	0,3307	0,0729
0,4379	0,1871	0,4886	0,1306	0,3763	0,0854	0,3455	0,0697
0,4542	0,1804	0,5039	0,1266	0,3911	0,0821	0,3603	0,0669
0,4705	0,1741	0,5192	0,1229	0,4059	0,0792	0,3751	0,0642
0,4867	0,1683	0,5345	0,1194	0,4207	0,0764	0,3899	0,0618
0,5030	0,1629	0,5498	0,1161	0,4355	0,0738	0,4047	0,0595
0,5193	0,1578	0,5651	0,1129	0,4503	0,0713	0,4196	0,0574
0,5356	0,1530	0,5804	0,1099	0,4651	0,0691	0,4344	0,0555
0,5518	0,1485	0,5957	0,1071	0,4800	0,0669	0,4492	0,0536
0,5681	0,1442	0,6110	0,1044	0,4948	0,0649	0,4640	0,0519
0,5844	0,1402	0,6263	0,1019	0,5096	0,0630	0,4788	0,0503
0,6007	0,1364	0,6416	0,0995	0,5244	0,0613	0,4937	0,0488
0,6169	0,1328	0,6569	0,0971	0,5392	0,0596	0,5085	0,0474
0,6332	0,1294	0,6722	0,0949	0,5540	0,0580	0,5233	0,0460
0,6495	0,1261	0,6875	0,0928	0,5688	0,0565	0,5381	0,0448
0,6658	0,1231	0,7028	0,0908	0,5836	0,0550	0,5529	0,0436
0,6821	0,1201	0,7181	0,0889	0,5985	0,0537	0,5678	0,0424
0,6983	0,1173	0,7334	0,0870	0,6133	0,0524	0,5826	0,0414
0,7146	0,1146	0,7487	0,0852	0,6281	0,0512	0,5974	0,0403
0,7309	0,1121	0,7640	0,0835	0,6429	0,0500	0,6122	0,0394
0,7472	0,1096	0,7793	0,0819	0,6577	0,0488	0,6270	0,0384
0,7634	0,1073	0,7946	0,0803	0,6725	0,0478	0,6418	0,0375
0,7797	0,1051	0,8099	0,0788	0,6873	0,0467	0,6567	0,0367
0,7960	0,1029	0,8252	0,0773	0,7021	0,0458	0,6715	0,0359
0,8123	0,1009	0,8404	0,0759	0,7170	0,0448	0,6863	0,0351
0,8285	0,0989	0,8557	0,0746	0,7318	0,0439	0,7011	0,0344
0,8448	0,0970	0,8710	0,0733	0,7466	0,0430	0,7159	0,0337
0,8611	0,0951	0,8863	0,0720	0,7614	0,0422	0,7308	0,0330
0,8774	0,0934	0,9016	0,0708	0,7762	0,0414	0,7456	0,0323
0,8937	0,0917	0,9169	0,0696	0,7910	0,0406	0,7604	0,0317
0,9099	0,0900	0,9322	0,0684	0,8058	0,0399	0,7752	0,0311
0,9262	0,0885	0,9475	0,0673	0,8206	0,0391	0,7900	0,0305
0,9425	0,0869	0,9628	0,0663	0,8355	0,0385	0,8048	0,0299
0,9588	0,0854	0,9781	0,0652	0,8503	0,0378	0,8197	0,0294
0,9750	0,0840	0,9934	0,0642	0,8651	0,0371	0,8345	0,0289
0,9913	0,0826	1,0087	0,0633	0,8799	0,0365	0,8493	0,0284
1,0076	0,0813	1,0240	0,0623	0,8947	0,0359	0,8641	0,0279
1,0239	0,0800	1,0393	0,0614	0,9095	0,0353	0,8789	0,0274
1,0402	0,0788	1,0546	0,0605	0,9243	0,0348	0,8938	0,0270
1,0564	0,0775	1,0699	0,0596	0,9391	0,0342	0,9086	0,0265
1,0727	0,0764	1,0852	0,0588	0,9540	0,0337	0,9234	0,0261
1,0890	0,0752	1,1005	0,0580	0,9688	0,0332	0,9382	0,0257
1,1053	0,0741	1,1158	0,0572	0,9836	0,0327	0,9530	0,0253
1,1215	0,0730	1,1311	0,0564	0,9984	0,0322	0,9679	0,0249
1,1378	0,0720	1,1464	0,0557	1,0132	0,0317	0,9827	0,0245
1,1541	0,0710	1,1617	0,0549	1,0280	0,0313	0,9975	0,0242
1,1704	0,0700	1,1770	0,0542	1,0428	0,0308	1,0123	0,0238
1,1866	0,0690	1,1923	0,0535	1,0577	0,0304	1,0271	0,0235
1,2029	0,0681	1,2076	0,0528	1,0725	0,0300	1,0419	0,0231
1,2192	0,0672	1,2229	0,0522	1,0873	0,0295	1,0568	0,0228
1,2355	0,0663	1,2382	0,0515	1,1021	0,0292	1,0716	0,0225
1,2518	0,0654	1,2535	0,0509	1,1169	0,0288	1,0864	0,0222
1,2680	0,0646	1,2688	0,0503	1,1317	0,0284	1,1012	0,0219
1,2843	0,0638	1,2841	0,0497	1,1465	0,0280	1,1160	0,0216
1,3006	0,0630	1,2994	0,0491	1,1613	0,0277	1,1309	0,0213
1,3169	0,0622	1,3147	0,0485	1,1762	0,0273	1,1457	0,0210
1,3331	0,0615	1,3300	0,0480	1,1910	0,0270	1,1605	0,0208
1,3494	0,0607	1,3453	0,0474	1,2058	0,0266	1,1753	0,0205
1,3657	0,0600	1,3606	0,0469	1,2206	0,0263	1,1901	0,0202
1,3820	0,0593	1,3758	0,0464	1,2354	0,0260	1,2049	0,0200



1,3982	0,0586	1,3911	0,0459	1,2502	0,0257	1,2198	0,0198
1,4145	0,0579	1,4064	0,0454	1,2650	0,0254	1,2346	0,0195
1,4308	0,0573	1,4217	0,0449	1,2798	0,0251	1,2494	0,0193
1,4471	0,0566	1,4370	0,0444	1,2947	0,0248	1,2642	0,0191
1,4634	0,0560	1,4523	0,0439	1,3095	0,0245	1,2790	0,0188
1,4796	0,0554	1,4676	0,0435	1,3243	0,0243	1,2939	0,0186
1,4959	0,0548	1,4829	0,0430	1,3391	0,0240	1,3087	0,0184
1,5122	0,0542	1,4982	0,0426	1,3539	0,0237	1,3235	0,0182
1,5285	0,0536	1,5135	0,0422	1,3687	0,0235	1,3383	0,0180
1,5447	0,0530	1,5288	0,0417	1,3835	0,0232	1,3531	0,0178
1,5610	0,0525	1,5441	0,0413	1,3983	0,0230	1,3680	0,0176
1,5773	0,0519	1,5594	0,0409	1,4132	0,0227	1,3828	0,0174
1,5936	0,0514	1,5747	0,0405	1,4280	0,0225	1,3976	0,0172
1,6098	0,0509	1,5900	0,0401	1,4428	0,0223	1,4124	0,0171
1,6261	0,0504	1,6053	0,0397	1,4576	0,0220	1,4272	0,0169
1,6424	0,0499	1,6206	0,0394	1,4724	0,0218	1,4420	0,0167
1,6587	0,0494	1,6359	0,0390	1,4872	0,0216	1,4569	0,0165
1,6750	0,0489	1,6512	0,0386	1,5020	0,0214	1,4717	0,0164
1,6912	0,0484	1,6665	0,0383	1,5168	0,0212	1,4865	0,0162
1,7075	0,0480	1,6818	0,0379	1,5317	0,0210	1,5013	0,0160
1,7238	0,0475	1,6971	0,0376	1,5465	0,0208	1,5161	0,0159
1,7401	0,0471	1,7124	0,0373	1,5613	0,0206	1,5310	0,0157
1,7563	0,0466	1,7277	0,0369	1,5761	0,0204	1,5458	0,0156
1,7726	0,0462	1,7430	0,0366	1,5909	0,0202	1,5606	0,0154
1,7889	0,0458	1,7583	0,0363	1,6057	0,0200	1,5754	0,0153
1,8052	0,0454	1,7736	0,0360	1,6205	0,0198	1,5902	0,0152
1,8214	0,0450	1,7889	0,0357	1,6353	0,0196	1,6050	0,0150
1,8377	0,0446	1,8042	0,0354	1,6502	0,0195	1,6199	0,0149
1,8540	0,0442	1,8195	0,0351	1,6650	0,0193	1,6347	0,0147
1,8703	0,0438	1,8348	0,0348	1,6798	0,0191	1,6495	0,0146
1,8866	0,0434	1,8501	0,0345	1,6946	0,0190	1,6643	0,0145
1,9028	0,0431	1,8654	0,0342	1,7094	0,0188	1,6791	0,0143
1,9191	0,0427	1,8807	0,0339	1,7242	0,0186	1,6940	0,0142
1,9354	0,0423	1,8960	0,0337	1,7390	0,0185	1,7088	0,0141
1,9517	0,0420	1,9112	0,0334	1,7538	0,0183	1,7236	0,0140
2,0321	0,0387	1,9921	0,0307	1,8363	0,0167	1,8064	0,0127
2,1126	0,0358	2,0730	0,0284	1,9188	0,0153	1,8891	0,0116
2,1931	0,0332	2,1539	0,0263	2,0012	0,0141	1,9719	0,0107
2,2736	0,0309	2,2348	0,0244	2,0837	0,0130	2,0547	0,0098
2,3541	0,0289	2,3157	0,0227	2,1662	0,0120	2,1374	0,0091
2,4346	0,0270	2,3966	0,0212	2,2486	0,0111	2,2202	0,0084
2,5150	0,0253	2,4775	0,0199	2,3311	0,0104	2,3029	0,0078
2,5955	0,0237	2,5583	0,0186	2,4135	0,0097	2,3857	0,0073
2,6760	0,0223	2,6392	0,0175	2,4960	0,0090	2,4685	0,0068
2,7565	0,0210	2,7201	0,0165	2,5785	0,0085	2,5512	0,0064
2,8370	0,0199	2,8010	0,0155	2,6609	0,0080	2,6340	0,0060
2,9175	0,0188	2,8819	0,0147	2,7434	0,0075	2,7168	0,0056
2,9979	0,0178	2,9628	0,0139	2,8258	0,0071	2,7995	0,0053
3,0784	0,0169	3,0437	0,0132	2,9083	0,0067	2,8823	0,0050
3,1589	0,0160	3,1246	0,0125	2,9908	0,0063	2,9651	0,0047
3,2394	0,0152	3,2054	0,0119	3,0732	0,0060	3,0478	0,0045
3,3199	0,0145	3,2863	0,0113	3,1557	0,0057	3,1306	0,0042
3,4004	0,0138	3,3672	0,0108	3,2382	0,0054	3,2133	0,0040
3,4808	0,0132	3,4481	0,0103	3,3206	0,0051	3,2961	0,0038
3,5613	0,0126	3,5290	0,0098	3,4031	0,0049	3,3789	0,0036
3,6418	0,0121	3,6099	0,0094	3,4855	0,0046	3,4616	0,0035
3,7223	0,0115	3,6908	0,0090	3,5680	0,0044	3,5444	0,0033
3,8028	0,0111	3,7717	0,0086	3,6505	0,0042	3,6272	0,0032
3,8833	0,0106	3,8525	0,0082	3,7329	0,0040	3,7099	0,0030
3,9637	0,0102	3,9334	0,0079	3,8154	0,0039	3,7927	0,0029
4,0442	0,0098	4,0143	0,0076	3,8978	0,0037	3,8755	0,0028
4,1247	0,0094	4,0952	0,0073	3,9803	0,0036	3,9582	0,0027
4,2052	0,0090	4,1761	0,0070	4,0628	0,0034	4,0410	0,0025
4,2857	0,0087	4,2570	0,0067	4,1452	0,0033	4,1238	0,0024
4,3662	0,0084	4,3379	0,0065	4,2277	0,0032	4,2065	0,0023
4,4466	0,0081	4,4188	0,0062	4,3102	0,0030	4,2893	0,0023
4,5271	0,0078	4,4996	0,0060	4,3926	0,0029	4,3720	0,0022
4,6076	0,0075	4,5805	0,0058	4,4751	0,0028	4,4548	0,0021
4,6881	0,0073	4,6614	0,0056	4,5575	0,0027	4,5376	0,0020
4,7686	0,0070	4,7423	0,0054	4,6400	0,0026	4,6203	0,0019
4,8491	0,0068	4,8232	0,0052	4,7225	0,0025	4,7031	0,0019
4,9295	0,0066	4,9041	0,0051	4,8049	0,0024	4,7859	0,0018
5,0100	0,0064	4,9850	0,0049	4,8874	0,0024	4,8686	0,0018



5,0905	0,0062	5,0659	0,0048	4,9698	0,0023	4,9514	0,0017
5,1710	0,0060	5,1467	0,0046	5,0523	0,0022	5,0342	0,0016
5,2515	0,0058	5,2276	0,0045	5,1348	0,0021	5,1169	0,0016
5,3320	0,0056	5,3085	0,0043	5,2172	0,0021	5,1997	0,0015
5,4124	0,0055	5,3894	0,0042	5,2997	0,0020	5,2824	0,0015
5,4929	0,0053	5,4703	0,0041	5,3822	0,0019	5,3652	0,0014
5,5734	0,0051	5,5512	0,0040	5,4646	0,0019	5,4480	0,0014
5,6539	0,0050	5,6321	0,0038	5,5471	0,0018	5,5307	0,0014
5,7344	0,0049	5,7130	0,0037	5,6295	0,0018	5,6135	0,0013
5,8149	0,0047	5,7938	0,0036	5,7120	0,0017	5,6963	0,0013
5,8953	0,0046	5,8747	0,0035	5,7945	0,0017	5,7790	0,0012
5,9758	0,0045	5,9556	0,0034	5,8769	0,0016	5,8618	0,0012
6,0563	0,0044	6,0365	0,0033	5,9594	0,0016	5,9446	0,0012
6,1368	0,0042	6,1174	0,0033	6,0418	0,0015	6,0273	0,0011
6,2173	0,0041	6,1983	0,0032	6,1243	0,0015	6,1101	0,0011
6,2978	0,0040	6,2792	0,0031	6,2068	0,0015	6,1929	0,0011
6,3782	0,0039	6,3601	0,0030	6,2892	0,0014	6,2756	0,0011
6,4587	0,0038	6,4409	0,0029	6,3717	0,0014	6,3584	0,0010
6,5392	0,0037	6,5218	0,0029	6,4542	0,0014	6,4411	0,0010
6,6197	0,0036	6,6027	0,0028	6,5366	0,0013	6,5239	0,0010
6,7002	0,0036	6,6836	0,0027	6,6191	0,0013	6,6067	0,0010
6,7807	0,0035	6,7645	0,0027	6,7015	0,0013	6,6894	0,0009
6,8611	0,0034	6,8454	0,0026	6,7840	0,0012	6,7722	0,0009
6,9416	0,0033	6,9263	0,0025	6,8665	0,0012	6,8550	0,0009
7,0221	0,0032	7,0072	0,0025	6,9489	0,0012	6,9377	0,0009
7,1026	0,0032	7,0880	0,0024	7,0314	0,0011	7,0205	0,0008
7,1831	0,0031	7,1689	0,0024	7,1138	0,0011	7,1033	0,0008
7,2636	0,0030	7,2498	0,0023	7,1963	0,0011	7,1860	0,0008
7,3440	0,0030	7,3307	0,0023	7,2788	0,0011	7,2688	0,0008
7,4245	0,0029	7,4116	0,0022	7,3612	0,0010	7,3516	0,0008
7,5050	0,0028	7,4925	0,0022	7,4437	0,0010	7,4343	0,0008
7,5855	0,0028	7,5734	0,0021	7,5262	0,0010	7,5171	0,0007
7,6660	0,0027	7,6543	0,0021	7,6086	0,0010	7,5998	0,0007
7,7465	0,0027	7,7351	0,0020	7,6911	0,0010	7,6826	0,0007
7,8269	0,0026	7,8160	0,0020	7,7735	0,0009	7,7654	0,0007
7,9074	0,0026	7,8969	0,0020	7,8560	0,0009	7,8481	0,0007
7,9879	0,0025	7,9778	0,0019	7,9385	0,0009	7,9309	0,0007
8,0684	0,0025	8,0587	0,0019	8,0209	0,0009	8,0137	0,0006
8,1489	0,0024	8,1396	0,0018	8,1034	0,0009	8,0964	0,0006
8,2294	0,0024	8,2205	0,0018	8,1858	0,0008	8,1792	0,0006
8,3098	0,0023	8,3014	0,0018	8,2683	0,0008	8,2620	0,0006
8,3903	0,0023	8,3822	0,0017	8,3508	0,0008	8,3447	0,0006
8,4708	0,0022	8,4631	0,0017	8,4332	0,0008	8,4275	0,0006
8,5513	0,0022	8,5440	0,0017	8,5157	0,0008	8,5102	0,0006
8,6318	0,0021	8,6249	0,0016	8,5982	0,0008	8,5930	0,0006
8,7123	0,0021	8,7058	0,0016	8,6806	0,0007	8,6758	0,0006
8,7927	0,0021	8,7867	0,0016	8,7631	0,0007	8,7585	0,0005
8,8732	0,0020	8,8676	0,0016	8,8455	0,0007	8,8413	0,0005
8,9537	0,0020	8,9485	0,0015	8,9280	0,0007	8,9241	0,0005
9,0342	0,0020	9,0293	0,0015	9,0105	0,0007	9,0068	0,0005
9,1147	0,0019	9,1102	0,0015	9,0929	0,0007	9,0896	0,0005
9,1952	0,0019	9,1911	0,0014	9,1754	0,0007	9,1724	0,0005
9,2756	0,0019	9,2720	0,0014	9,2578	0,0007	9,2551	0,0005
9,3561	0,0018	9,3529	0,0014	9,3403	0,0006	9,3379	0,0005
9,4366	0,0018	9,4338	0,0014	9,4228	0,0006	9,4207	0,0005
9,5171	0,0018	9,5147	0,0013	9,5052	0,0006	9,5034	0,0005
9,5976	0,0017	9,5956	0,0013	9,5877	0,0006	9,5862	0,0005
9,6781	0,0017	9,6764	0,0013	9,6702	0,0006	9,6689	0,0004
9,7585	0,0017	9,7573	0,0013	9,7526	0,0006	9,7517	0,0004
9,8390	0,0017	9,8382	0,0013	9,8351	0,0006	9,8345	0,0004
9,9195	0,0016	9,9191	0,0012	9,9175	0,0006	9,9172	0,0004
10,0000	0,0016	10,0000	0,0012	10,0000	0,0006	10,0000	0,0004

*Tabella 8.7 – Spettri Normativi*



## 9. VERIFICA DELLA LIQUEFAZIONE

La liquefazione del terreno di fondazione è un fenomeno molto pericoloso per la sicurezza degli edifici realizzati su terreni di fondazione sabbiosi in presenza di falda. Le costruzioni edificate su terreni sabbiosi saturi possono letteralmente affondare nel terreno durante un evento sismico di una certa intensità.

I terreni sabbiosi, in condizioni statiche, si trovano sempre in condizioni drenate. Durante il fenomeno della liquefazione però le accelerazioni impresse dall'evento sismico creano un incremento della pressione neutra così impulsivo e rapido che non ha il tempo di dissiparsi.

È uno scenario equivalente al caso in cui la velocità di applicazione di un carico esterno è molto maggiore della velocità con cui si dissipano le sovrappressioni neutre. Durante la liquefazione le sabbie, pur avendo un'elevata permeabilità, si troveranno in condizioni non drenate e le sovrappressioni neutre non avranno modo di dissiparsi.

Durante l'evento sismico le elevate sovrappressioni interstiziali annullano il contatto fra i granuli, causando l'assenza di attrito fra le particelle e di conseguenza una resistenza a taglio nulla del terreno. Pertanto il terreno si comporterà come un fluido. Dopo l'evento sismico il terreno sabbioso risulterà avere una densità relativa più elevata rispetto alla situazione iniziale.

I terreni sabbiosi in assenza di sisma si troveranno sempre in condizioni drenate. In presenza di un evento sismico però lo scenario cambia. Durante un evento sismico di notevole intensità, nonostante l'elevata permeabilità dei terreni sabbiosi, le sovrappressioni neutre generate dall'accelerazione sismica non hanno il tempo di dissiparsi. La resistenza a taglio del terreno si annulla e il suolo si trasforma in un vero e proprio fluido nel quale gli edifici affondano.

## 9.1 Liquefazione: perché il terreno si trasforma in un fluido

La liquefazione è un dunque fenomeno che si manifesta in concomitanza di eventi sismici di una certa intensità, di magnitudo generalmente superiore a 5.5 o 6.0 e che interessa terreni sabbiosi sciolti posti al di sotto del livello di falda.

Le accelerazioni generate da un evento sismico producono un incremento della pressione dell'acqua interstiziale contenuta in un terreno sabbioso saturo. Tale aumento di pressione causa l'annullamento delle tensioni efficaci e della resistenza a taglio del terreno. Di conseguenza il terreno si comporta come un vero e proprio fluido in cui gli edifici e le costruzioni soprastanti letteralmente affondano.

A seguito del sisma si genera un incremento della pressione interstiziale (*acqua presente negli interstizi*); tale aumento di pressione causa l'annullamento della resistenza del terreno e la fuoriuscita di materiale sabbioso misto ad acqua.

$$\tau = (\sigma'_n - \Delta u) \operatorname{tg} \varphi'$$

Con riferimento all'espressione sopra riportata, la resistenza ( $\tau$ ) del terreno si annulla allorché l'incremento della pressione interstiziale ( $\Delta u$ ) generata dal sisma eguaglia la tensione normale efficace agente ( $\sigma'_n$ ).

Numerosi sono i metodi di verifica alla "liquefazione" dei terreni.

Il primo passo comune a tutti i metodi sta nella scelta dei parametri rappresentativi dell'azione sismica (*accelerazione massima e magnitudo di riferimento*).

Per la scelta dei valori dell'accelerazione si utilizzano gli approcci semplificati indicati nella normativa (*Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018*) o in alternativa analisi specifiche di risposta sismica locale.

Per la scelta dei valori della magnitudo (*magnitudo momento  $M_w$  in particolare*), in assenza di precise indicazioni di normativa, si fa normalmente ricorso ai contenuti del testo "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" a cura del Dipartimento della Protezione Civile (*e ciò per quanto concerne siti ricadenti sia all'interno che all'esterno delle diverse Zone Sismogenetiche*).

Una volta definita l'azione ciclica (*CSR*):

$$CSR = 0,65 \tau_{max} / \sigma'_{vo} = 0,65 (a_{max} / g) \sigma_{vo} r_d / \sigma'_{vo}$$

si passa alla valutazione della **resistenza ciclica** (*CRR*):

$$CRR = (CRR)_{7,5} MSF$$

utilizzando i risultati di prove penetrometriche statiche CPT, di prove Standard Penetration Test SPT, di prove Dilatometriche; di particolare interesse un recente metodo (*anno 2013*) di valutazione del rischio liquefazione in base ai valori della velocità  $V_s$  delle onde di taglio (*da indagini geofisiche*), supportato da ben 422 casi reali ben documentati.

In merito ai vari metodi di verifica alla liquefazione esistono forti differenze nei risultati. Il coefficiente di sicurezza, valutato come rapporto fra la resistenza ciclica (*CRR*) e l'azione ciclica (*CSR*):

$$FSL = CRR / CSR$$

assume valori fortemente discordanti da metodo a metodo, con variazioni talora pari al 50%. Il metodo più prudentiale sembra essere il metodo di Boulanger & Idriss (*1914*) relativo alle prove penetrometriche CPTU, metodo che rientra fra le indicazioni contenute negli allegati alla delibera n. 2193/2015 della Regione Emilia Romagna. Tenuto conto delle recenti prescrizioni di cui alle NTC (*adottare il metodo più cautelativo*), la scelta del metodo di Boulanger & Idriss sembrerebbe diventare obbligatoria.

Nel sottolineare l'importanza che riveste la frazione fine limosa (*FC*) presente nella sabbia, la quale determina un sensibile aumento del coefficiente di sicurezza (*FSL*) nei confronti della liquefazione, si fa presente che alcuni metodi (*fra cui il sopra citato metodo di Boulanger & Idriss*) si basano su valutazioni di tipo indiretto della frazione fine (*FC*) e non su precise determinazioni di laboratorio (*analisi granulometriche*). Tale fatto dovrebbe essere oggetto di discussione.

Particolare interesse riveste il recente metodo di Kayen et Al. (*2013*), basantesi sui risultati di indagini geofisiche (*con determinazione della velocità  $V_s$  delle onde di taglio*), supportato da ben 422 casi reali ben documentati. Una particolarità del metodo sta nel fatto la velocità  $V_s$  non risulterebbe influenzata



dal contenuto in frazione fine limosa (*FC*), eliminando così i possibili problemi legati ad una non precisa valutazione del contenuto in frazione fine (*come visto in precedenza*).

Alcune riflessioni in merito alla magnitudo ( $M_w$ ) da prendere in considerazione nelle verifiche a liquefazione. Per i siti ricadenti all'interno delle diverse Zone Sismogenetiche (*di cui alla Zonazione Sismogenetica ZS9 - INGV - Marzo 2004*), come visto in precedenza di norma si fa riferimento ai valori massimi riportati nel testo "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" a cura del Dipartimento della Protezione Civile. In analogia alla scelta dei valori delle accelerazioni, sarebbe opportuno secondo lo scrivente far riferimento anche per la magnitudo a criteri probabilistici, legati a prefissati tempi di ritorno. Lo stesso dicasi per i siti ricadenti all'esterno delle suddette Zone Sismogenetiche.

Una novità espressa al capitolo 8 delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018: nella valutazione di sicurezza di una costruzione esistente viene obbligatoriamente richiesta la verifica delle fondazioni rispetto a possibili fenomeni di liquefazione sismica del terreno.

Da ultimo alcune riflessioni in merito agli interventi di consolidamento di terreni soggetti a rischio liquefazione. Nell'ipotesi di interventi mediante pali di fondazione, interessanti banchi sabbiosi saturi scarsamente addensati di un certo spessore, si dovrà tenere conto di possibili fenomeni di "attrito negativo" indotti dagli inevitabili cedimenti post-sismici, nonché di eventuali fenomeni di instabilità laterale per "carico di punta" dei pali medesimi.

In presenza di edifici adiacenti particolare attenzione dovrà essere rivolta nei confronti di possibili vibrazioni (*in presenza di tecnologie di consolidamento tipo "save composer", ad esempio*) e nei confronti di fenomeni di "claquage" (*in presenza di iniezioni di compattazione "compaction grouting", ad esempio*).

Una prima caratterizzazione geologico-tecnica dei terreni di fondazione, non ha evidenziato la presenza di depositi costituiti da sabbie pulite e sciolte sotto falda, come riportato nel capitolo 6. Inoltre, le accelerazioni massime attese al piano campagna risultano comprese tra 0.075 e 1.000g (capitolo 8). Per tali motivi è **possibile escludere potenziali fenomeni di liquefazione dei terreni**, come si evince dal comma 2 del paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 2018 esclusione della verifica a liquefazione per:

- “*distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in figura 7.11.1a (NTC 2018) nel caso di terreni con coefficienti di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in figura 7.11.1b (NTC 2018) nel caso di terreno con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .*”;
- *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g.*

## CONCLUSIONI

La seguente Relazione Geologica è stata redatta con lo scopo di illustrare ed integrare i risultati delle indagini geofisiche e geognostiche previste nel piano di indagini: *“Opere Complementari alla chiusura alla chiusura del PL di Via Trieste in Comune di Erba (CO) – Adeguamento di Via Milano”*. Nell’area in questione sono stati effettuati tre sondaggi a carotaggio continuo (S1, S2 e S3), spinti fino a 10m, comprensivi di prelievo di un campione indisturbato e 2 campioni rimaneggiati (lungo S1), 1 prove DPSH (prossime ai sondaggi), 3 prove SPT (lungo il sondaggio 2), 9 prove Lefranc a carico variabile (in S1 e S3 nei livelli di riporto la colonna d’acqua si è dissipata in pochi secondi), una indagine di tipo MASW ed una indagine REMI.

I dettagli delle prove eseguite sono riportate nella seguente tabella:

Nome	Data	Profondità (m)	Ubicazione
<b>Sondaggio 1</b>	16/11/2022	10.00	Lat: 45.801161° Lon: 9.237823°
<b>Sondaggio 2</b>	17/11/2022	10.00	Lat: 45.800863° Lon: 9.238297°
<b>Sondaggio 3</b>	18/11/2022	10.00	Lat: 45.800305° Lon: 9.238398°
<b>Penetrometrica 1</b>	15/11/2022	11.00	Lat: 45.801260° Lon: 9.237746°
<b>Lefranc 1_S1</b>	16/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 1
<b>Lefranc 2_S1</b>	16/11/2022	3.00-3.50	Sondaggio 1
<b>Lefranc 3_S1</b>	16/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 1
<b>Lefranc 1_S2</b>	17/11/2022	1.00-1.50	Sondaggio 2
<b>Lefranc 2_S2</b>	17/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 2
<b>Lefranc 3_S2</b>	17/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 2
<b>Lefranc 1_S3</b>	18/11/2022	0.50-1.00	Sondaggio 3
<b>Lefranc 2_S3</b>	18/11/2022	2.50-3.00	Sondaggio 3
<b>Lefranc 3_S3</b>	18/11/2022	4.00-5.00	Sondaggio 3
<b>Campione Indisturbato</b>	16/11/2022	1.00-1.50	Sondaggio 1



<b>Campione Rimaneggiato_1</b>	16/11/2022	3.00-3.50	Sondaggio 1
<b>Campione Rimaneggiato_2</b>	16/11/2022	4.50-5.00	Sondaggio 1
<b>SPT 1</b>	17/11/2022	1.00-1.45	Sondaggio 2
<b>SPT 2</b>	17/11/2022	3.00-3.45	Sondaggio 2
<b>SPT 3</b>	17/11/2022	5.50-5.95	Sondaggio 2

ID Indagine Geofisica	Geofoni (nr.)	Distanza Intergeofonica	Frequenza geofoni	Lunghezza Stendimento	G1/G24 Lat.	G1/G24 Lon.
<b>MASW 1</b>	24	2 m	4.5 Hz	48 m	45.800494°/ 45.800891°	9.238309°/ 9.238053°
<b>REMI 1</b>	24	2 m	4.5 Hz	48 m	45.800494°/ 45.800891°	9.238309°/ 9.238053°

A seguito delle interpretazioni delle prove geognostiche effettuate, da un punto di vista geotecnico i materiali presentano discrete caratteristiche meccaniche. In particolare l'opera in progetto insisterà su terreni ghiaiosi, ghiaioso-sabbiosi, talvolta con presenza di limi. La correlazione tra i sondaggi da indice di omogeneità del sottosuolo, sebbene vi siano piccole variazioni deposizionali (lenti) tipiche del Sintema Po. Le evidenze, oltre che nelle osservazioni delle cassette catalogatrici, si riscontrano nelle prove DPSH effettuate, dove si osserva un'alternanza nel numero di colpi effettuati, maggiori in corrispondenza degli orizzonti più ghiaiosi-grossolani, e nei profili di velocità ottenuti dalle indagini geofisiche MASW, dove si osservano inversioni di velocità.

L'area oggetto dei lavori è ubicata nel comune di Erba (CO), all'interno dell'area di parcheggio comunale che insiste su Via Cascina California e avente una quota pari a 271 m s.l.m. Questa è situata tra il Lago di Pusiano ed il Lago di Alserio, e rientra nel foglio Como 075 a scala 1:50.000 della Carta Geologica D'Italia. Tale settore insiste su una conoide di origine mista (depositi glaciali wurmiani e depositi fluvioglaciali wurmiani) con materiali ghiaiosi (da fini a grossolani) a supporto clastico, di matrice limoso – argillosa o di matrice sabbiosa. I depositi di conoide, dominati da debris flow, possono essere formati da corpi lenticolari a diversa granulometria composti da sabbie e ghiaie; si differenziano i livelli lacustri, i quali tendono ad avere una granulometria inferiore: limi laminati, sabbie fini, argille e torbe. In particolare, dall'analisi delle perimetrazioni dei complessi idrogeologici

della regione Lombardia (Figura 4), si asserisce che l'area di interesse ricade all'interno del subcomplesso dei “*Depositi Quaternari di origine glaciale*”; il subcomplesso fa parte del “Complesso dei Depositi Sciolti Quaternari”, ed occupa tutta la porzione di territorio lombardo di collegamento tra i rilievi prealpini e la Pianura padana occupato da depositi quaternari di origine prevalentemente glaciale e/o fluvioglaciale.

Dall'esame delle cartografie di riferimento ottenibili dal geoportale di MinAmbiente è stato possibile valutare che l'area di interesse è al di fuori delle aree a rischio alluvione secondo le APSFR (Areas of Potential Significant Flood Risk); inoltre, dall'analisi del catalogo IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) l'area in esame non ricade in aree a rischio frana. Tuttavia c'è da segnalare un'opera principale di sbarramento, a nord dell'area di interesse, che interessa il Fiume Lambro.

Grazie ai 3 sondaggi effettuati è stato possibile ricostruire la stratigrafia dell'area.

Di seguito si riporta, a titolo di esempio, la stratigrafia del Sondaggio 2:

- (0.00 – 1.30) – **Terreno con Riporto Antropico;**
- (1.30 – 2.80) – **Sabbia Limosa Ghiaiosa;**
- (2.80 – 8.00) – **Sabbia Ghiaiosa;**
- (8.00 – 10.00) – **Argilla Limosa.**

È stato ricostruito il modello geotecnico degli orizzonti riscontrati facendo capo ai dati ottenuti dalla prova penetrometrica, dalla SPT e dai campioni prelevati (un indisturbato e due rimaneggiati, prelevati lungo il Sondaggio S1).

I campioni prelevati da S1 risultano essere prelevati alle seguenti profondità:

- 1.00 -1.50 (Rimaneggiato);
- 3.00 – 3.50 (Indisturbato);
- 4.50-5.00 (Rimaneggiato).

Dalle prove geognostiche eseguite, è stato possibile realizzare un modello geotecnico rappresentativo dell'area di studio. Le principali unità individuate risultano essere:

- **TERRENO DI RIPORTO:** con uno spessore di circa 1,5 m ed è costituito da un terreno rimaneggiato sabbioso grossolano. L'angolo di resistenza al taglio risulta essere pari a circa 32°;
- **SABBIA LIMOSO-GHIAIOSA:** raggiunge uno spessore di circa 2 m ed è costituito da una matrice sabbioso-limosa con inclusi lapidei eterometrici, da sciolto a mediamente addensato. L'angolo di resistenza al taglio è pari a circa 36°, mentre la coesione è di circa 0.12 Kg/cm<sup>2</sup>;
- **SABBIA GHIAIOSA:** caratterizzata da uno spessore di circa 4 metri, costituita da una matrice sabbiosa fine con inclusi lapidei eterometrici. L'angolo di resistenza al taglio è pari a circa 37°.
- **ARGILLA LIMOSA:** rappresenta una lente a matrice argilloso-limosa che raggiunge uno spessore di circa 2 metri nella porzione nord-occidentale dell'area di studio (sondaggi S1-S2), mentre non è stata rinvenuta nel settore sud-orientale (sondaggio S3). La coesione non drenata risulta essere pari a circa 1.77 Kg/cm<sup>2</sup>.

In totale sono state effettuate 9 prove di permeabilità in foro a carico variabile (prova in abbassamento), con l'obiettivo di caratterizzare la permeabilità dei terreni investigati (portati a saturazione a causa della mancanza di falda):

- **Riporto Antropico:** Le prove Lefranc effettuate state eseguite nel primo metro di profondità, con rivestimento a 50 centimetri, e ricadente all'interno del materiale di riporto antropico. La colonna d'acqua è stata sostenuta per 15/30 secondi; questo, probabilmente, è causato dalla scarsa compattazione del materiale e dall'elevata presenza di vuoti tra gli inerti. La prova è stata ripetuta due volte, trattasi quindi di terreni con permeabilità buona (Carta di Casagrande & Fauden), variabile tra: **10<sup>-1</sup> ed 1;**
- **Sabbia Limosa Ghiaiosa:** Le prove Lefranc effettuate su questo livello variano tra 1.50 e 3.00 metri, ottenendo un valore medio di  $K = 2.66E-05$  m/s; permeabilità scarsa (Carta di Casagrande & Fauden);
- **Sabbia Ghiaiosa:** Le prove Lefranc effettuate su questo livello variano tra 4.00 e 5.00 metri, ottenendo un valore di  $K$  variabile tra  $5.54E-05$  m/s e  $2.97E-06$ ; permeabilità scarsa (Carta di Casagrande & Fauden);

Dai sondaggi geognostici e dalle prove di laboratorio effettuate, non si è avuta evidenza di depositi costituiti da sabbie rientranti nella fascia granulometrica liquefacibile al di sotto del livello di falda,



come già espresso nel capitolo 6. Inoltre, le accelerazioni massime attese al piano campagna risultano comprese tra 0.075 e 1.000g (capitolo 8). Per tali motivi è **possibile escludere potenziali fenomeni di liquefazione dei terreni**, come si evince dal comma 2 del paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 2018.

Le indagini geognostiche sono state integrate con indagini geofisiche, in particolare è stata effettuata un'indagine MASW ed un'indagine REMI.

L'indagine M.A.S.W. (Multi-channel Analysis of Surface Waves) realizzata ha fornito un valore della Vs30 pari a **383 m/s**, e quindi rientrante nella categoria di sottosuolo **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).

L'indagine REMI ha consentito di determinare la presenza di strati geofisici più profondi, i quali sono riassunti nella seguente tabella:

Profondità (m)	Velocità (m/s)
0.00 – 7.00	450
7.00 – 17.00	520
17.00 – 30.00	630
30.00 – 45.00	800
45.00 – 50.00	1000

L'area risulta caratterizzata da gradienti di pendenza  $<15^\circ$ , le quali ricadono nella categoria T1 a cui va attribuito un coefficiente di amplificazione topografica St pari a 1,0 come riportato.

Per quanto riguarda la pericolosità sismica l'area di studio ricade all'interno della zona 4 di pericolosità sismica con valori di accelerazione di picco al suolo con una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni su suolo rigido, compresi tra 0.025 e 0.050g.

Il successivo studio di Risposta Sismica Locale è stato condotto secondo un'analisi avanzata di RSL basata sulla classificazione del sottosuolo alla luce delle indagini geofisiche effettuate e l'individuazione, mediante apposite tabelle fornite dalla normativa, del coefficiente di amplificazione stratigrafica Ss, del coefficiente di amplificazione topografica St nonché del coefficiente Cc che modifica il periodo Tc e di conseguenza gli altri periodi notevoli dello spettro di risposta elastico (NTC 2018, §3.2.2-3). Inoltre, sono stati estrapolati gli accelerogrammi spettrocompatibili con il sito

di esame, e dopo aver costruito un adeguato modello di terreno, si è proceduti all'analisi di risposta sismica locale facendo propagare gli accelerogrammi di input, opportunamente scalati rispetto alla PGA di riferimento per ciascun stato limite, dal bedrock alla superficie.

Le analisi condotte hanno quindi evidenziato le seguenti risultanze:

- Le accelerazioni massime orizzontali, per edifici di classe III con  $V_n$  pari a 50 anni e sottosuolo B, variano per ciascun stato limite passando da 0,2136 g per SLO a 0,6329 g per SLC.
- il valore della PGA di sito, è pari a 0,0309 g per lo Stato Limite di Operatività (valore minimo di riferimento per la continuità di funzionamento dell'impiantistica critica) e a 0,0879 g per lo Stato Limite di Collasso (valore limite per la resistenza della struttura portante).

---

## BIBLIOGRAFIA

- Carta delle cavità sotterranee, censite dall'ex ufficio Difesa del Suolo;
- Cartografia IFFI;
- Google Earth Pro per desktop;
- INGV – Carta della pericolosità Sismica.
- NTC 2018 Norme Tecniche per le costruzioni.
- P.A.I - Piano stralcio di assetto idrogeologico;
- Carta Geolitologica del P.G.T. Comunale, Tav. 01-B;
- Carta Geomorfologica del P.G.T. Comunale, Tav. 02-B;
- Carta della Permeabilità del P.G.T. Comunale, Tav. 03-B.



---

**ALLEGATI**

**1) Certificati di Laboratorio.**