



COMUNE DI BOLOGNA



COMUNE DI CALDERARA DI RENO



COMUNE DI CAMUGNANO



COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO



COMUNE DI CASTEL DI CASIO



COMUNE DI CREVALCORE



COMUNE DI GRIZZANA MORANDI



COMUNE DI MARZABOTTO



COMUNE DI SAN GIOVANNI IN PERSICETO

## Realizzazione del percorso del II lotto prioritario della Ciclovía del Sole completamento tronchi n. 3, 4 e 7 nella Città Metropolitana di Bologna - Codice opera 2023VIPCSNC01

CUP: C31B22001500006



### PROGETTO PER CONFERENZA DEI SERVIZI



MATE Soc. Coop.



Cooprogetti Soc. Coop.

**PARCIANELLO PARTNERS** Parcianello & Partners engineering s.r.l.

**RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:** Ing. Lino Pollastri

**RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO:**  
Ing. Chiara Ferrari

**SUPPORTO AL RUP:**  
arch. Federica Sodano  
arch. Carla Maria Costanza Di Martino

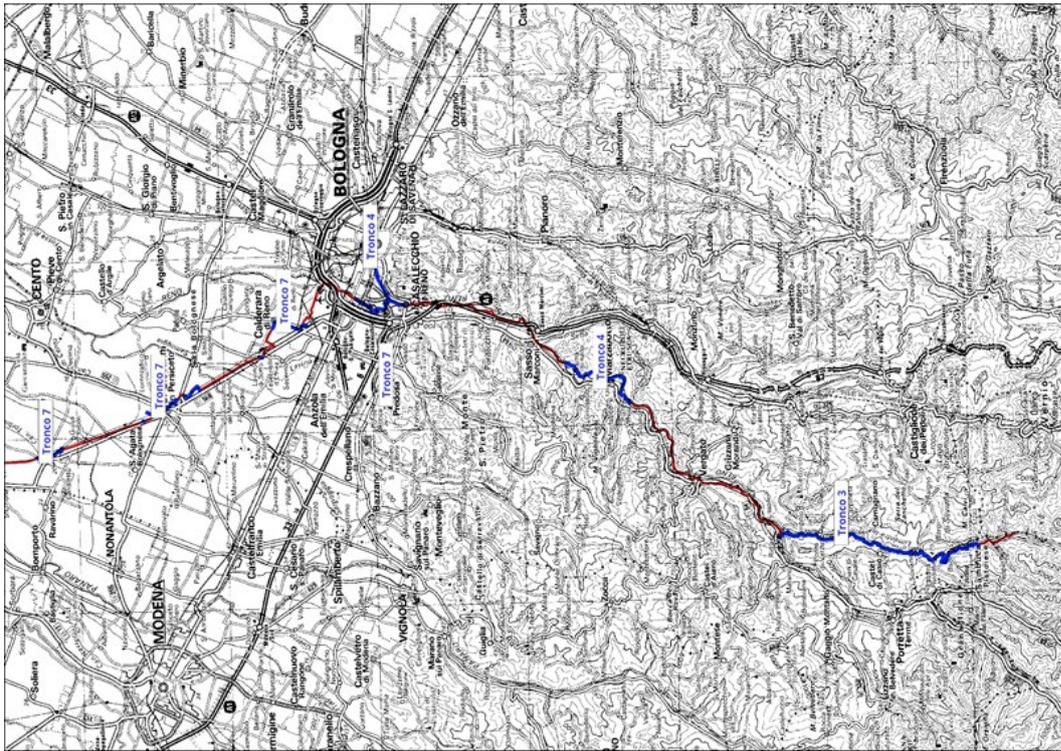
## GEOLOGIA, GEOTECNIA, SISMICA Relazione geologica, sismica e di caratterizzazione geotecnica

Fase C	Categoria GEN	Sottocategoria GE	Progressivo 04	Tipo elaborato RE	Progressivo 01	Revisione B
Codice commessa BOLO24030	Redatto Caprara	Controllato Pollastri	Approvato Pollastri	Scala -	Descrizione Emissione	Data Novembre 2024



COMUNE DI **BOLOGNA, CASALECCHIO E  
GRIZZANA MORANDI**

CITTÀ METROPOLITANA DI  
**BOLOGNA**



## STUDIO GEOLOGICO DEI TERRENI INTERESSATI DAL TRONCO 3, 4 E 7 DELLA CICLOVIA DEL SOLE

23 Luglio 2024

Revisione 18 Novembre 2024



Committente:

**MATE Soc. Coop.va**

Redazione:

**Dott. Geol. Alberto Caprara**

Ordine dei Geologi R.E.R n°1341



**RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA**

## Sommario

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>2</b>
1.1	INQUADRAMENTO PRELIMINARE	2
1.2	RIFERIMENTI ALLA NORMATIVA VIGENTE	2
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO DELL'AREA</b>	<b>3</b>
2.1	CONTESTO GEOGRAFICO	3
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO</b>	<b>6</b>
3.1	GEOMORFOLOGIA TRATTO A BOLOGNA	6
3.2	GEOMORFOLOGIA TRATTO A GRIZZANA MORANDI	6
3.3	GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA TRATTO A BOLOGNA	7
3.4	GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA TRATTO A GRIZZANA MORANDI	8
3.5	IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA TRATTO DI BOLOGNA	9
3.6	IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA TRATTO DI GRIZZANA MORANDI	9
3.7	CONTESTO TETTONICO, QUADRO MACROSISMICO, PERICOLOSITÀ SISMICA	10
<b>4</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO TRATTO DI BOLOGNA</b>	<b>13</b>
4.1	QUADRO ED UBICAZIONE INDAGINE	13
4.2	RISULTATO DELLE ANALISI	15
4.2.1	<i>Sondaggio a carotaggio continuo</i>	15
4.2.2	<i>Prove penetrometriche dinamiche medie DPM</i>	16
4.3	MODELLO E PARAMETRI	17
<b>5</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO TRATTO DI GRIZZANA MORANDI</b>	<b>19</b>
5.1	QUADRO ED UBICAZIONE INDAGINE	19
5.2	RISULTATO DELLE ANALISI	19
5.2.1	<i>Prove penetrometriche dinamiche super-pesanti DPSH</i>	19
5.3	MODELLO E PARAMETRI	21
<b>6</b>	<b>MODELLO SISMICO TRATTO A BOLOGNA</b>	<b>22</b>
6.1	INDAGINI SISMICHE	22
6.1.1	<i>Interpretazione sismo-stratigrafica</i>	23
6.2	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)	23
6.3	VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	24
6.4	RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)	24
6.5	DEFINIZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA	24
<b>7</b>	<b>MODELLO SISMICO TRATTO A GRIZZANA MORANDI</b>	<b>26</b>
7.1	INDAGINI SISMICHE	26
7.1.1	<i>Interpretazione sismo-stratigrafica</i>	26
7.2	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)	27
7.3	VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	27
7.4	RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)	27
7.5	DEFINIZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA	28
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>30</b>

Allegati:

Allegato A: Report Sondaggio a carotaggio continuo

Allegato B: Report DPM

Allegato C: Relazione sulle indagini sismiche (ReMi+HVSr)

# 1 PREMESSA

## 1.1 INQUADRAMENTO PRELIMINARE

- **Tipo di elaborato:** Relazione Geologica e Sismica.
- **Committenza:** MATE Soc. Coop.va
- **Ubicazione:** Tronco 7 e 3, comuni di Casalecchio, Bologna e Grizzana Morandi (BO).
- **Progetto o fine dell'elaborato:** Studio geologico e sismico dei terreni superficiali interessati dal tracciato della Ciclovia del Sole.
- **Tecnici progettisti:** Ing. Elena Guerzoni, Ing. Lino Pollastri, Ing. Silvia Moretti (MATE)
- Lo studio dell'area e l'elaborazione delle lavorazioni di progetto sono stati articolati nelle seguenti fasi:
  - Consultazione della cartografia tematica relativa all'area (carta topografica, carta geologica, carta dei suoli, documenti di piano comunali e regionali).
  - Sopralluogo e rilievo geomorfologico di dettaglio.
  - Esecuzione di una campagna di **indagini geognostiche:**
    - **n° 2 sondaggi a carotaggio continuo.**
    - **n° 8 prova penetrometriche dinamica media (DPM).**
    - **n° 1 stendimento sismico passivo (REMI).**
    - **n° 1 registrazione rumore sismico (HVSr).**
  - Raccolta ed elaborazione dei dati.
  - Ricostruzione del modello geologico di sito.
  - Stesura del presente elaborato.

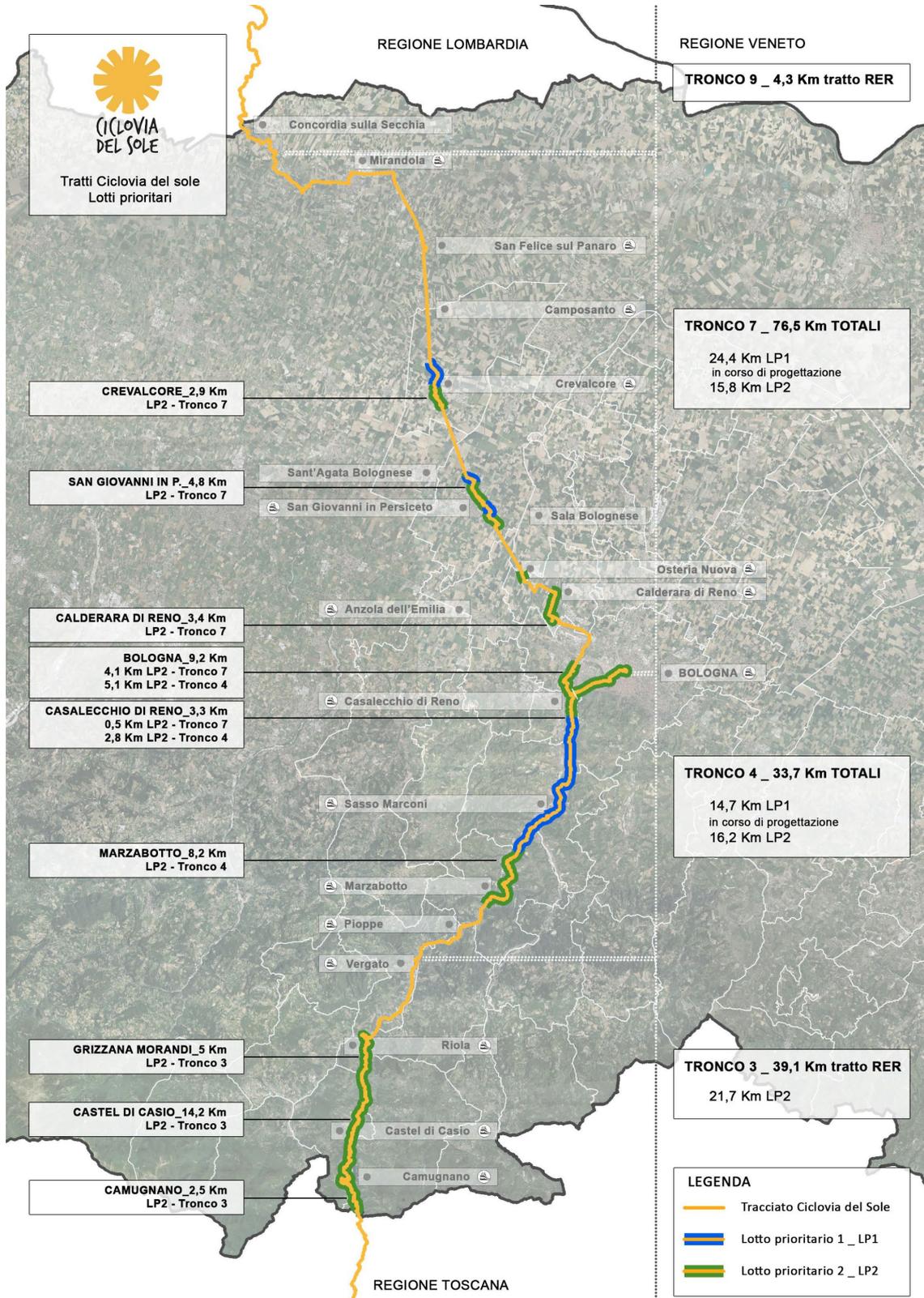
## 1.2 RIFERIMENTI ALLA NORMATIVA VIGENTE

I presenti elaborati sono stati redatti rispettando le disposizioni della normativa vigente. In particolare si fa riferimento alle seguenti disposizioni:

- D.P.R. n. 328 del 05 giugno 2001: "Modifiche ed integrazioni della disciplina dei requisiti per l'ammissione all'esame di Stato e delle relative prove per l'esercizio di talune professioni, nonché della disciplina dei relativi ordinamenti" – Suppl. Ordinario n. 212 alla G.U. n. 190 del 17-08-2001 (Artt. 40-44).
- O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- Norme tecniche per le costruzioni: Decreto 14/01/2008 del Ministero delle infrastrutture (GU n.29 del 04/02/2008).
- Circolare Cons. Sup. LL.PP. n. 617/2009: Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- Aggiornamento delle NTC: Decreto del 17/01/2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (G.U. n° 42 del 20/02/2018).
- Circolare Cons. Sup. LL.PP.: supplemento ordinario n. 5 alla G.U. – serie generale n. 35 del 11 febbraio 2019.

## 2 INQUADRAMENTO DELL'AREA

### 2.1 CONTESTO GEOGRAFICO



3

Figura 1: Inquadramento dei tratti relativi alla ciclovia

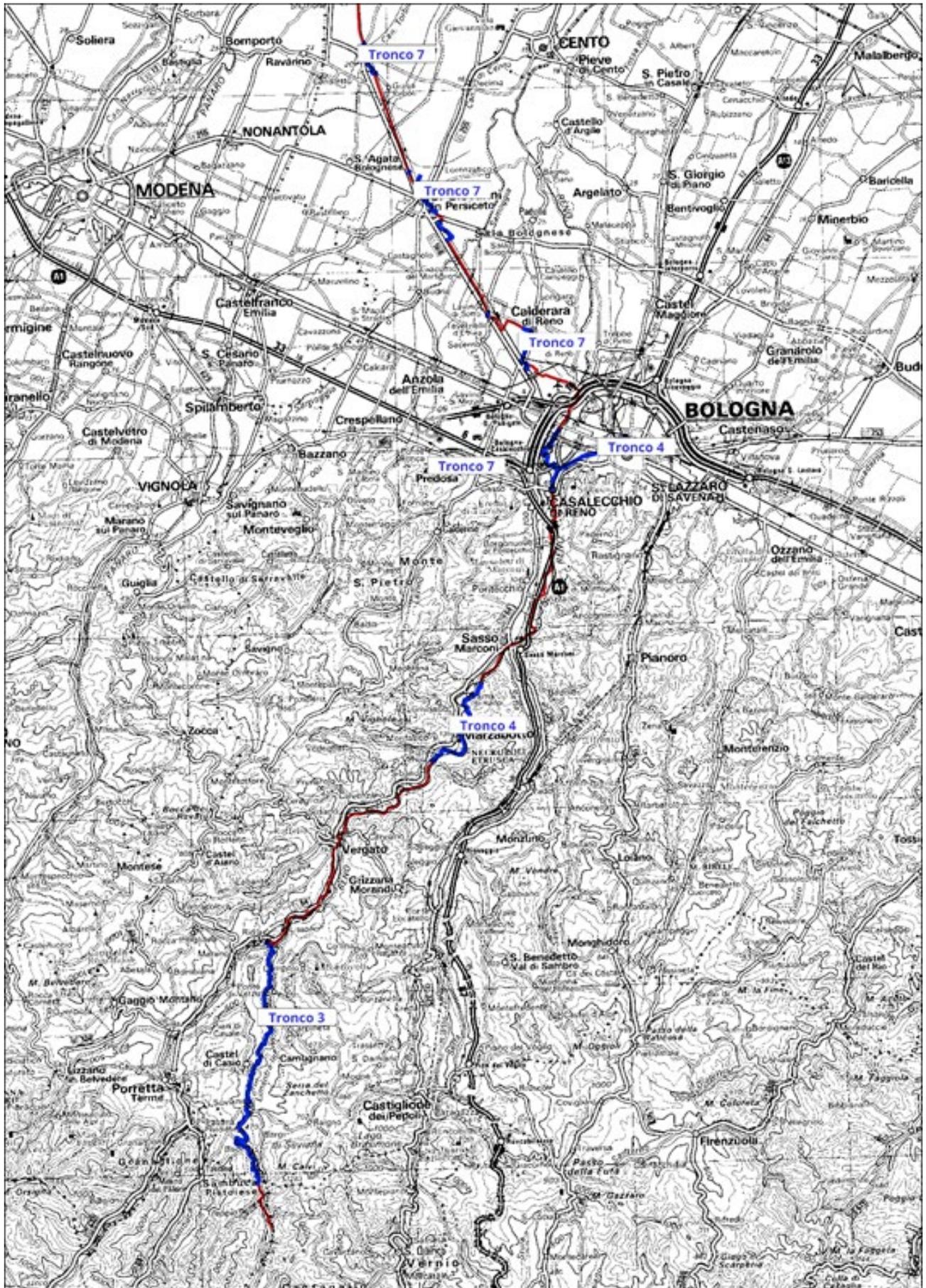


Figura 2: Inquadramento su CTR dei tronchi interessati da questa relazione.

- Coordinate punto centrale area d'intervento:

	UTM - ED50 (Hayford – Monte Mario)	UTM – ITRF2000 (WGS84 – Greenwich “GPS”)
<b>Punto di inizio a Crevalcore</b>	44.729389,11.149669	44.728454,11.148668
<b>Punto di fine a Crevalcore</b>	44.711584,11.157702	44.710649,11.156701
<b>Punto di inizio a San Giovanni in Persiceto</b>	44.654711,11.190282	44.653774,11.189283
<b>Punto di fine a San Giovanni in Persiceto</b>	44.619093,11.210563	44.618156,11.209565
<b>Punto di inizio a Calderara di Reno</b>	44.568438,11.267873	44.567500,11.266877
<b>Punto di fine a Calderara di Reno</b>	44.545409,11.268405	44.544470,11.267409
<b>Punto di inizio a Bologna</b>	44.511295,11.292016	44.545409,11.268405
<b>Punto di fine a Bologna</b>	44.506666,11.344317	44.505727,11.343324
<b>Punto di inizio a Casalecchio di Reno</b>	44.490637,11.295597	44.489697,11.294603
<b>Punto di fine a Casalecchio di Reno</b>	44.479032,11.285991	44.478092,11.284997
<b>Punto di inizio a Marzabotto</b>	44.370957,11.226947	44.370014,11.225954
<b>Punto di fine a Marzabotto</b>	44.329333,11.188130	44.328388,11.187136
<b>Punto di inizio tratto montano</b>	44.230172,11.056744	44.229224,11.055749
<b>Punto di fine tratto montano</b>	44.096294,11.044489	44.095342,11.043496

Tabella 1: coordinate geografiche del sito in oggetto.

I tratti in progetto sono descritti in maniera esaustiva nei rispettivi elaborati di progetto. Nella presente relazione si farà riferimento unicamente ai tratti evidenziati in rosso dove è prevista la realizzazione di un nuovo tracciato e relative opere, escludendo perciò i tratti dove è prevista unicamente la ripavimentazione o il rifacimento della segnaletica esistente. I tratti a cui si farà riferimento nella presente relazione sono perciò quelli interessati da opere più rilevanti, comprendendo nuovi sottofondi o rilevati, o nuove opere di sostegno o di attraversamento (ponti). Di seguito si riportano gli estratti dei tratti di interesse per la presente relazione.

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

#### 3.1 GEOMORFOLOGIA TRATTO A BOLOGNA

- Quota altimetrica: circa da 42 a 57 m s.l.m. nel tratto dentro l’abitato di Bologna
- Contesto geomorfologico: conoide e aree terrazzate, contesto di ex-cava di ghiaia e sabbia
- Forme riconoscibili: le forme originarie risultano completamente alterate o nascoste dalla intensa e secolare urbanizzazione dell’area. A piccola scala si osserva la grande forma deposizionale a conoide del Fiume Reno, in questo settore nelle sue propaggini laterali. La cartografia del PSC di Bologna in più settori laterali al corso del Fiume Reno riporta ex-aree di cava di ghiaia e sabbia tombate.

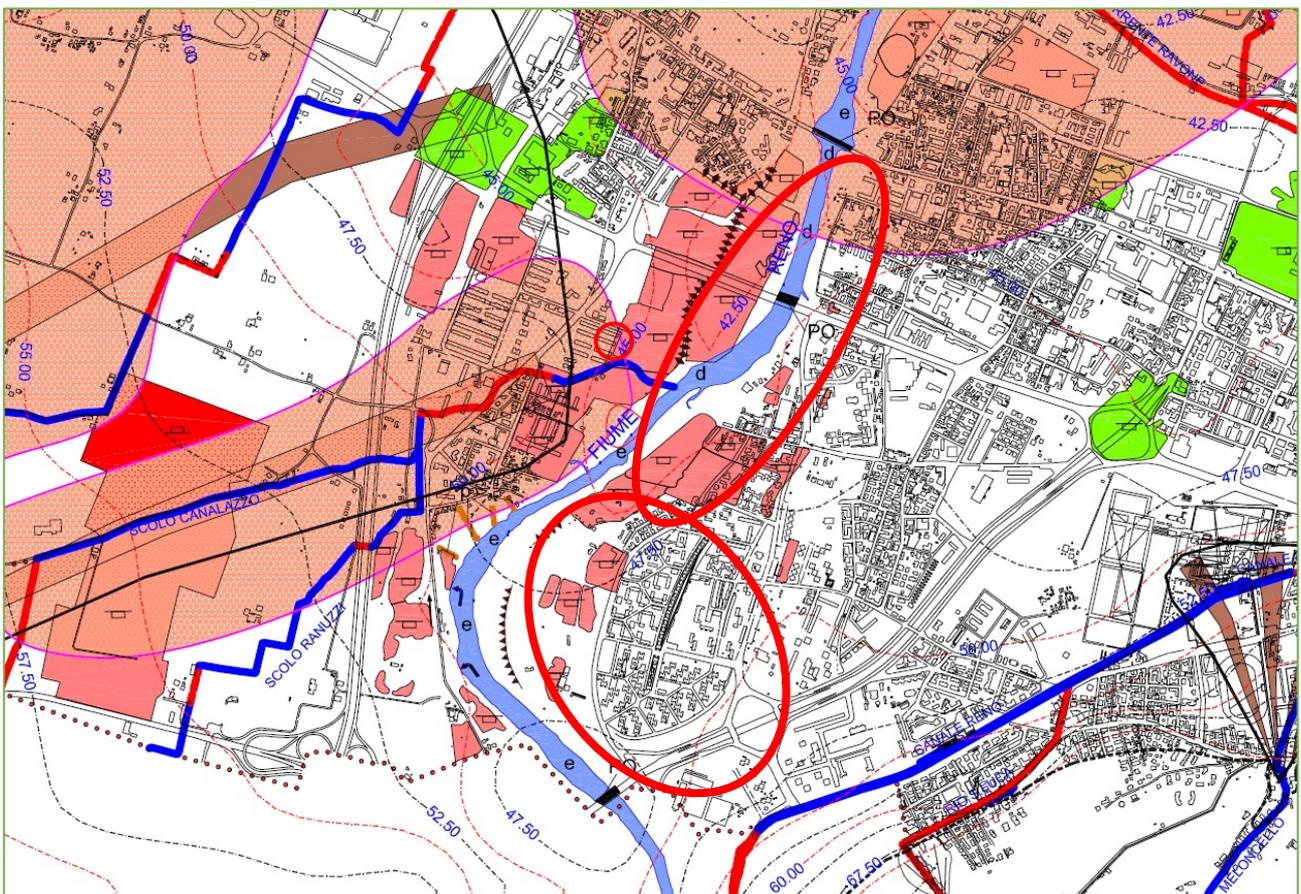


Figura 3: Stralcio della “Carta geomorfologica di pianura”, a corredo del Quadro Conoscitivo del PSC del Comune di Bologna.



#### 3.2 GEOMORFOLOGIA TRATTO A GRIZZANA MORANDI

- Quota altimetrica: circa da 275 a 300 m s.l.m. nel tratto di Grizzana Morandi.
- Contesto geomorfologico: terrazzo e aree di versante

- **Forme riconoscibili:** l'area segue la strada provinciale SP62 che scorre circa in quota seguendo la morfologia della porzione bassa del versante con esposizione verso Est del bacino del Torrente Limentra. Il tratto in oggetto si sviluppa da Riola fino all'abitato di Ponte di Verzuno su un pendio con forme complesse condizionate dalla dinamica di versante e dall'azione del corso d'acqua più a valle. In particolare attraversa alcune aree caratterizzate da dissesti in atto o quiescenti riportati sulla cartografia della Regione Emilia Romagna e della Città Metropolitana. Si incontrano così aree classificate a Rischio R2 e R4 e aree a rischio frana perimetrate e zonizzate (in particolare le schede 78, 25 e 75).

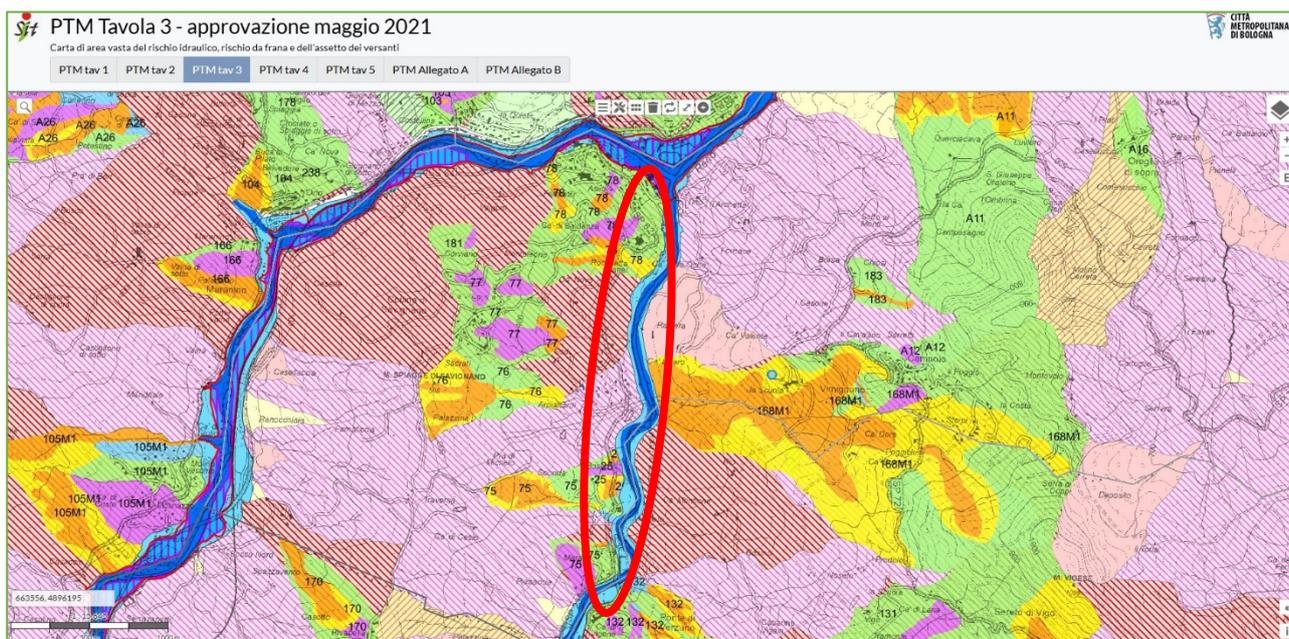


Figura 4: Stralcio della “Carta geomorfologica di pianura”, a corredo del Quadro Conoscitivo del PSC del Comune di Bologna.

7

### 3.3 GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA TRATTO A BOLOGNA

- **Contesto sedimentologico:** conoide.
- **Litologia superficiale:** ghiaia sabbiosa – piana alluvionale.
- **Unità geologica:** AES8 – Subsistema di Ravenna. Nei settori intravallivi ghiaie passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nella piana alluvionale ghiaie, sabbie, limi ed argille. Limite superiore dato da suoli variabili da non calcarei a calcarei. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a. Limite inferiore erosivo sui depositi marini e alluvionali sottostanti. Subsistema contenente una unità a limiti inconformi di rango gerarchico inferiore (AES8a) che, dove presente, ne costituisce il tetto stratigrafico. Spessore massimo in pianura di 25 metri circa.
- Stralcio della Carta Geologica on-line a cura della Regione Emilia-Romagna:

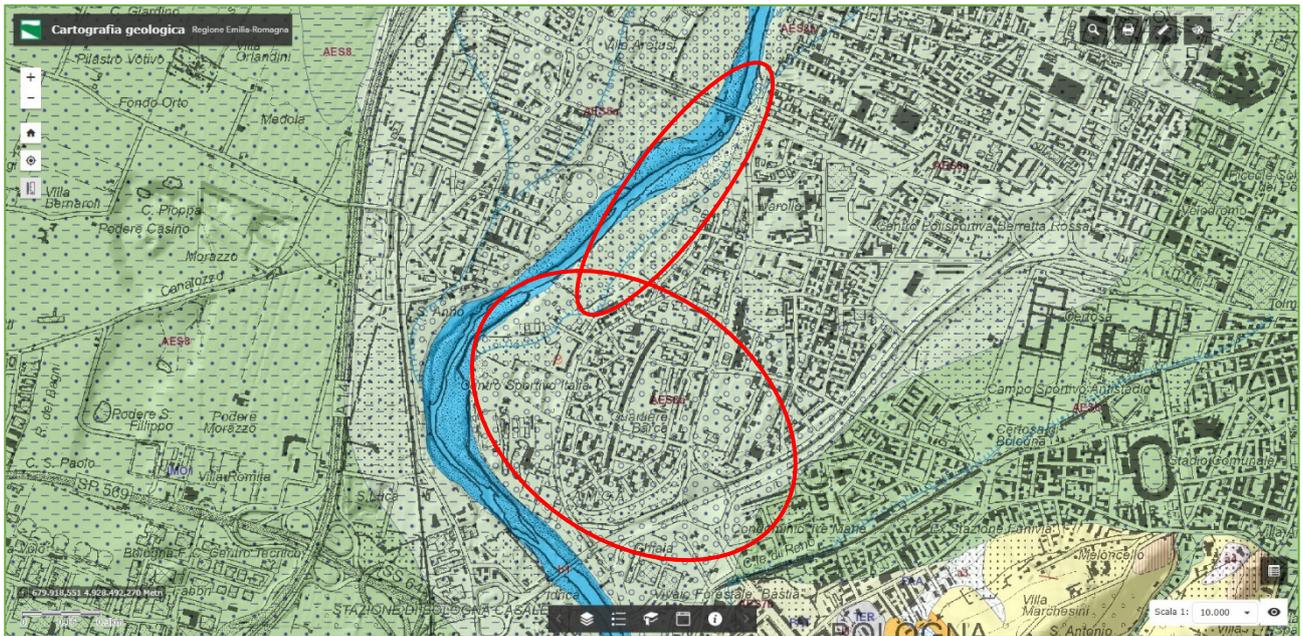


Figura 5: stralcio Carta geologica alla scala 1:5.000 della Regione Emilia Romagna.

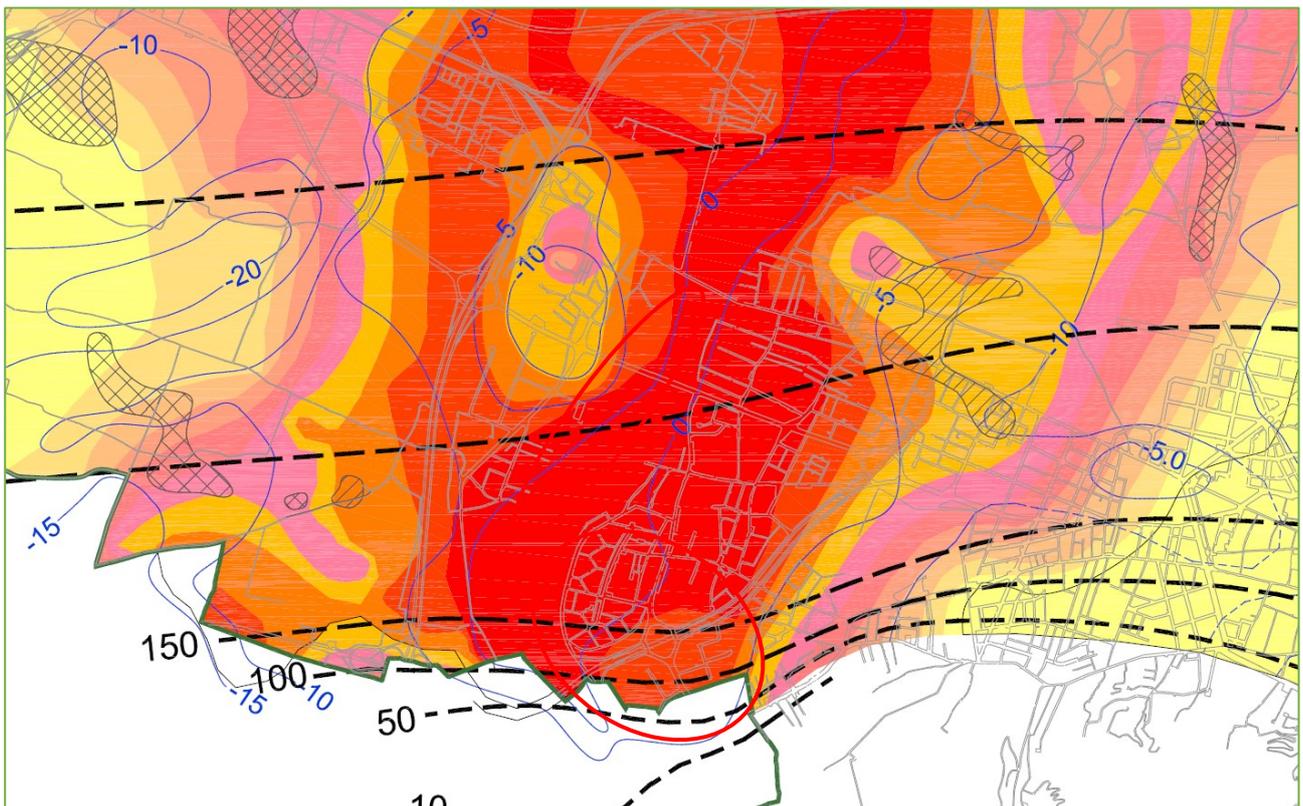


Figura 6: Estratto della “Carta del sottosuolo”, a corredo del Quadro conoscitivo, nella sezione rischio sismico del PSC di Bologna.

Campitura: percentuale di ghiaie entro i primi 30 m superiore a 80%. Isobate del tetto delle ghiaie tra 0 e -5 m

### 3.4 GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA TRATTO A GRIZZANA MORANDI

- Unità geologica: AES8 – Subsistema di Ravenna. Nei settori intravallivi ghiaie passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nella piana alluvionale ghiaie, sabbie, limi ed argille. Limite superiore dato da suoli variabili da non calcarei a calcarei. I suoli non calcarei e

scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a. Limite inferiore erosivo sui depositi marini e alluvionali sottostanti. Subsistema contenente una unità a limiti inconformi di rango gerarchico inferiore (AES8a) che, dove presente, ne costituisce il tetto stratigrafico. Spessore massimo in pianura di 25 metri circa.

- **Unità geologica:** APA – Argille a Palombini. Argille intensamente tettonizzate, argilliti - unità costituite in prevalenza da argille che a causa della loro storia tettonica risultano intensamente piegate e fratturate dalla scala dell'affioramento fino alla scala del campione ("argille scagliose").
- Stralcio della Carta Geologica on-line a cura della Regione Emilia-Romagna:

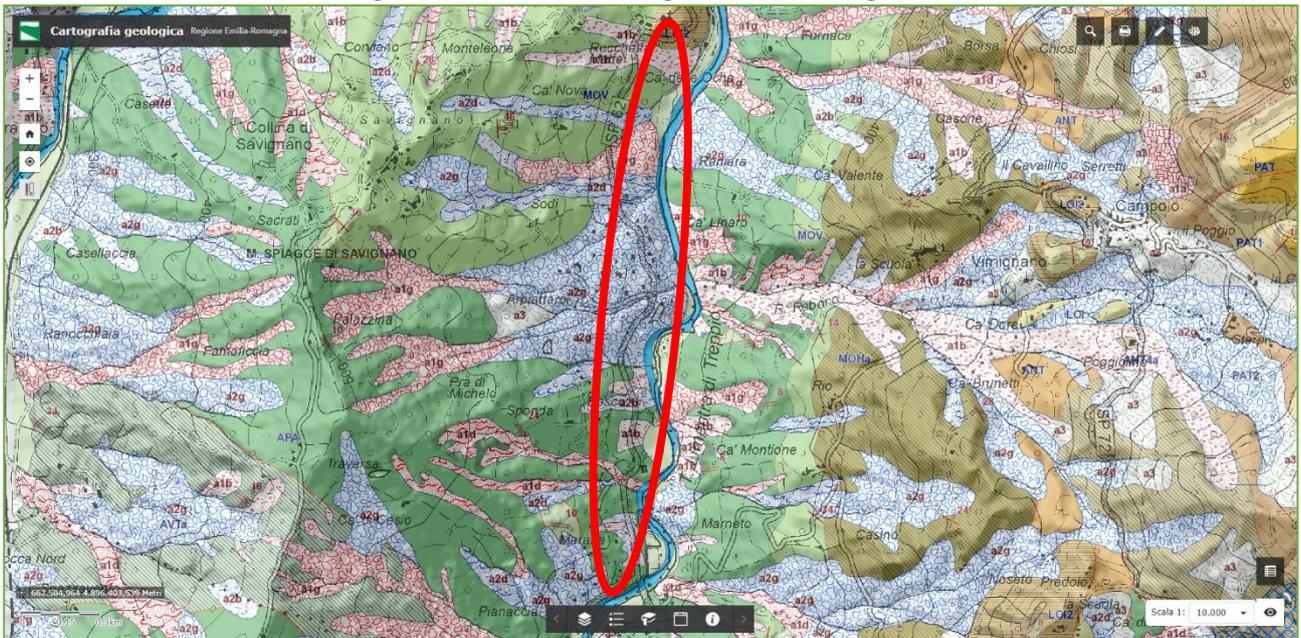


Figura 7: stralcio Carta geologica alla scala 1:5.000 della Regione Emilia Romagna.

### 3.5 IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA TRATTO DI BOLOGNA

- **Descrizione del deflusso idrologico:** nell'area di ambito urbano la regimazione superficiale è gestita dalla rete di canali e fossi di scolo delle acque superficiali. Nei pressi del corso d'acqua la circolazione superficiale è condizionata dalla pendenza e dalla vicinanza con il fiume Reno.
- **Descrizione del deflusso idrogeologico:** nelle aree di pianura il deflusso idrogeologico è fortemente condizionato dalla litologia e dalle strutture sepolte. In particolare nell'area la presenza di un potente strato di materiale grossolano determina una circolazione profonda a causa dell'elevata permeabilità dei materiali.

### 3.6 IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA TRATTO DI GRIZZANA MORANDI

- **Descrizione del deflusso idrologico:** la circolazione idrologica è condizionata dalla morfologia e dalla presenza della strada. Il collettore principale dell'area è il Torrente Limentra.
- **Descrizione del deflusso idrogeologico:** la circolazione idrogeologica è condizionata dalla successione stratigrafica presente nel sito. Vista la grande variabilità delle situazioni geomorfologiche presenti nell'area di interesse le condizioni di circolazione idrogeologica possono essere anche molto diverse tra loro. In generale il deflusso avviene all'interno dei terreni della coltre o dei terreni superficiali dotati di maggior permeabilità. Il substrato locale, costituito da argilliti, risulta essere un importante barriera di permeabilità. la circolazione

idrogeologica avviene perciò in particolar modo in corrispondenza dell'interfaccia tra coltre e substrato. Nelle zone di impluvio può essere anche abbondante e costante durante l'anno, mentre nelle altre zone è certamente modesta e discontinua, condizionata in particolare dal regime delle precipitazioni.

### 3.7 CONTESTO TETTONICO, QUADRO MACROSISMICO, PERICOLOSITÀ SISMICA

- Stralcio della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna:

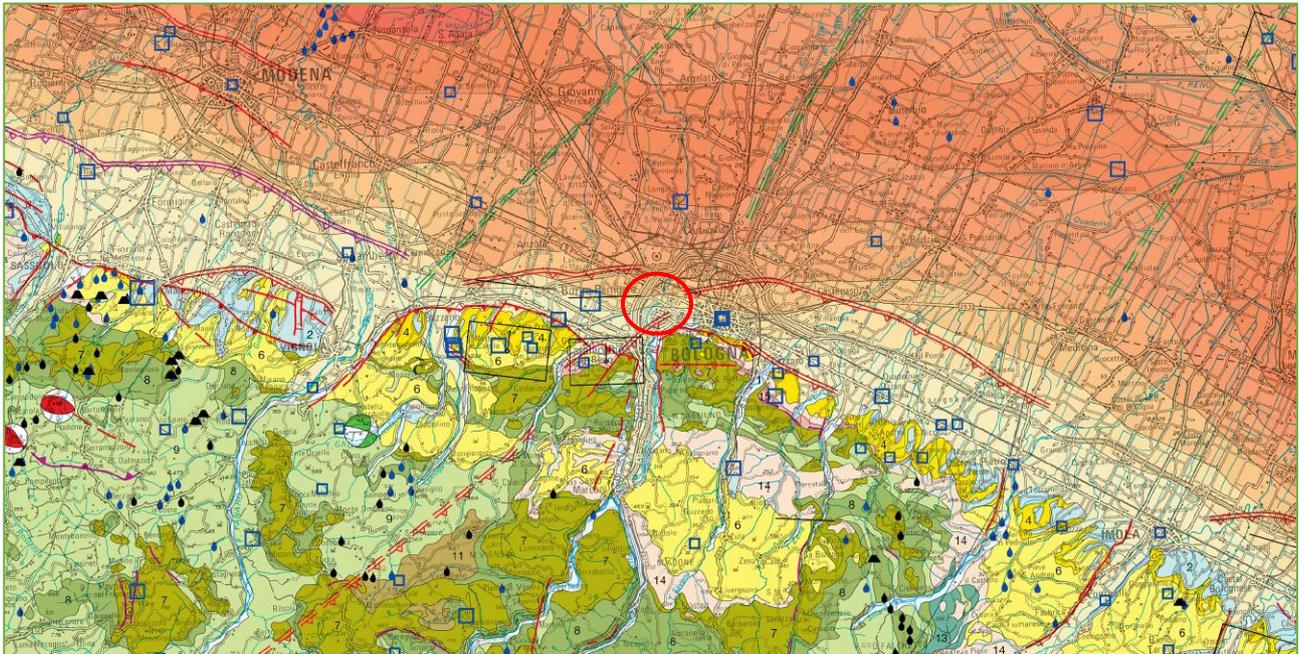


Figura 8: ritaglio della Carta Sismotettonica regionale Emilia-Romagna (v. 2017).

Campitura e descrizione: Isobate della base del Sistema Emiliano Romagnolo Superiore (SERS 0,45 Ma-presente). 100 ÷ 50 m s.l.m

10

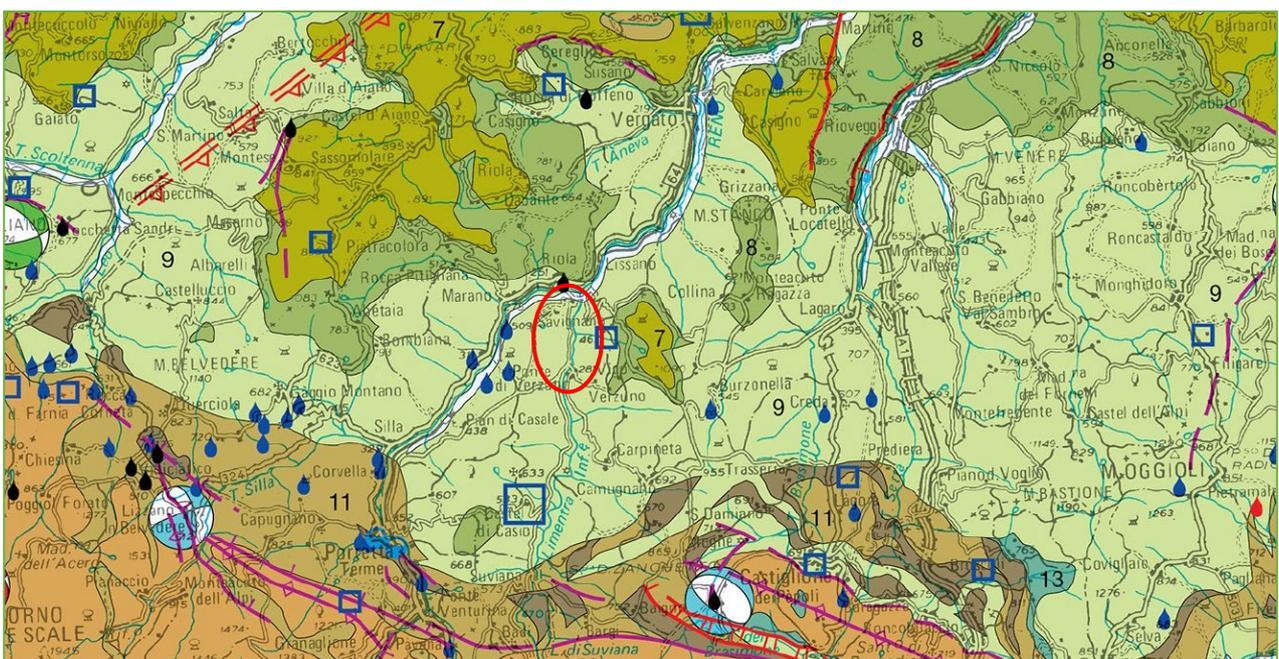


Figura 9: stralcio carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna (v. 2017)

Campitura e descrizione: 9 - Unità Liguridi (Giurassico – Eocene Medio)

- **Catalogo DISS v. 3.3.0, Database of Individual Seismogenic Sources, redatto a cura dell'I.N.G.V.**

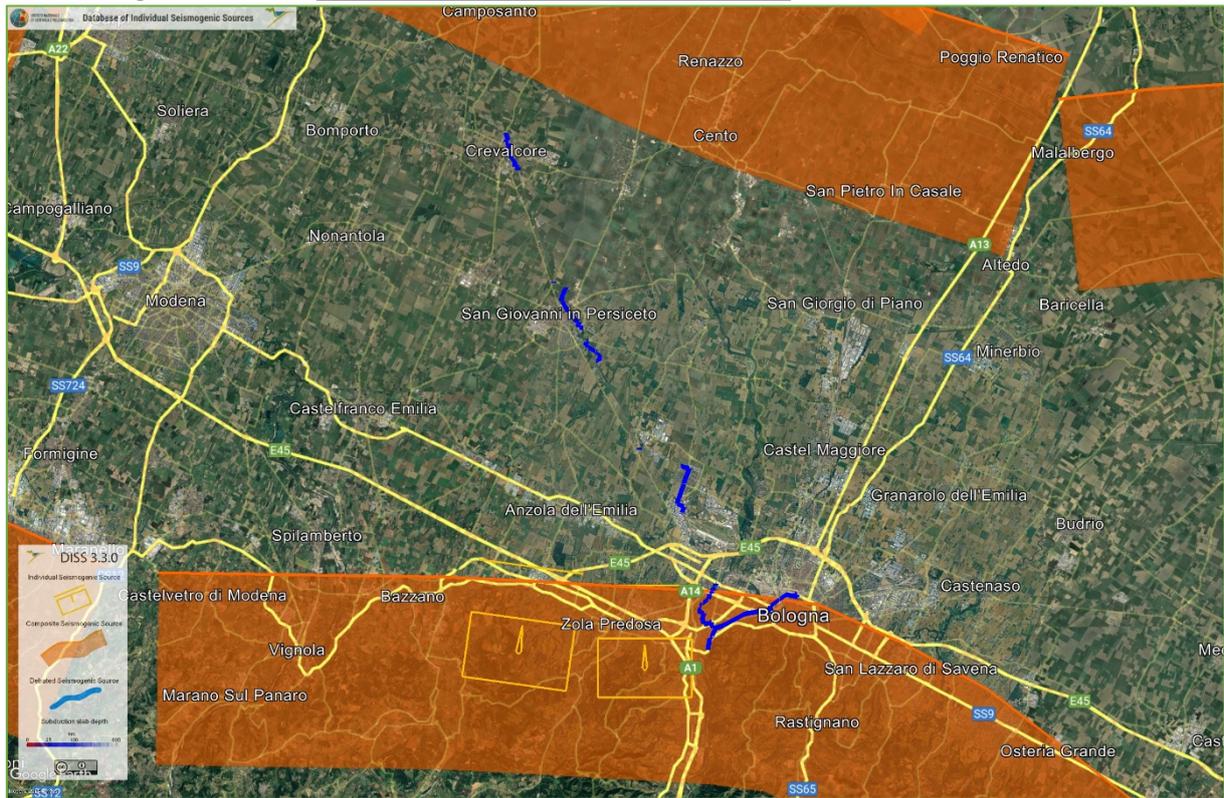
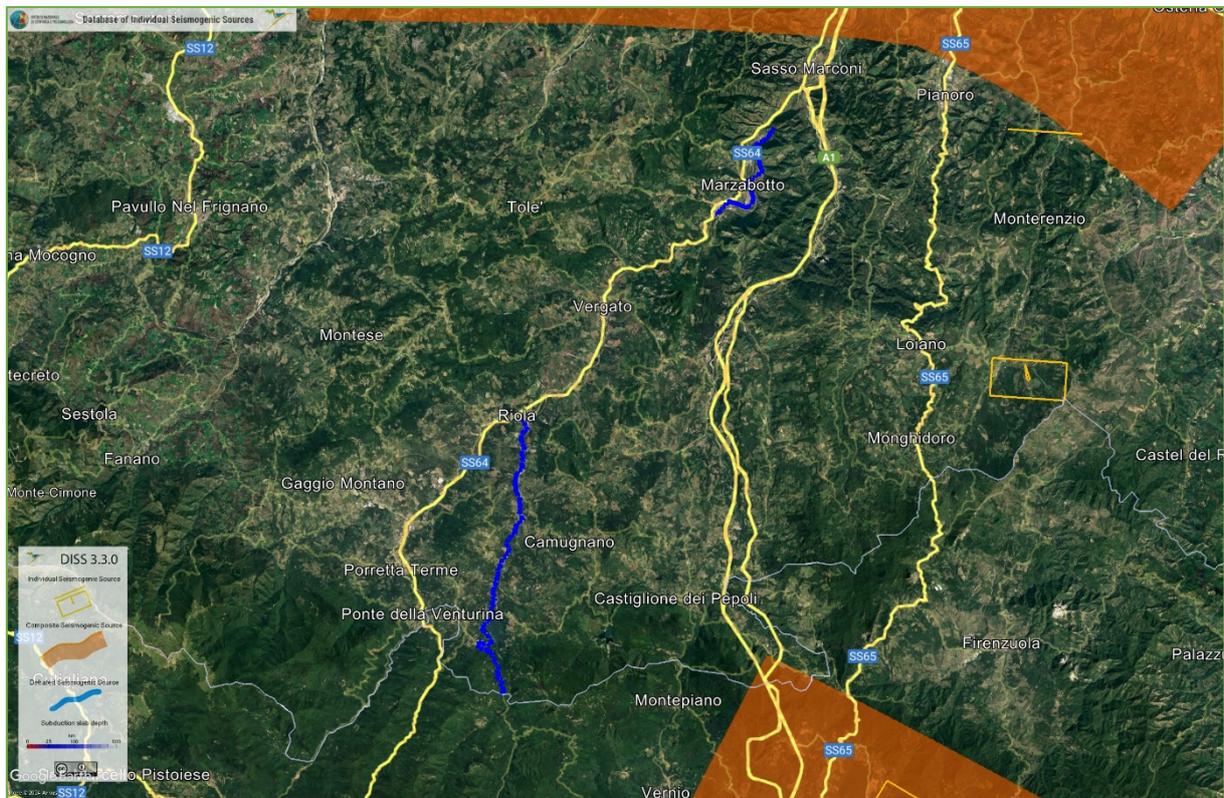


Figura 10: estratto del DISS 3.3.0, database delle sorgenti sismogenetiche a cura di INGV.



**Strutture influenti e caratteristiche:** a SUD: **ITCS047:** Sorgente sismogenetica composta Castelvetto di Modena-Castel San Pietro Terme (massima magnitudo attesa = 6.8 Mw). a NORD: **ITCS051:** Sorgente sismogenetica

composita Carpi-Poggio Renatico (massima magnitudo attesa = 6.9 Mw). a NORD-EST: **ITCS012**: Sorgente sismogenetica composita Malalbergo-Ravenna (massima magnitudo attesa = 6.9 Mw).

- Stralcio PTM (Piano Territoriale Metropolitan) della Città metropolitana di Bologna:

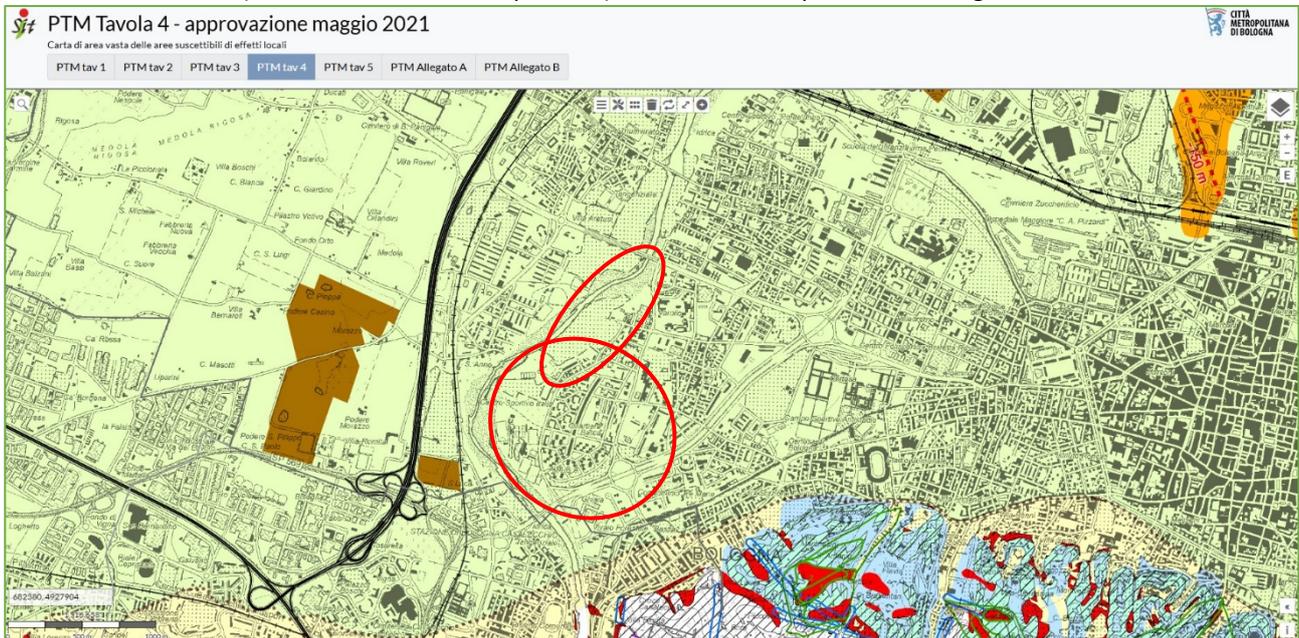


Figura 11: stralcio della Tavola dei vincoli – Rischio sismico della Città metropolitana di Bologna.

Campitura: Area B – Depositi di margine appenninico padano (art 28)

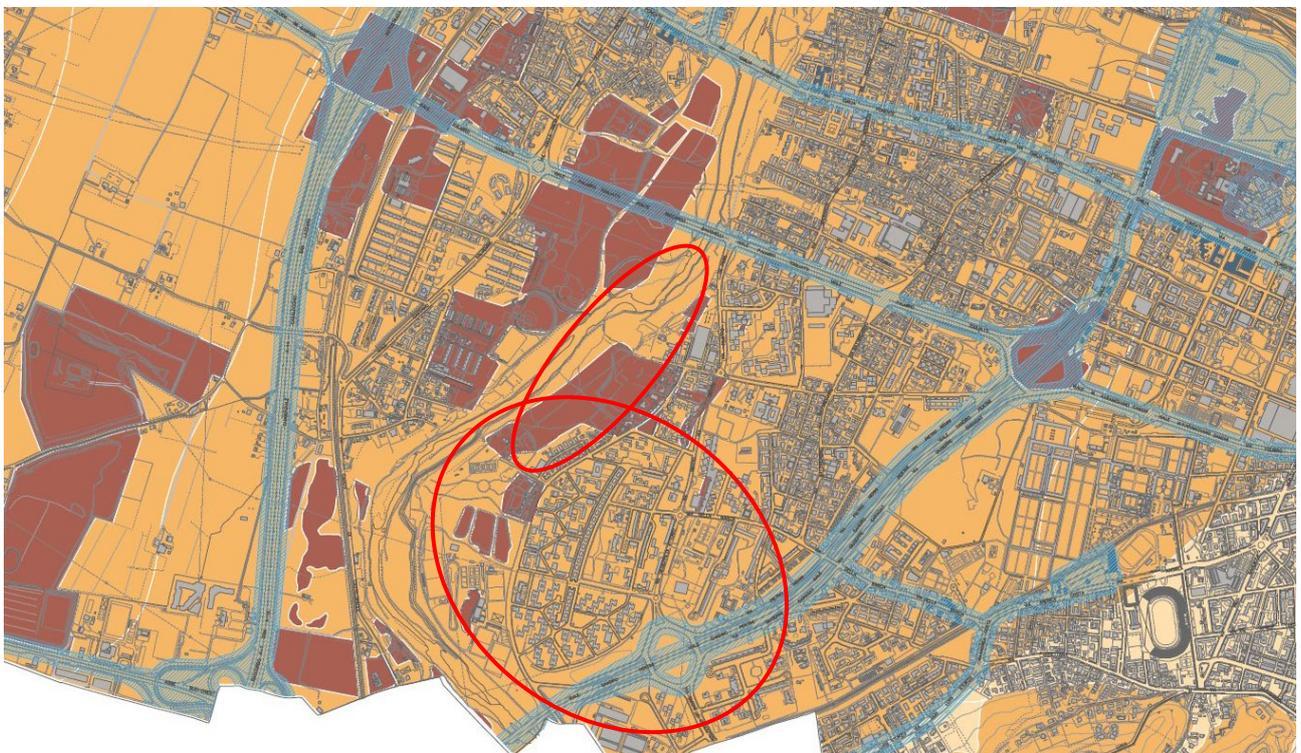


Figura 12: Stralcio Carta PUG Comune di Bologna.

Campitura: Zone stabili suscettibili di amplificazione 1B (1Ba – 1Bb – 1Bc)  
 Zone di attenzione per cedimenti differenziali 2C

## 4 MODELLO GEOLOGICO TRATTO DI BOLOGNA

### 4.1 QUADRO ED UBICAZIONE INDAGINE

- Data esecuzione campagna indagini: 20-25/06/2024.
- Tipologia indagini:
  - 2 sondaggi a carotaggio continuo (allegato A)
  - 8 prove penetrometriche dinamiche medie (DPM) (Allegato A)

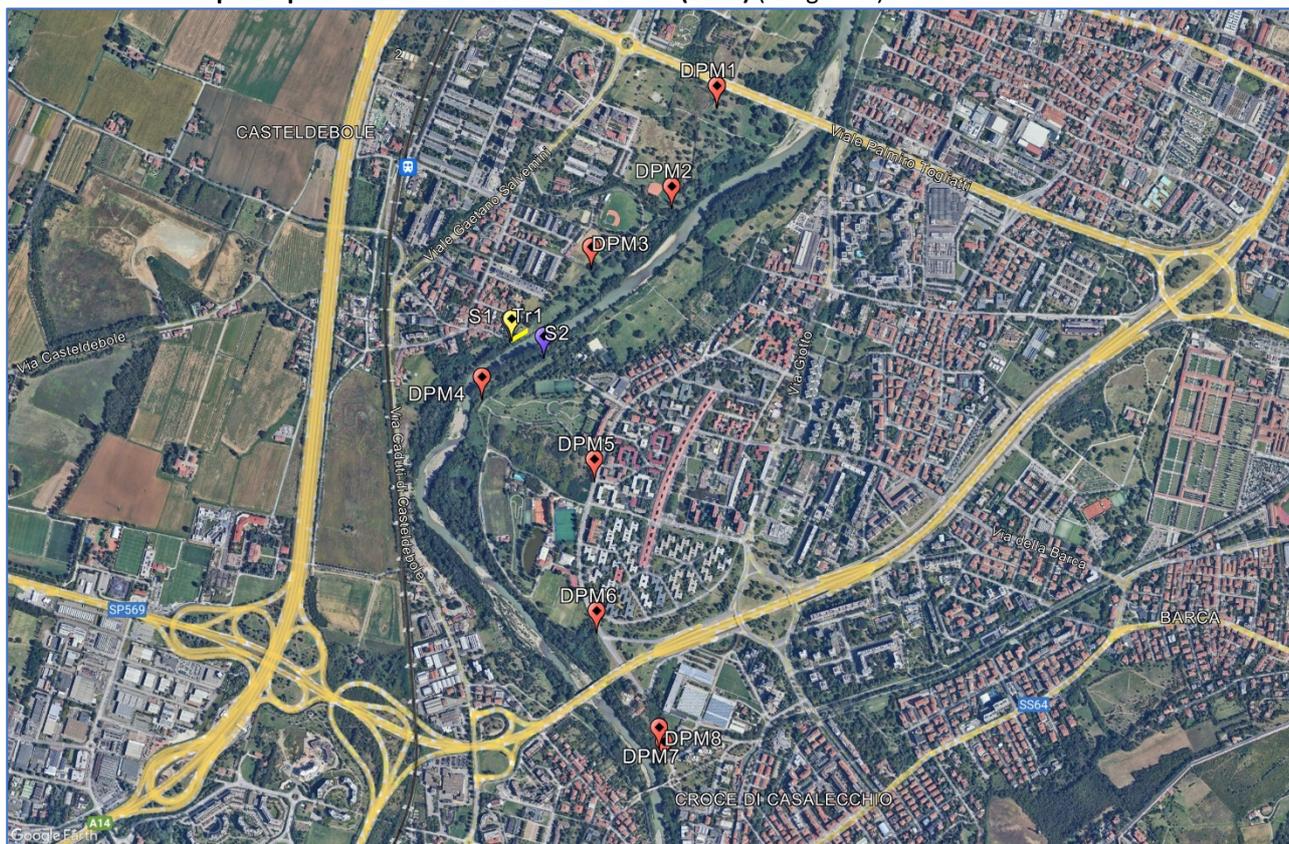


Figura 13: Ubicazione indagini geognostiche.



Figura 14: a sinistra posizionamento della prova S1 a sinistra e S2 a destra.



Figura 15: a sinistra posizionamento della prova DPM1 a sinistra e DPM2 a destra.



Figura 16: a sinistra posizionamento della prova DPM3 a sinistra e DPM4 a destra.



Figura 17: a sinistra posizionamento della prova DPM5 a sinistra e DPM6 a destra.



Figura 18: a sinistra posizionamento della prova DPM7 a sinistra e DPM8 a destra.

### 4.2 RISULTATO DELLE ANALISI

Di seguito si presentano i risultati ottenuti dalla campagna indagini, che hanno contribuito a costituire il modello geologico del sito in esame.

#### 4.2.1 SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Di seguito si riporta la successione stratigrafica come risultata dai sondaggi a carotaggio continuo realizzati nell'area.

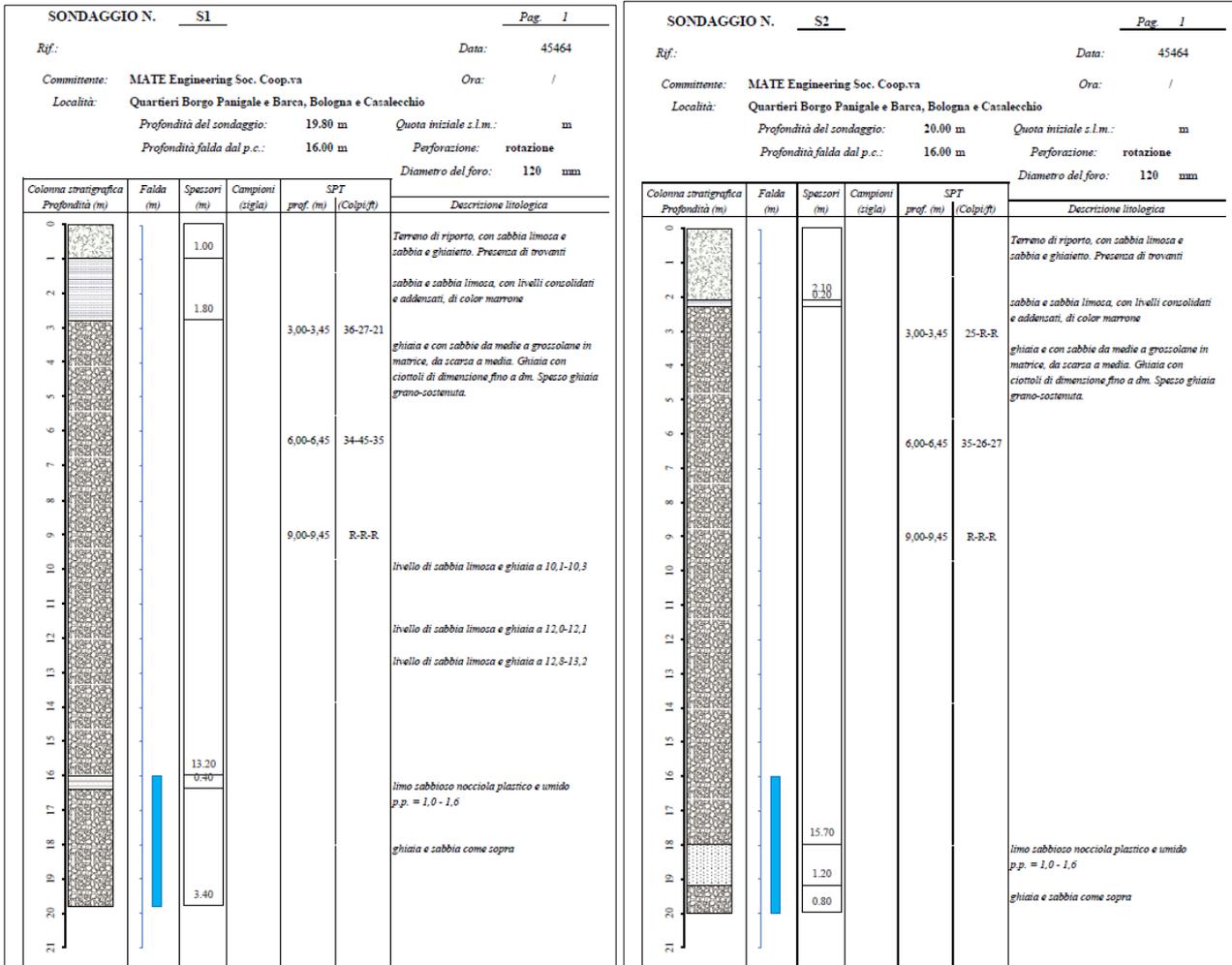


Figura 19: Report sondaggi a carotaggio continuo.

Commento: dalle prove realizzate circa in corrispondenza delle due spalle del ponte sul fiume Reno, si individuano materiali di riporto o rielaborati fino alla profondità di -2,8 m, composti da limi sabbiosi con inclusi di varia natura e pezzature. Oltre si individua una successione continua di ghiaie e sabbie di pezzatura da centimetrica a decimetrica. Sono presenti solo alcuni livelli di sabbie limose o limi sabbiosi, ma è possibile ipotizzare che si tratti di lenti limitate oltre che nello spessore (poche decine di centimetri) anche nella dimensione spaziale.

La falda è stata misurata nei fori di prova ad una profondità di circa 16 m.

4.2.2 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE MEDIE DPM

Di seguito si riporta la suddivisione litostratigrafica ottenuta a partire dai risultati delle indagini.

PROVA DPM1			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.4	180.46-388.69
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	0.4 – 0.6	235.99-649.09
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM2			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.5	27.76-310.03
B	Limi sabbiosi e sabbie limose moderatamente compatte	0.5 – 1.9	47.94-156.90
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	1.9 – 2.2	164.76-617.85
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM3			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.5	60.15-83.29
B	Limi sabbiosi e sabbie limose moderatamente compatte	0.5 – 4.6	27.33-93.71
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	4.6 – 4.8	155.88-556.70
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM4			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.2	124.94-134.19
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	0.2 – 0.4	347.04-649.09
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM5			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.5	41.65-78.66
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	0.5 – 0.8	180.46-694.09
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

Tabella 2: successione litostratigrafica ricostruita dalle indagini realizzate nel sito.

PROVA DPM6			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.4	152.70-689.46
B	Limi sabbiosi e sabbie limose moderatamente compatte	0.4 – 2.7	30.51-100.24
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	2.7 – 2.9	308.92-617.85
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM7			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.6	69.41-347.04
B	Limi sabbiosi e sabbie limose moderatamente compatte	0.6 – 2.5	26.15-74.14
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	2.5 – 3.1	74.14-585.68
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

PROVA DPM8			
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	0.0 – 0.3	55.53-124.94
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	0.3 – 0.5	509.00-694.09
<b>Livello di falda</b>			<i>assente</i>

Tabella 3: successione litostratigrafica ricostruita dalle indagini realizzate nel sito.

### 4.3 MODELLO E PARAMETRI

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei principali parametri geotecnici delle unità litotecniche individuate. Essi derivano da correlazioni empiriche ormai consolidate presenti in letteratura, interpretati e ricondotti alle condizioni specifiche del sito. Ad ogni modo, rimane compito del progettista geotecnico verificarli ed eventualmente farli propri per le modellazioni geotecniche.

INDICAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO TRATTO DI BOLOGNA						
Unità litotec	Descrizione litologica	Comportamento geotecnico	$\gamma_n$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	Cu [KPa]	$\phi'$ [°]
A	Terreno di riporto, limoso sabbioso con inclusi eterogenei	Coesivo/incoerente	18,50	19,50	50 – 70	24 – 29
B	Limi sabbiosi e sabbie limose moderatamente compatte	Coesivo/incoerente	18,00	19,00	40 – 65	24 - 28
C	Sabbia e ghiaia ben addensate	Incoerente	18,50	20,00	-	36 – 41

Tabella 4: modello geologico e litostratigrafico del sito.

- Parametri indicativi ricavati da correlazioni empiriche.

- **La definizione dei parametri caratteristici è a carico del progettista geotecnico.**
- $\gamma_n$  = peso di volume del terreno naturale [t/m<sup>3</sup>];
- $\gamma_{sat}$  = peso di volume del terreno saturo [t/m<sup>3</sup>];
- **Cu** = coesione non drenata [kPa];
- $\phi'$  = angolo d'attrito interno [°].

## 5 MODELLO GEOLOGICO TRATTO DI GRIZZANA MORANDI

### 5.1 QUADRO ED UBICAZIONE INDAGINE

- Data esecuzione campagna indagini: 31/12/2010.
- Tipologia indagini:
  - **5 Prove penetrometriche dinamiche super-pesanti DPSH**
  - **1 misura del rumore sismico con tecnica HVSR**

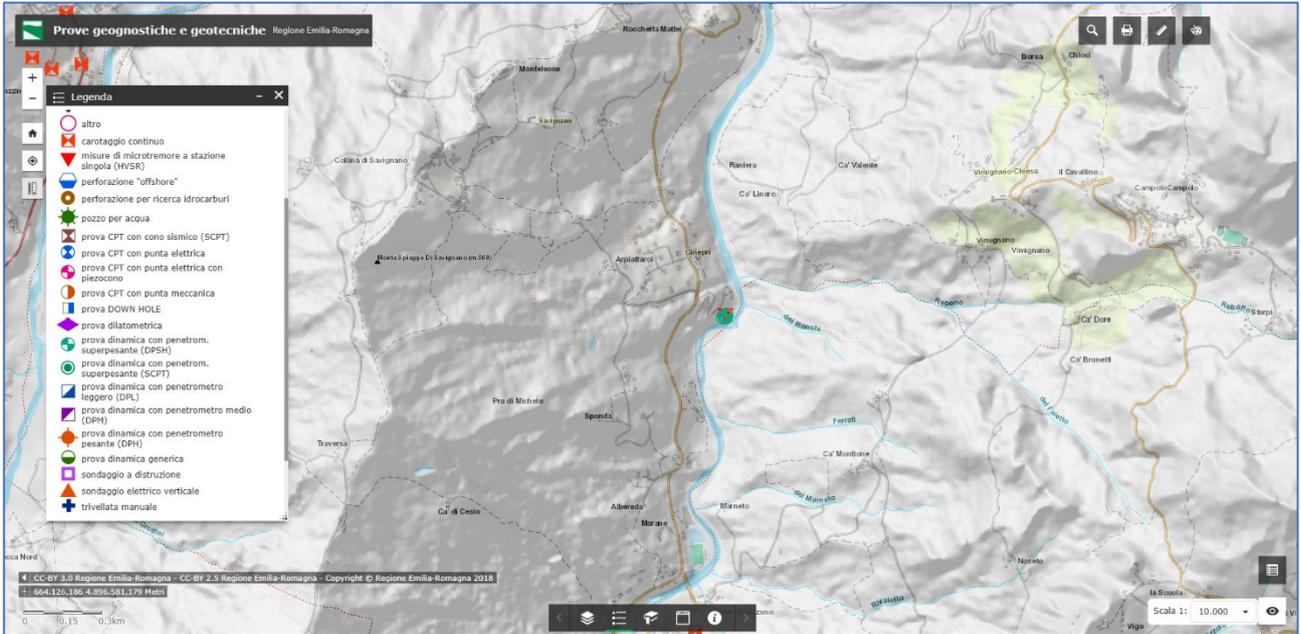


Figura 20: Ubicazione indagini geognostiche.

### 5.2 RISULTATO DELLE ANALISI

Di seguito si presentano i risultati ottenuti dalla campagna indagini, che hanno contribuito a costituire il modello geologico del sito in esame.

#### 5.2.1 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE SUPER-PESANTI DPSH

Di seguito si riporta la suddivisione litostratigrafica ottenuta a partire dai risultati delle indagini.

COMMITTENTE: E-Vento Acqua Srl  
 CANTIERE: Centrale Idroelettrica  
 LOCALITA': Molino Rizzoni - Grizzana Morandi

DITTA ESECUTRICE:  
 DIREZIONE CANTIERE: Geol. Simone Carosi  
 DATA:03/12/10

COMMITTENTE: E-Vento Acqua Srl  
 CANTIERE: Centrale Idroelettrica  
 LOCALITA': Molino Rizzoni - Grizzana Morandi

DITTA ESECUTRICE:  
 DIREZIONE CANTIERE: Geol. Simone Carosi  
 DATA:03/12/10

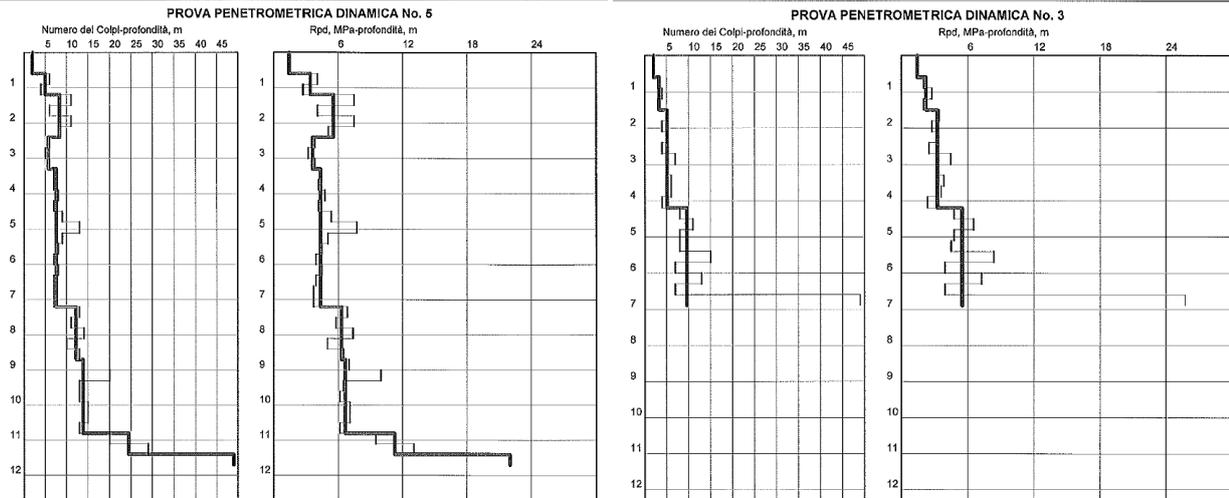


Figura 21: report delle indagini più significative presenti nel database regionale

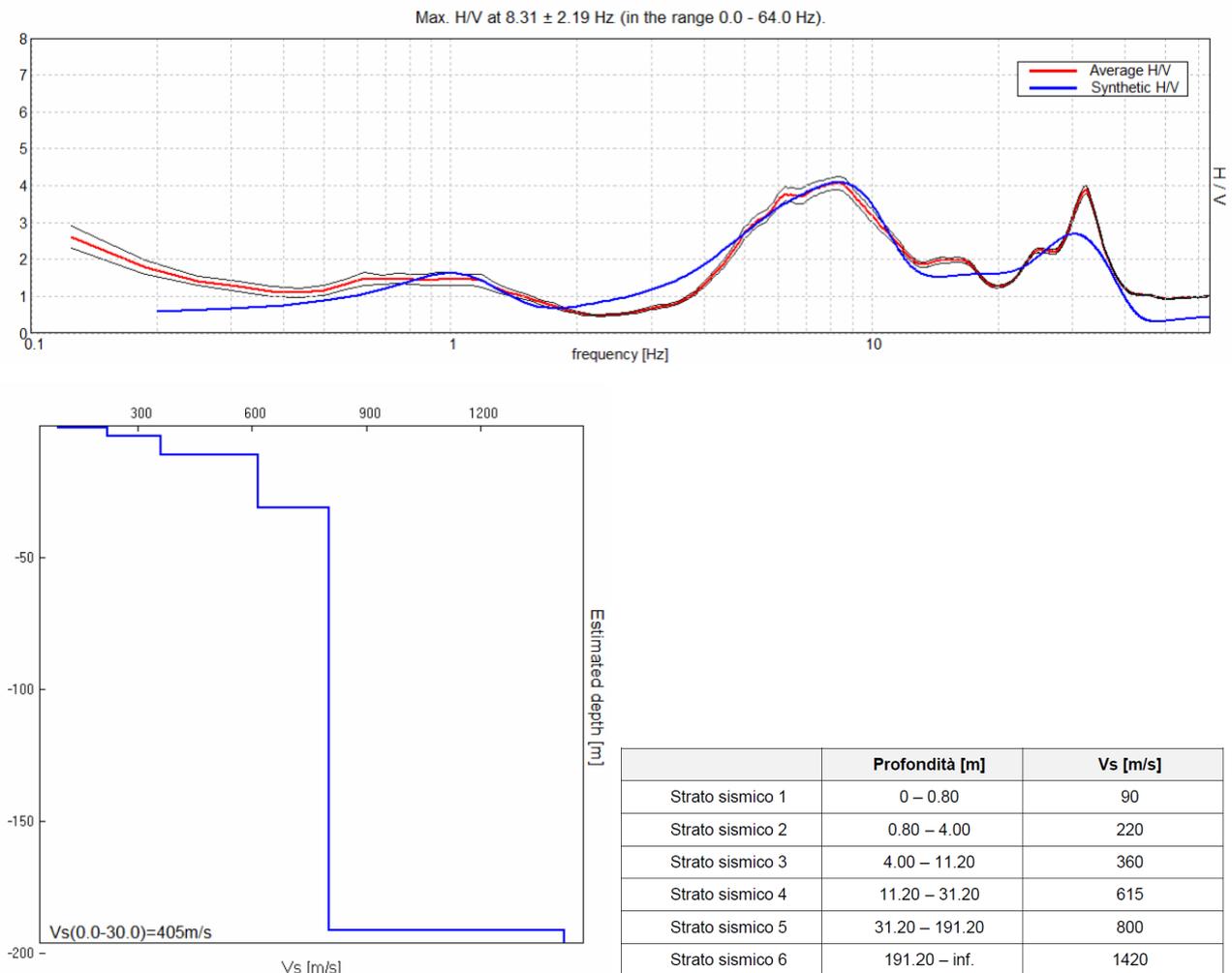


Figura 22: report indagini sismica HVSR e successione sismostratigrafica

Commento: dall'analisi delle indagini a disposizione presenti nel database e di altre a disposizione dello scrivente emerge come l'area di versante presenta una copertura di limi argillosi di caratteristiche geotecniche da modeste a medie con inclusi lapidei derivanti dallo smantellamento della formazione locale (APA). I blocchi possono essere di dimensioni da decimetriche a metriche e spesso inducono a rifiuto le prove penetrometriche. Lungo l'asse stradale sono

presenti situazioni geomorfologiche anche molto diverse tra loro, con aree soggette a frana, aree stabili, aree di possibile terrazzo fluviale. Alla luce delle opere in progetto è possibile ad ogni modo considerare una stratigrafia semplificata come quella descritta di seguito.

### 5.3 MODELLO E PARAMETRI

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei principali parametri geotecnici delle unità litotecniche individuate. Essi derivano da correlazioni empiriche ormai consolidate presenti in letteratura, interpretati e ricondotti alle condizioni specifiche del sito. Ad ogni modo, rimane compito del progettista geotecnico verificarli ed eventualmente farli propri per le modellazioni geotecniche.

INDICAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO TRATTO DI GRIZZANA MORANDI							
Unità litotec	Descrizione litologica	Spessore [m]	Comportamento geotecnico	$\gamma_n$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	Cu [KPa]	$\phi'$ [°]
A	Terreno di riporto o rimaneggiato	1-2	Coesivo/incoerente	18,50	19,50	40 – 80	24 – 29
B	Limi argillosi e argille limose con inclusi eterogenei moderatamente compatte	4-10	Coesivo	18,00	19,00	40 – 65	24 - 27
C	Substrato locale	-	Lapideo	18,50	20,00	150 – 250	24 – 26

Tabella 5: modello geologico e litostratigrafico del sito.

- Parametri indicativi ricavati da correlazioni empiriche.
- **La definizione dei parametri caratteristici è a carico del progettista geotecnico.**
- $\gamma_n$ = peso di volume del terreno naturale [t/m<sup>3</sup>];
- $\gamma_{sat}$ = peso di volume del terreno saturo [t/m<sup>3</sup>];
- Cu = coesione non drenata [KPa];
- $\phi'$  = angolo d'attrito interno [°].

## 6 MODELLO SISMICO TRATTO A BOLOGNA

### 6.1 INDAGINI SISMICHE

- Data esecuzione campagna indagini: 12/07/2024.
- Tipologia indagini:
  - 1 misura di sismica passiva con stendimento, con tecnica **Re.Mi.** (Allegato C).
  - 1 misura di sismica passiva a stazione singola, con tecnica **HVSR.** (Allegato C).

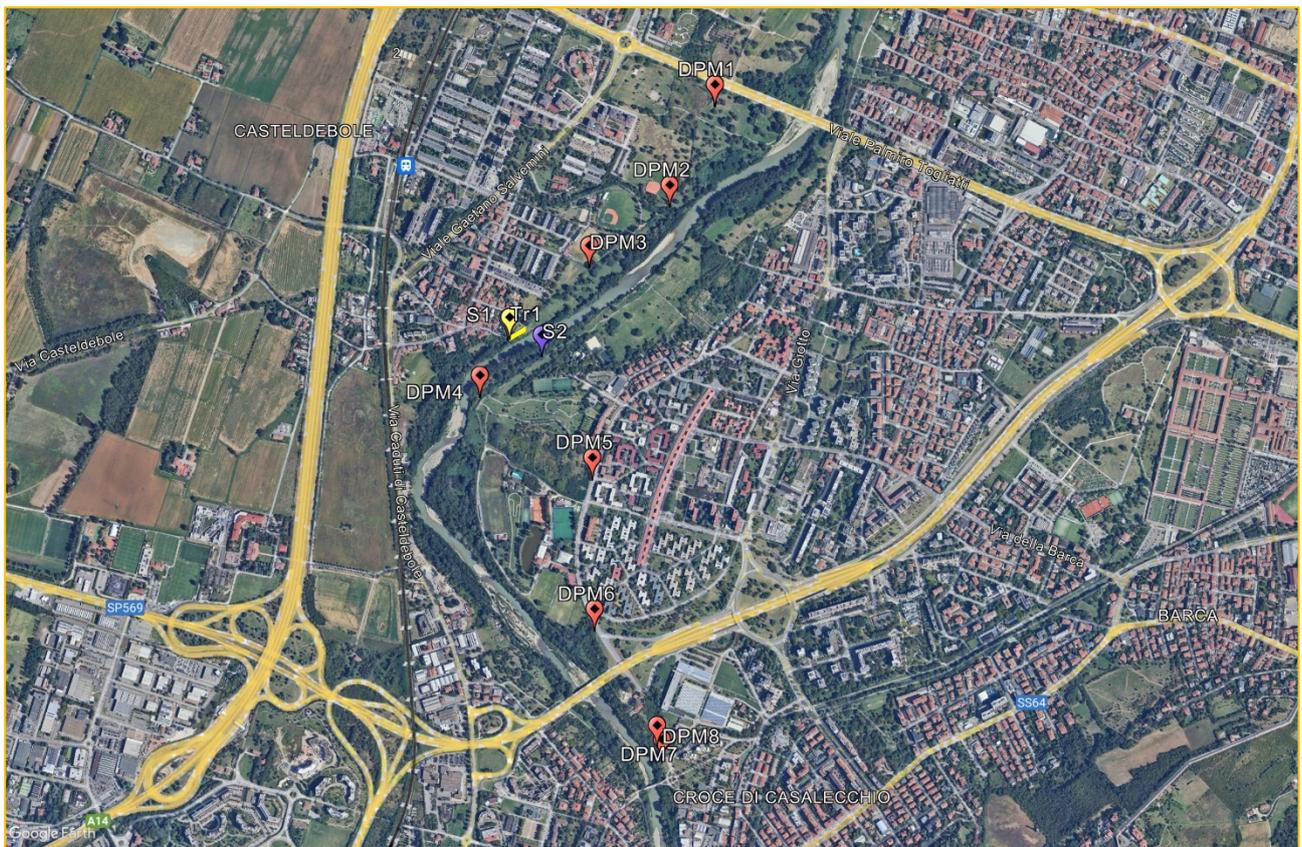


Figura 23: Ubicazione indagini geognostiche.

6.1.1 INTERPRETAZIONE SISMO-STRATIGRAFICA

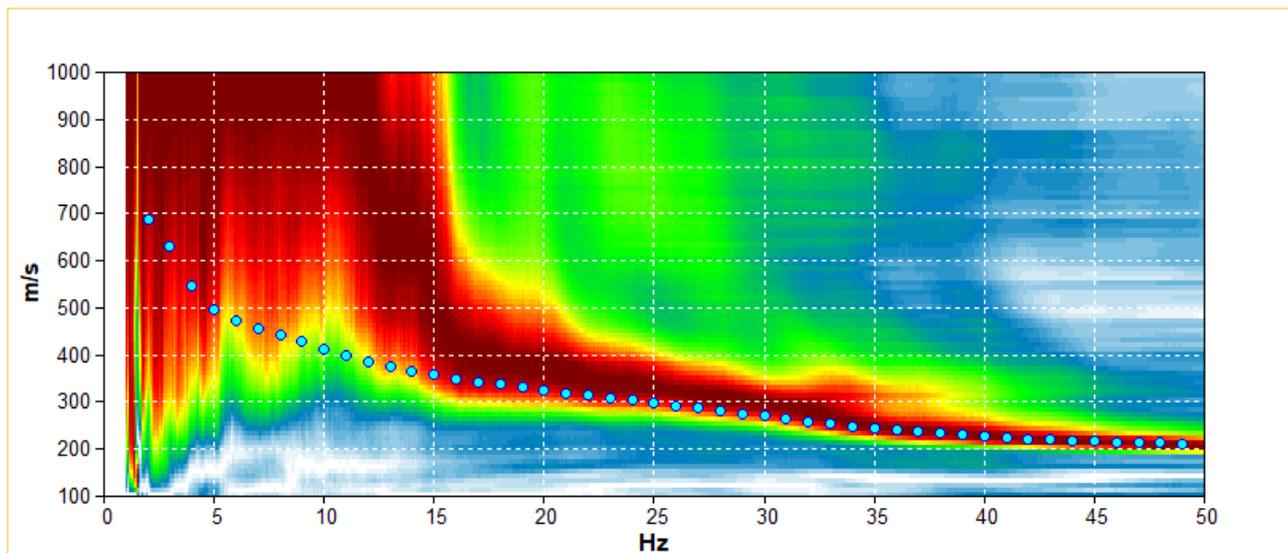


Figura 24: curva di dispersione con interpretazione.

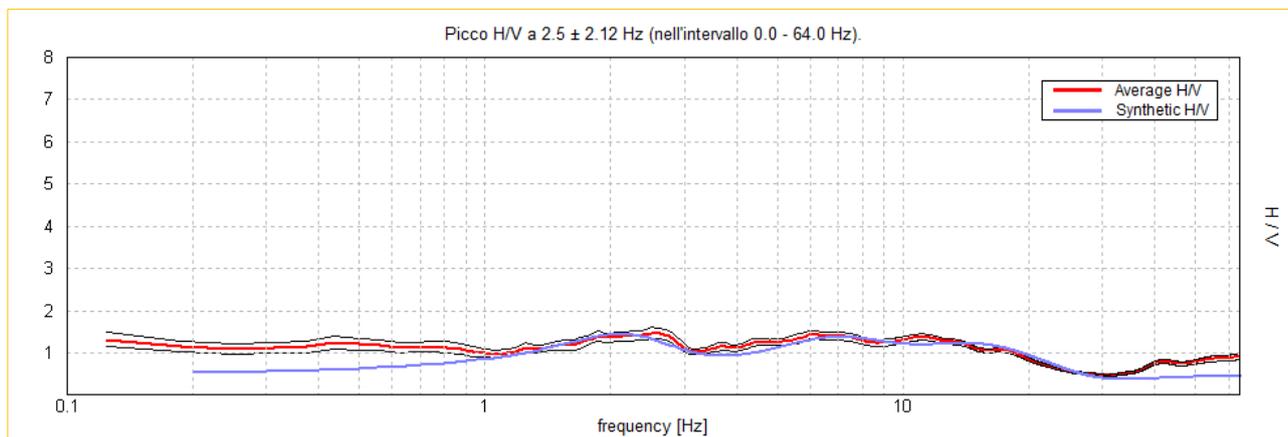


Figura 25: Grafico della curva H/V della misura HVSR.

Sismostrato	Profondità dello strato [m]	Spessore dello strato [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1	2.80	2.80	210	0.46
2	7.80	5.00	340	0.40
3	17.80	10.00	420	0.39
4	62.80	45.00	540	0.34
5	inf.	inf.	820	0.31

Tabella 6: Profilo sismostratigrafico del modello sismico.

6.2 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)

- Sulla base degli assetti descritti e delle pendenze, la classe a cui ascrivere il sito in esame risulta essere: **T1**.
- **“T1 – Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media ≤ 15°”**.
- Valore massimo del coefficiente di amplificazione stratigrafica **St = 1,0**.

### 6.3 VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

- Condizioni predisponenti si riferiscono alle resistenze disponibili nel terreno e sono:
  - Profondità media stagionale del livello di falda < 5 m ✗
  - Profondità dello strato liquefacibile < 15 m ✗
  - Densità relativa dello strato  $D_r < 60\%$  ✗
  - Diametro medio dei granuli  $0,02\text{ mm} < D_{50} < 2,00\text{ mm}$  ✗
  - Frazione dei fini ( $< 0,005\text{ mm}$ ) < 15 % ✗

Le condizioni scatenanti influiscono sulle pressioni interstiziali e sono:

- Magnitudo > 5,5 ✓
- PGA > 0,15 g ✓
- Durata della sollecitazione > 15-20 s ✓

Viste le condizioni rilevate sul posto in cui è stata confermata la bassissima incidenza di termini granulari, vengono a mancare le condizioni predisponenti per il fenomeno della liquefazione.

### 6.4 RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)

- Substrato sismico entro i 30 m dal p.c.: no.
- $V_s$  media nei primi 30 m:  $V_{s_{eq(0-30)}} = 403\text{ m/s}$ , rientra nella categoria di suolo di fondazione “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.”

### 6.5 DEFINIZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA

- L’elaborazione dei parametri di input, permette la restituzione dello spettro di risposta orizzontale del sito all’interno del foglio di calcolo “Spettri di Risposta v.1.0.3”, redatto a cura del C.S.LL.PP.

PARAMETRO	VALORE
Vita nominale della costruzione - $V_N$	50 [ANNI]
Coefficiente d’uso della costruzione - $c_u$	1,5
Periodo di ritorno per la definizione dell’azione sismica - $T_R$	SLU/SLV – $P_{VR} = 10\% \Rightarrow 475$ [ANNI]
Categoria di sottosuolo	B
Categoria topografica	T1

Tabella 7: parametri di input per la definizione dello spettro di risposta.

PARAMETRI INDIPENDENTI							
Stato limite	$a_g$ [g]	$F_0$	$T_c$ [s]	$S_s$	$C_c$	$S_T$	$q$
SLV	0.188	2.415	0.313	1.200	1.388	1.000	1.000
PARAMETRI DIPENDENTI							
S	$\eta$	$T_B$ [s]	$T_c$ [s]	$T_D$ [s]			
1.200	1.000	0.145	0.434	2.351			

Tabella 8: Parametri sismici di riferimento per la progettazione dell’opera.

PUNTI DELLO SPETTRO DI RISPOSTA					
T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]
0.000	0.225	1.621	0.146	2.900	0.066
0.145	0.544	1.712	0.138	2.979	0.063
0.434	0.544	1.803	0.131	3.057	0.059
0.526	0.449	1.894	0.125	3.136	0.056
0.617	0.383	1.986	0.119	3.215	0.054
0.708	0.334	2.077	0.114	3.293	0.051
0.799	0.296	2.168	0.109	3.372	0.049
0.891	0.265	2.259	0.105	3.450	0.047
0.982	0.241	2.351	0.101	3.529	0.045
1.073	0.220	2.429	0.094	3.607	0.043
1.164	0.203	2.508	0.088	3.686	0.041
1.256	0.188	2.586	0.083	3.764	0.039
1.347	0.175	2.665	0.078	3.843	0.038
1.438	0.164	2.743	0.074	3.921	0.038
1.529	0.154	2.822	0.070	4.000	0.038

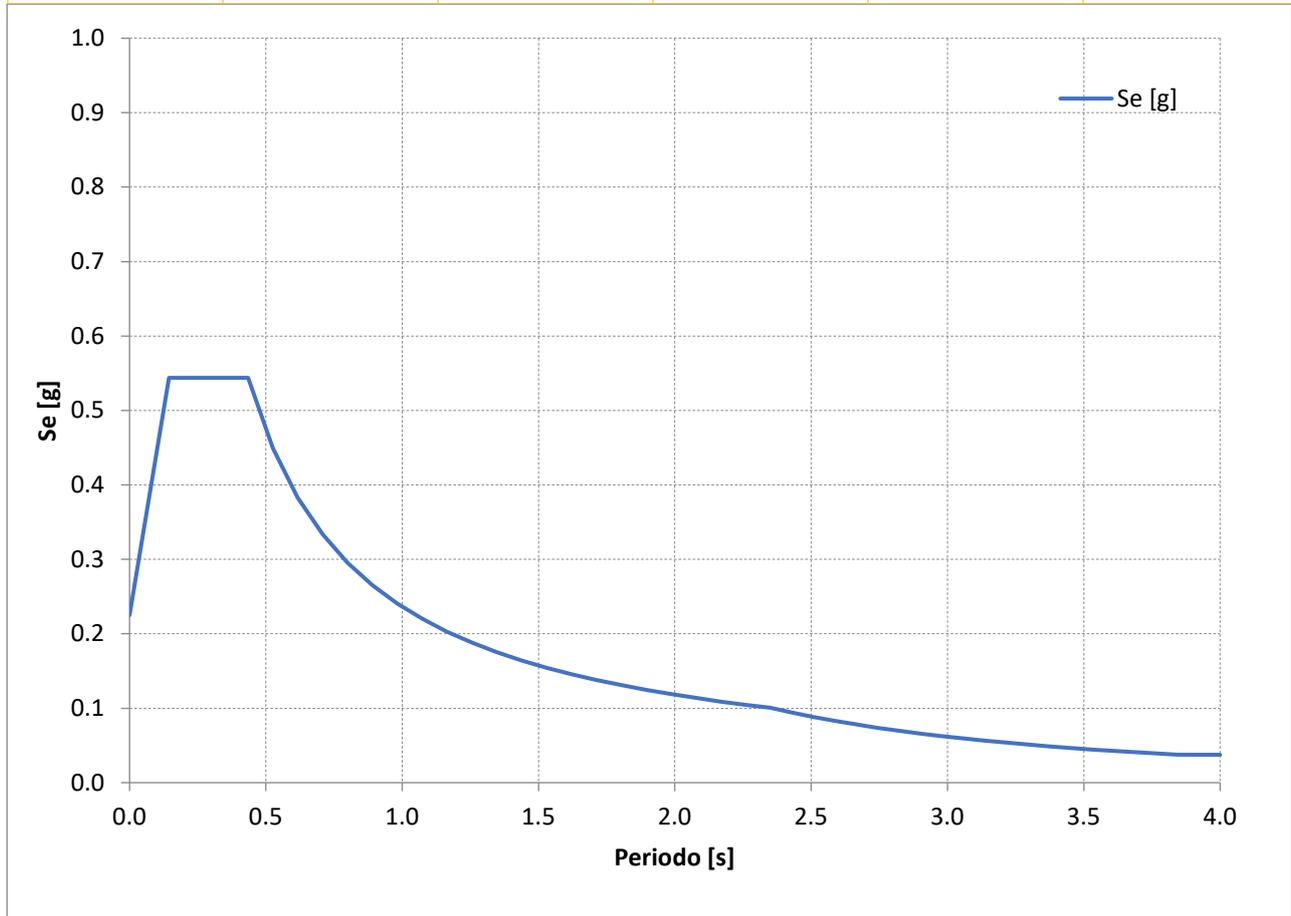


Figura 26: Grafico e tabella dei punti dello spettro di risposta calcolato da approccio semplificato.

## 7 MODELLO SISMICO TRATTO A GRIZZANA MORANDI



### 7.1 INDAGINI SISMICHE

- Data esecuzione campagna indagini: 03/12/2010.
- Tipologia indagini:
  - 1 misura di sismica passiva a stazione singola, con tecnica **HVSR**. (Allegato C).

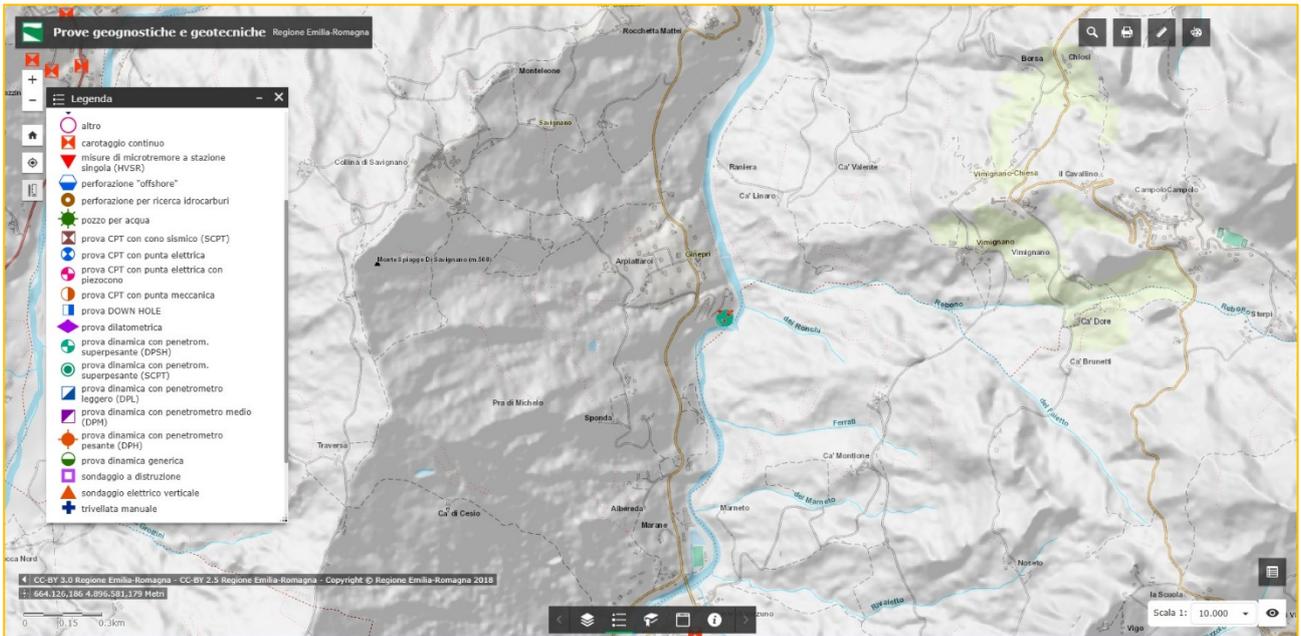
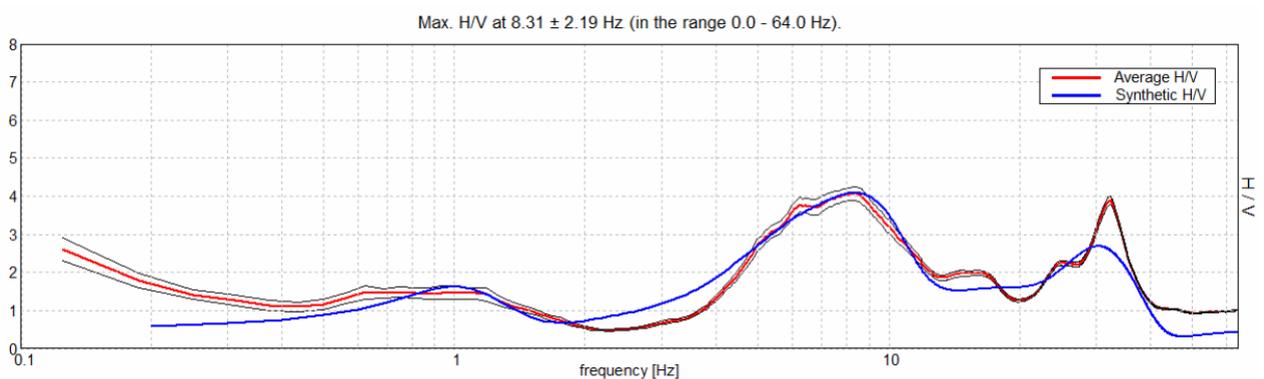
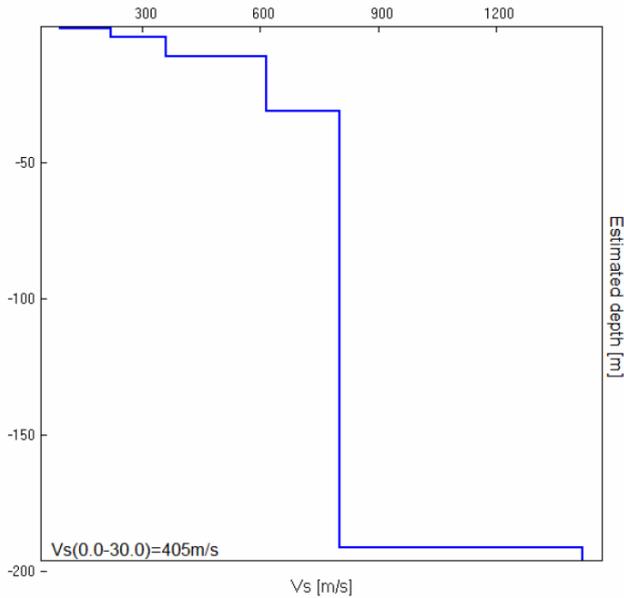


Figura 27: Ubicazione indagini geognostiche.

#### 7.1.1 INTERPRETAZIONE SISMO-STRATIGRAFICA





	Profondità [m]	Vs [m/s]
Strato sismico 1	0 – 0.80	90
Strato sismico 2	0.80 – 4.00	220
Strato sismico 3	4.00 – 11.20	360
Strato sismico 4	11.20 – 31.20	615
Strato sismico 5	31.20 – 191.20	800
Strato sismico 6	191.20 – inf.	1420

Figura 28: interpretazione sismostratigrafica

## 7.2 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)

- Sulla base degli assetti descritti e delle pendenze, la classe a cui ascrivere il sito in esame risulta essere: **T1**.
- **“T2 – Pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$ ”.**
- Valore massimo del coefficiente di amplificazione stratigrafica **St = 1,2**.

## 7.3 VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

- Condizioni predisponenti si riferiscono alle resistenze disponibili nel terreno e sono:
  - Profondità media stagionale del livello di falda < 5 m **✗**
  - Profondità dello strato liquefacibile < 15 m **✗**
  - Densità relativa dello strato  $D_r < 60\%$  **✗**
  - Diametro medio dei granuli  $0,02\text{ mm} < D_{50} < 2,00\text{ mm}$  **✗**
  - Frazione dei fini ( $< 0,005\text{ mm}$ ) < 15 % **✗**

Le condizioni scatenanti influiscono sulle pressioni interstiziali e sono:

- Magnitudo > 5,5 **✓**
- PGA > 0,15 g **✓**
- Durata della sollecitazione > 15-20 s **✓**

Viste le condizioni rilevate sul posto in cui è stata confermata la bassissima incidenza di termini granulari, vengono a mancare le condizioni predisponenti per il fenomeno della liquefazione.

## 7.4 RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)

- Substrato sismico entro i 30 m dal p.c.: no.

- Vs media nei primi 30 m:  $V_{seq(0-30)} = 405 \text{ m/s}$ , rientra nella categoria di suolo di fondazione “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 DEFINIZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA

- L’elaborazione dei parametri di input, permette la restituzione dello spettro di risposta orizzontale del sito all’interno del foglio di calcolo “Spettri di Risposta v.1.0.3”, redatto a cura del C.S.LL.PP.

PARAMETRO	VALORE
Vita nominale della costruzione - $V_N$	<b>50</b> [ANNI]
Coefficiente d’uso della costruzione - $c_U$	<b>1,5</b>
Periodo di ritorno per la definizione dell’azione sismica - $T_R$	<b>SLU/SLV – <math>P_{VR} = 10\% \Rightarrow 475</math></b> [ANNI]
Categoria di sottosuolo	<b>B</b>
Categoria topografica	<b>T2</b>

Tabella 9: parametri di input per la definizione dello spettro di risposta.

PARAMETRI INDIPENDENTI							
Stato limite	$a_g$ [g]	$F_0$	$T_c$ [s]	$S_s$	$C_c$	$S_T$	$q$
SLV	0.191	2.536	0.302	1.200	1.398	1.200	1.000

PARAMETRI DIPENDENTI				
S	$\eta$	$T_B$ [s]	$T_c$ [s]	$T_D$ [s]
1.440	1.000	<b>0.141</b>	<b>0.422</b>	<b>2.365</b>

Tabella 10: Parametri sismici di riferimento per la progettazione dell’opera.

PUNTI DELLO SPETTRO DI RISPOSTA					
T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]
<b>0.000</b>	0.276	1.625	0.181	2.910	0.082
<b>0.141</b>	<b>0.699</b>	1.717	0.172	2.988	0.078
<b>0.422</b>	<b>0.699</b>	1.810	0.163	3.066	0.074
<b>0.514</b>	0.573	1.903	0.155	3.144	0.071
<b>0.607</b>	0.486	1.995	0.148	3.222	0.067
<b>0.699</b>	0.421	2.088	0.141	3.299	0.064
<b>0.792</b>	0.372	2.180	0.135	3.377	0.061
<b>0.884</b>	0.333	2.273	0.130	3.455	0.058
<b>0.977</b>	0.302	<b>2.365</b>	<b>0.125</b>	3.533	0.056
<b>1.070</b>	0.276	2.443	0.117	3.611	0.053
<b>1.162</b>	0.254	2.521	0.110	3.689	0.051
<b>1.255</b>	0.235	2.599	0.103	3.766	0.049
<b>1.347</b>	0.219	2.677	0.097	3.844	0.047
<b>1.440</b>	0.205	2.755	0.092	3.922	0.045
<b>1.532</b>	0.192	2.832	0.087	4.000	0.044

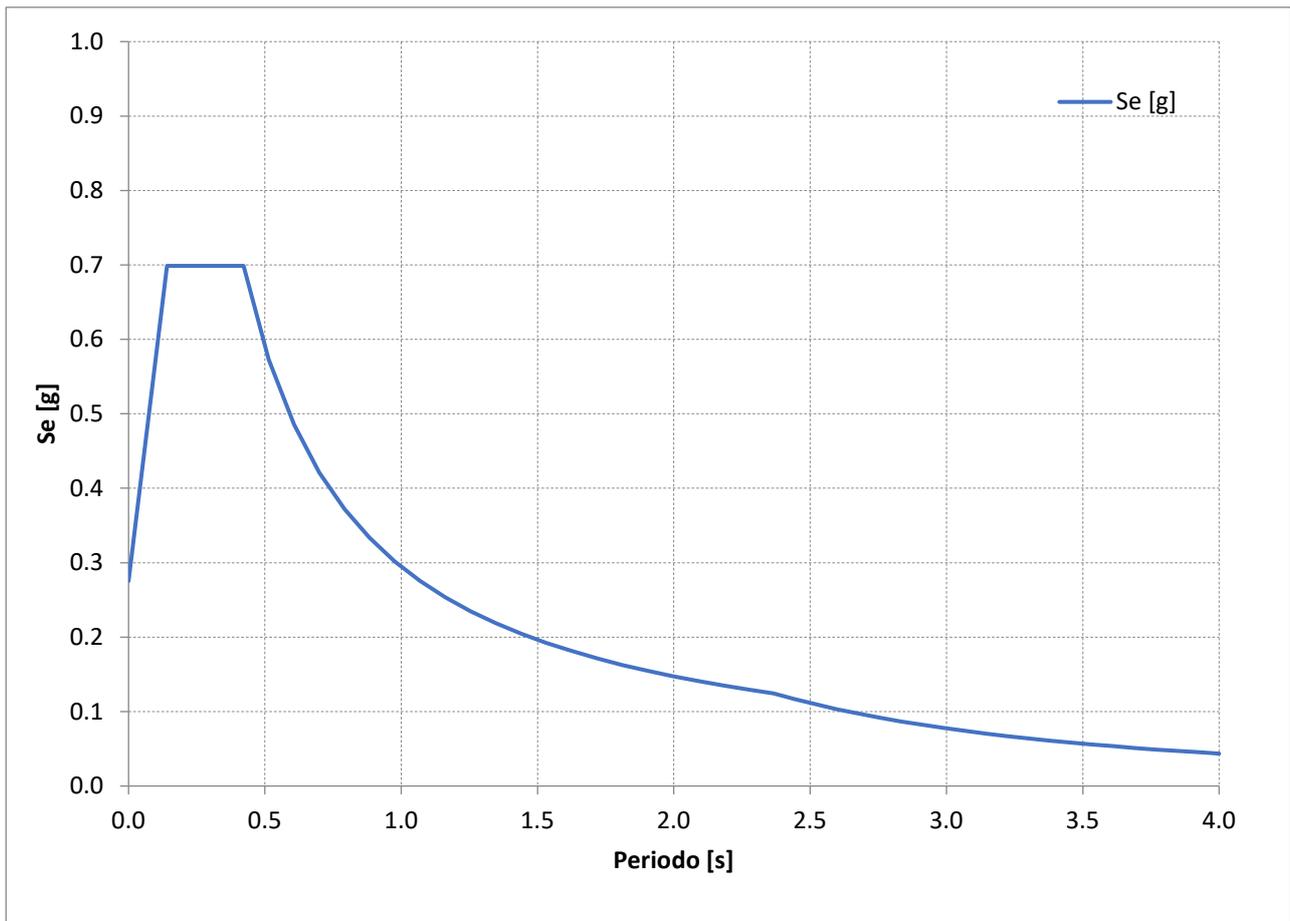


Figura 29: Grafico e tabella dei punti dello spettro di risposta calcolato da approccio semplificato.

## 8 CONCLUSIONI

- **Progetto:** si tratta del completamento della Ciclovía del Sole nel tratto bolognese (tronco 3, 4 e 7). In prevalenza sono pere di riasfaltatura o rifacimento segnaletica. Alcuni tratti sono completamente da realizzare. In particolare l'opera piú significativa è il ponte sul Fiume Reno nel comune di Bologna.
- **Geomorfologia e stabilità:**
  - Tratto di Bologna: terreno pianeggiante di contesto di pianura bolognese, secolarmente antropizzato, posto in corrispondenza della porzione centrale e distale del conoide del Fiume Reno. Una porzione importante del tratto sulla sponda sinistra in passato è stata interessata da cave, in parte tombate o ripristinate.
  - Tratto di Grizzana Morandi: terreno posto sulla porzione bassa di un versante con esposizione verso Est all'interno del bacino del Torrente Limentra. Il tracciato della ciclovía in progetto si sviluppa lungo la strada provinciale che scorre circa in quota attraversando contesti geomorfologici diversi: ci sono aree di versante stabile, aree soggette a frana attiva o quiescente e aree con substrato locale a modesta profondità.
- **Circolazione idrica superficiale e sotterranea:**
  - Tratto di Bologna: zona antropizzata. Circolazione superficiale condizionata dalla rete di canali a servizio dell'area urbana e dalla pendenza verso il corso d'acqua. Circolazione idrogeologica condizionata dalla presenza di ghiaia altamente permeabile a modesta profondità. Il flusso idrogeologico si sviluppa in profondità, in particolare all'interno di questi terreni. Il primo livello di falda è stato individuato a -16 m.
  - Tratto di Grizzana Morandi: il deflusso superficiale è condizionato dalla morfologia superficiale e dalle interferenze dovute alla strada e alle opere antropiche. Deflusso idrogeologico condizionato dalla stratigrafia. I terreni della coltre sono generalmente poco permeabili (limi e argille), ma la presenza di inclusi calcilutitici, talvolta concentrati in livelli, permette un deflusso concentrato. Il substrato determina una barriera di permeabilità significativa, tanto che il deflusso si sviluppa in particolare all'interfaccia tra i materiali della coltre e il substrato. Gli impluvi e i bacini minori presenti lungo il tratto di ciclovía determinano una concentrazione anche del deflusso idrogeologico. In piú parti sono presenti anche frane determinate dalla concentrazione di tale circolazione.
- **Modello geologico:**
  - Tratto di Bologna: oltrepassato un modesto spessore di terreni di riporto o rimaneggiati (2-4 m) costituiti da limi sabbiosi e sabbie limose, è presente una potente unità di ghiaie e sabbie, con spessore superiore a 20 m.
  - Tratto di Grizzana Morandi: il modello geologico è costituito da una unità di coltre di copertura (stabile o in frana) di consistenza da modesta a media, di natura limosa e argillosa con inclusi calcilutitici. Lo spessore di questa unità è variabile da 2 a 12 m. oltre è presente l'unità del substrato della formazione delle Argille a Palombini (argilliti con inclusi calcilutitici). Il modello geologico di questa area per quanto sia costituito da materiale e successioni molto simili, può subire significative variazioni negli spessori.
- **Modello sismico:**
  - Tratto di Bologna: le indagini sismiche hanno permesso di riconoscere un sito caratterizzato da modesti effetti di risonanza sismica. La classificazione sismica, come richiesto dalla normativa vigente, è stata fatta secondo un approccio semplificato, risultando una categoria di sottosuolo B e una categoria topografica T1.

- Tratto di Grizzana Morandi: le indagini sismiche hanno permesso di riconoscere un sito caratterizzato da modesti effetti di risonanza sismica. La classificazione sismica, come richiesto dalla normativa vigente, è stata fatta secondo un approccio semplificato, risultando una categoria di sottosuolo B e una categoria topografica T2.

Valsamoggia, 23 Luglio 2024

Revisione, 18 Novembre 2024



Dott. Geol. Alberto Caprara

# ALLEGATO A

## REPORT DI PROVA SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Rif.:

Data: 45464

Committente: MATE Engineering Soc. Coop.va

Ora: /

Località: Quartieri Borgo Panigale e Barca, Bologna e Casalecchio

Profondità del sondaggio: 19.80 m

Quota iniziale s.l.m.: m

Profondità falda dal p.c.: 16.00 m

Perforazione: rotazione

Diametro del foro: 120 mm

Colonna stratigrafica Profondità (m)	Falda (m)	Spessori (m)	Campioni (sigla)	SPT		Descrizione litologica
				prof. (m)	(Colpi/ft)	
0		1.00				Terreno di riporto, con sabbia limosa e sabbia e ghiaietto. Presenza di trovanti
1						sabbia e sabbia limosa, con livelli consolidati e addensati, di color marrone
2		1.80				
3				3,00-3,45	36-27-21	ghiaia e con sabbie da medie a grossolane in matrice, da scarsa a media. Ghiaia con ciottoli di dimensione fino a dm. Spesso ghiaia grano-sostenuta.
4						
5						
6				6,00-6,45	34-45-35	
7						
8						
9				9,00-9,45	R-R-R	
10						livello di sabbia limosa e ghiaia a 10,1-10,3
11						
12						livello di sabbia limosa e ghiaia a 12,0-12,1
13						livello di sabbia limosa e ghiaia a 12,8-13,2
14						
15						
16		13.20 0.40				limo sabbioso nocciola plastico e umido p.p. = 1,0 - 1,6
17						
18						ghiaia e sabbia come sopra
19						
20		3.40				
21						

Sondaggio S1



Figura 1: foto cassetta catalogatrice da 0,0 m a -5,0 m



Figura 2: foto cassetta catalogatrice da -5,0 m a -10,0 m



Figura 3: foto cassetta catalogatrice da -10,0 m a -15,0 m



Figura 4: foto cassetta catalogatrice da -15,0 m a -20,0 m

Rif.:

Data: 45464

Committente: MATE Engineering Soc. Coop.va

Ora: /

Località: Quartieri Borgo Panigale e Barca, Bologna e Casalecchio

Profondità del sondaggio: 20.00 m

Quota iniziale s.l.m.: m

Profondità falda dal p.c.: 16.00 m

Perforazione: rotazione

Diametro del foro: 120 mm

Colonna stratigrafica Profondità (m)	Falda (m)	Spessori (m)	Campioni (sigla)	SPT prof. (m)	(Colpi/ft)	Descrizione litologica
0						Terreno di riporto, con sabbia limosa e sabbia e ghiaietto. Presenza di trovanti
1						
2		2.10 0.20				sabbia e sabbia limosa, con livelli consolidati e addensati, di color marrone
3				3,00-3,45	25-R-R	ghiaia e con sabbie da medie a grossolane in matrice, da scarsa a media. Ghiaia con ciottoli di dimensione fino a dm. Spesso ghiaia grano-sostenuta.
4						
5						
6				6,00-6,45	35-26-27	
7						
8						
9				9,00-9,45	R-R-R	
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18		15.70				limo sabbioso nocciola plastico e umido p.p. = 1,0 - 1,6
19		1.20				
20		0.80				ghiaia e sabbia come sopra
21						

Sondaggio S2



Figura 5: foto cassetta catalogatrice da 0,0 m a -5,0 m



Figura 6: foto cassetta catalogatrice da -5,0 m a -10,0 m



Figura 7: foto cassetta catalogatrice da -10,0 m a -15,0 m



Figura 8: foto cassetta catalogatrice da -15,0 m a -20,0 m

# ALLEGATO B

## METODO E REPORT DI PROVA PENETROMETRICA DINAMICA MEDIA (DPM)

Penetrometro utilizzato: "GeoTOOL"

## 1. PROVA PENETROMETRICA DINAMICA MEDIA

Le prove penetrometriche dinamiche medie consentono una definizione della successione stratigrafica anche nelle aree più impervie, che non è possibile raggiungere con altri mezzi. Nonostante i dati possano risultare grossolani e imprecisi, da tali indagini è comunque possibile ricostruire una successione stratigrafica con modelli semplici e collaudati.

### 1.1. METODOLOGIA DI INDAGINE

---

La prova penetrometrica dinamica media (DPM) consiste nel registrare il numero dei colpi di una massa battente di 30 Kg con volata di 20 cm, che consente l'avanzamento di 10 cm di una punta conica di 10 cm<sup>2</sup> di superficie.

Da ciò è possibile ottenere il valore di resistenza dinamica alla punta "rpd", ricavato secondo "la formula degli olandesi":

$$Rpd = M^2 * h/A * e * (M + P) \text{ [kPa]}$$

Dove:

M = peso massa battente (30 kg);

h = altezza di caduta(20 cm);

e = infissione media per colpo ( $\delta/n$ );

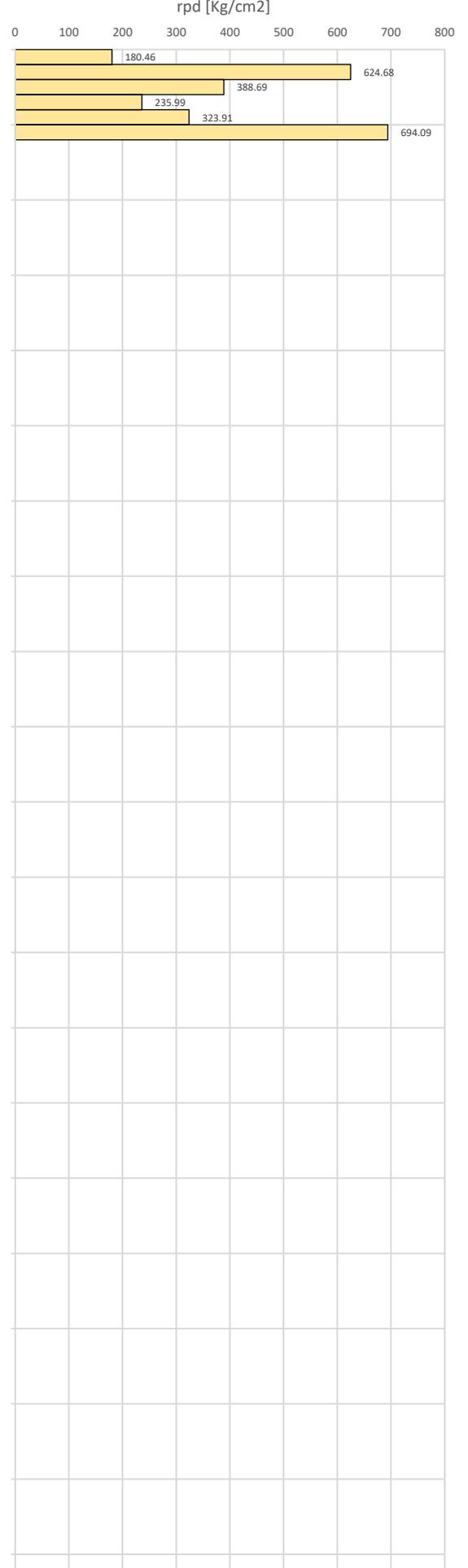
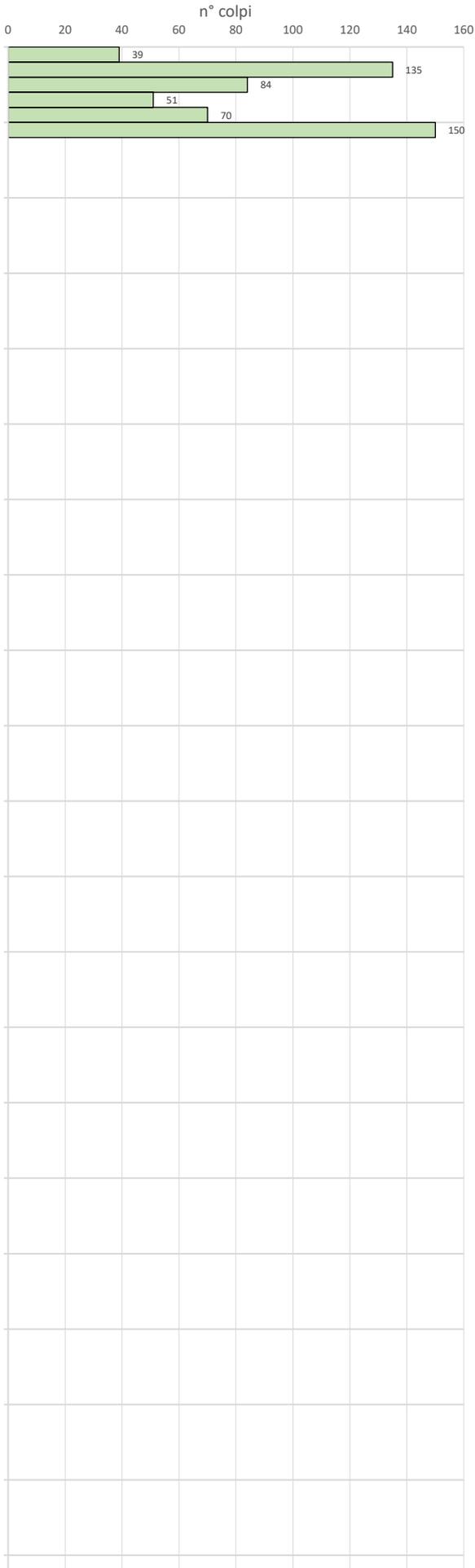
P = peso totale aste (2.0 kg/m) e sistema battuta (6.5 kg);

A = area della punta (10 cm<sup>2</sup>).

Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>25/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM1</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**  
Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	39	180.46
0.2	135	624.68
0.3	84	388.69
0.4	51	235.99
0.5	70	323.91
0.6	150	694.09
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		

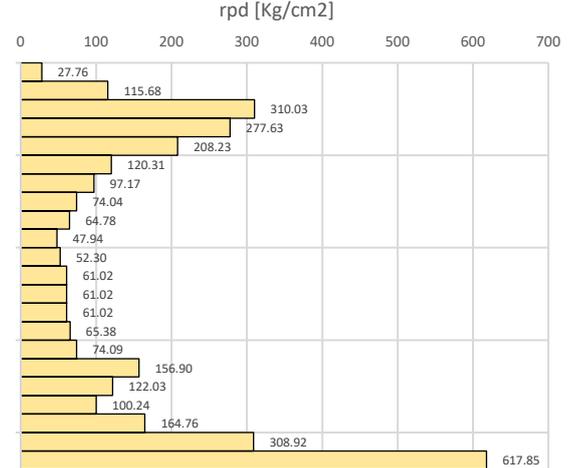
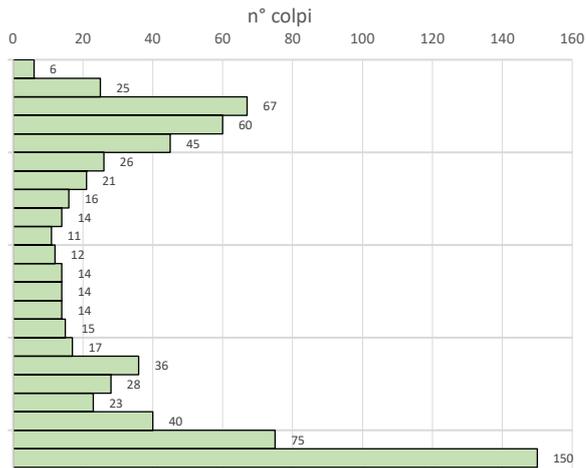


Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>25/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM2</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

# GEOLOGO

Dott. Alberto Caprara

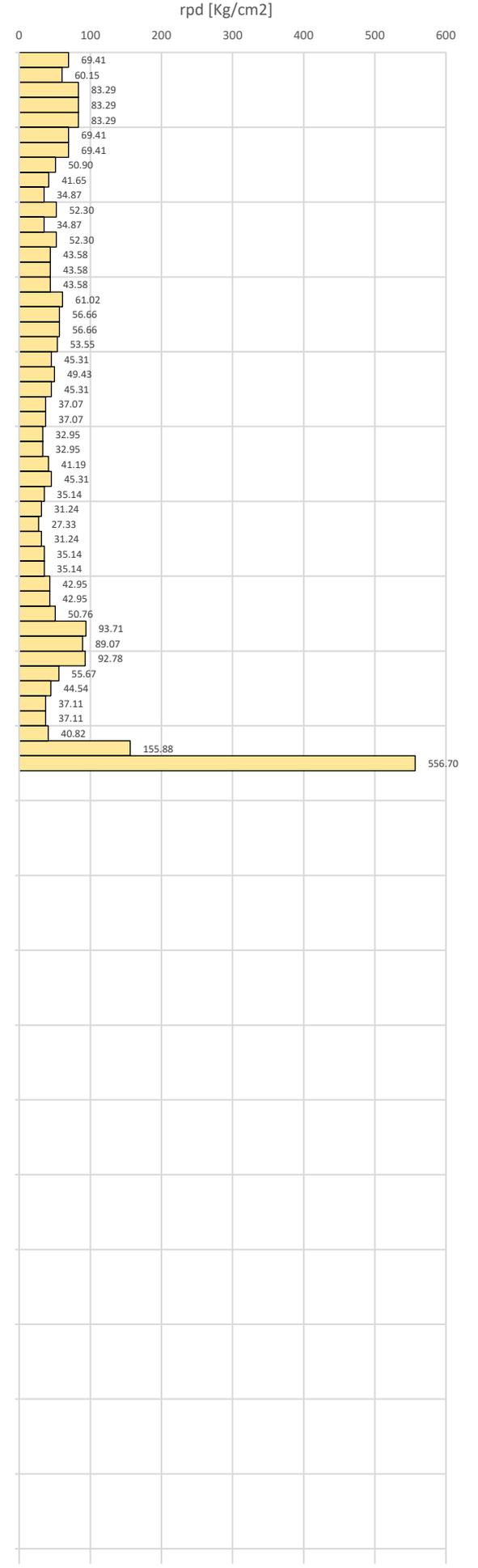
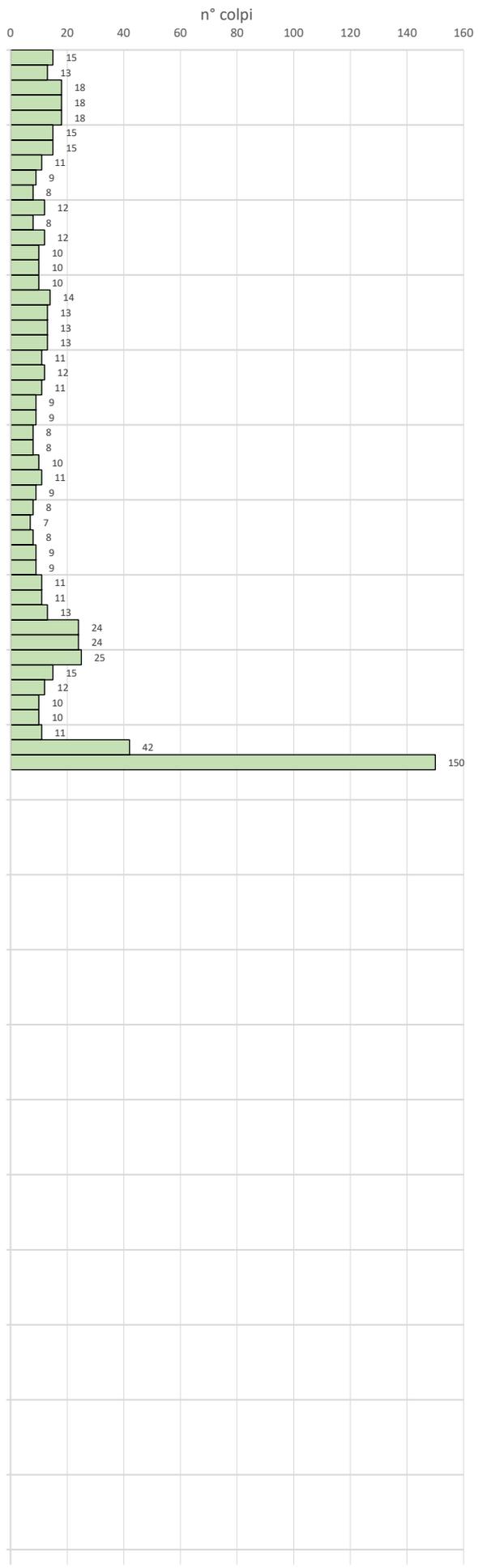
m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	6	27.76
0.2	25	115.68
0.3	67	310.03
0.4	60	277.63
0.5	45	208.23
0.6	26	120.31
0.7	21	97.17
0.8	16	74.04
0.9	14	64.78
1.0	11	47.94
1.1	12	52.30
1.2	14	61.02
1.3	14	61.02
1.4	14	61.02
1.5	15	65.38
1.6	17	74.09
1.7	36	156.90
1.8	28	122.03
1.9	23	100.24
2.0	40	164.76
2.1	75	308.92
2.2	150	617.85
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>20/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM3</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**  
Dott. Alberto Caprara

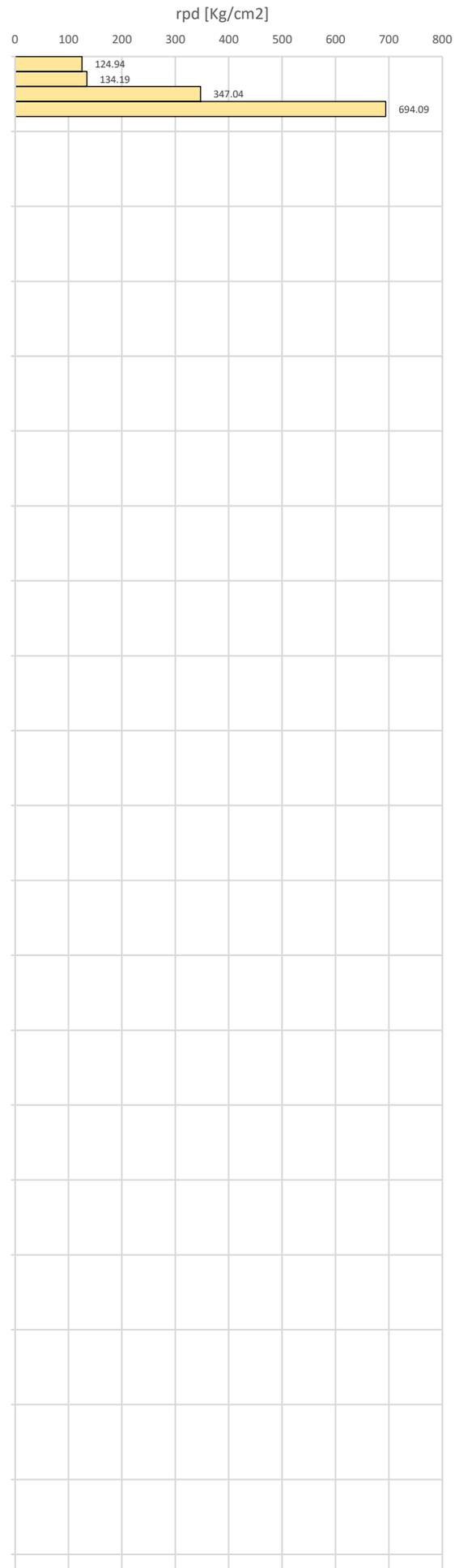
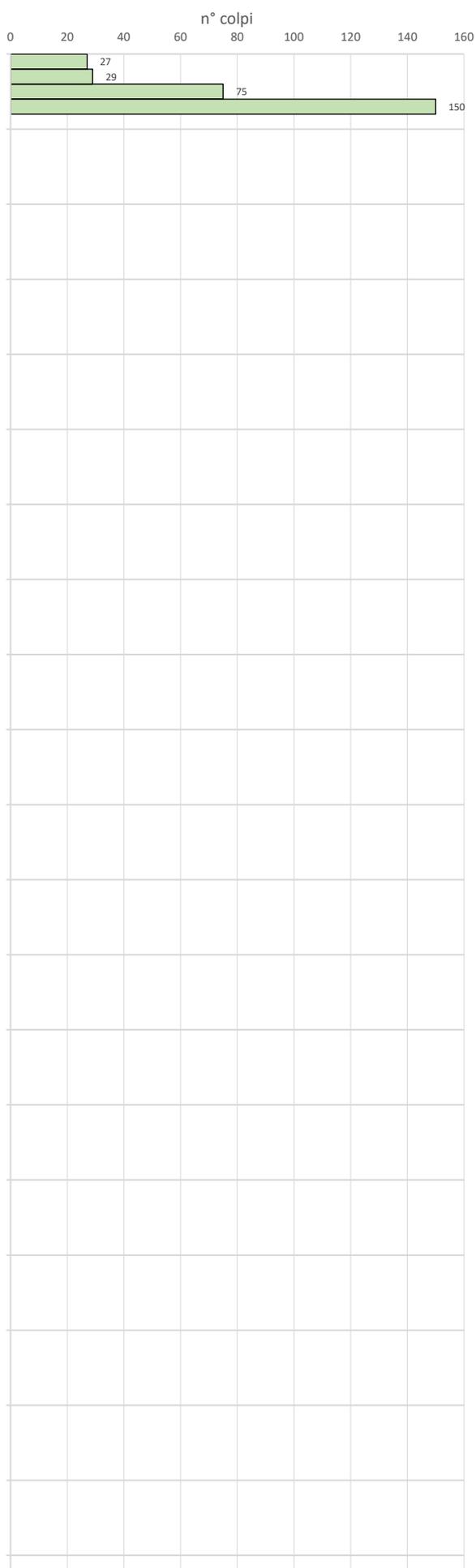
m	n° colpi	rpdc [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	15	69.41
0.2	13	60.15
0.3	18	83.29
0.4	18	83.29
0.5	18	83.29
0.6	15	69.41
0.7	15	69.41
0.8	11	50.90
0.9	9	41.65
1.0	8	34.87
1.1	12	52.30
1.2	8	34.87
1.3	12	52.30
1.4	10	43.58
1.5	10	43.58
1.6	10	43.58
1.7	14	61.02
1.8	13	56.66
1.9	13	56.66
2.0	13	53.55
2.1	11	45.31
2.2	12	49.43
2.3	11	45.31
2.4	9	37.07
2.5	9	37.07
2.6	8	32.95
2.7	8	32.95
2.8	10	41.19
2.9	11	45.31
3.0	9	35.14
3.1	8	31.24
3.2	7	27.33
3.3	8	31.24
3.4	9	35.14
3.5	9	35.14
3.6	11	42.95
3.7	11	42.95
3.8	13	50.76
3.9	24	93.71
4.0	24	89.07
4.1	25	92.78
4.2	15	55.67
4.3	12	44.54
4.4	10	37.11
4.5	10	37.11
4.6	11	40.82
4.7	42	155.88
4.8	150	556.70
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>20/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM4</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**  
Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	27	124.94
0.2	29	134.19
0.3	75	347.04
0.4	150	694.09
0.5		
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		

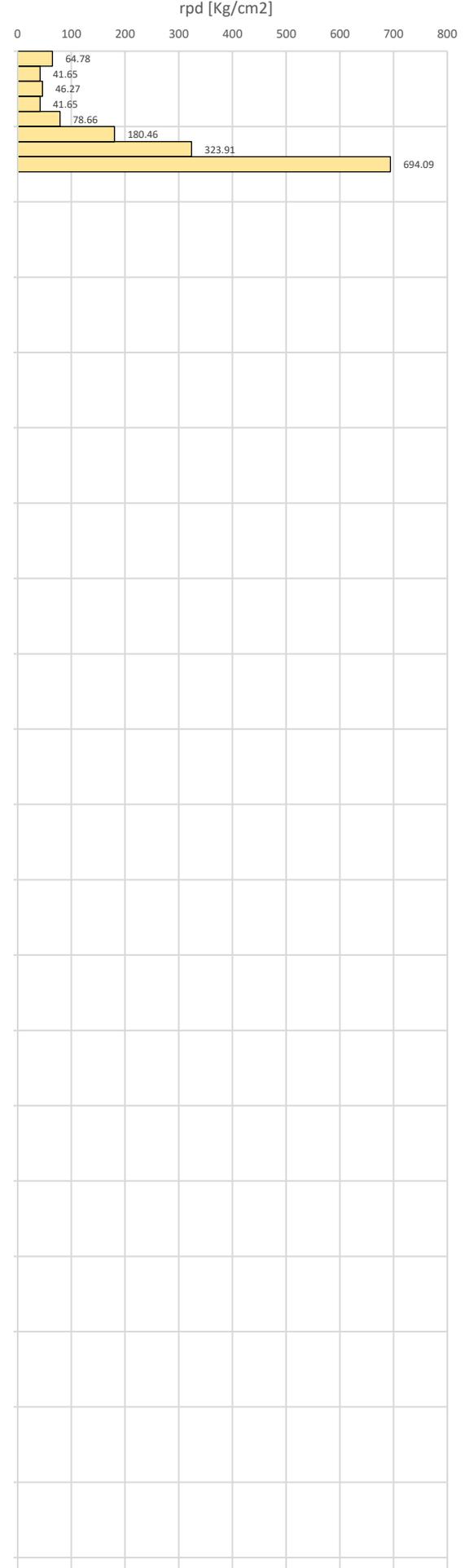
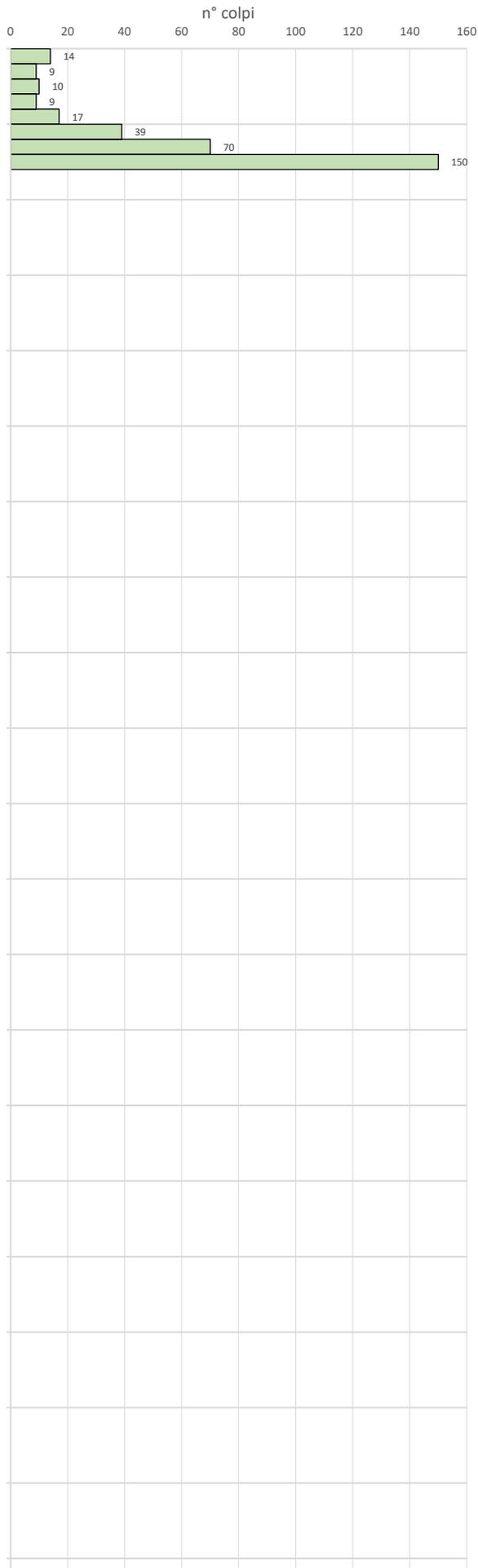


Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>20/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM5</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**

Dott. Alberto Caprara

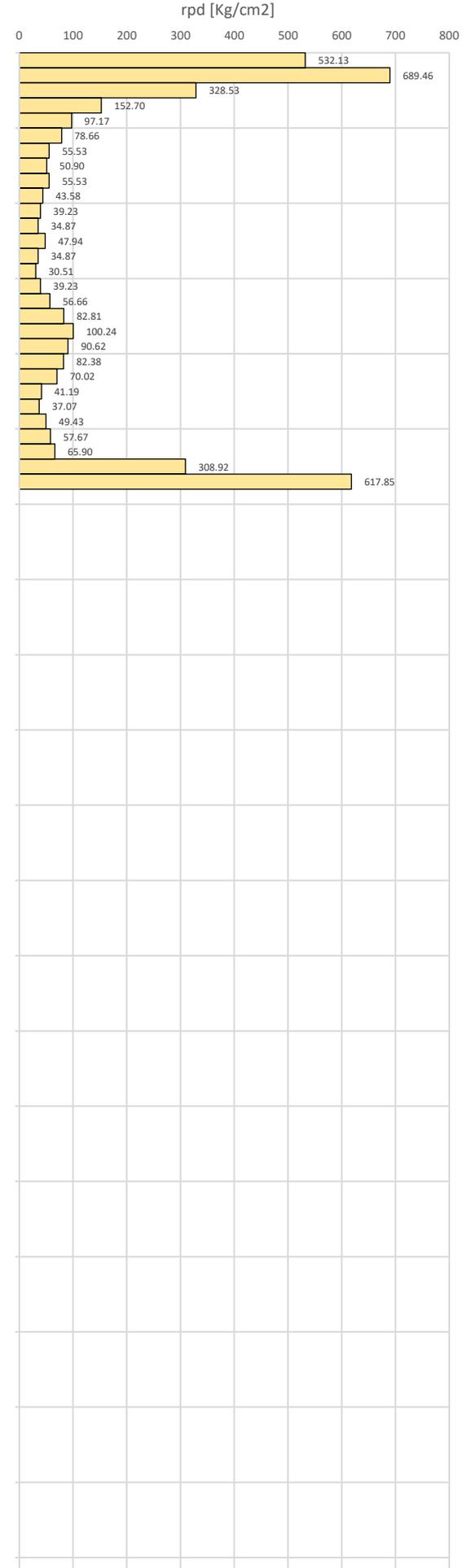
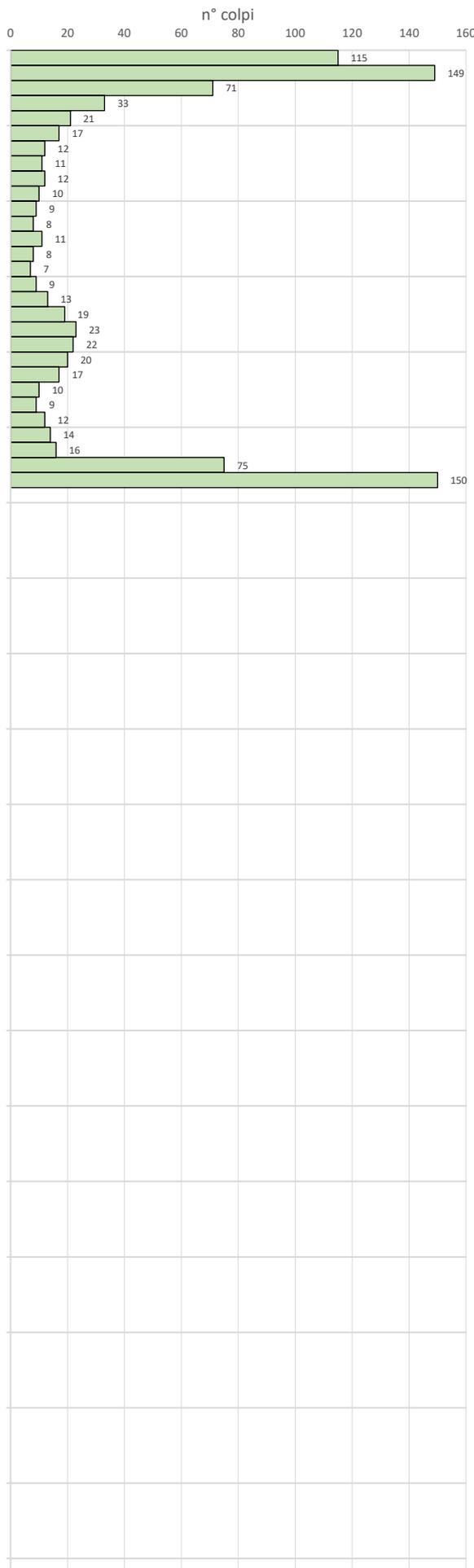
m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	14	64.78
0.2	9	41.65
0.3	10	46.27
0.4	9	41.65
0.5	17	78.66
0.6	39	180.46
0.7	70	323.91
0.8	150	694.09
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>20/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM6</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**  
 Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	115	532.13
0.2	149	689.46
0.3	71	328.53
0.4	33	152.70
0.5	21	97.17
0.6	17	78.66
0.7	12	55.53
0.8	11	50.90
0.9	12	55.53
1.0	10	43.58
1.1	9	39.23
1.2	8	34.87
1.3	11	47.94
1.4	8	34.87
1.5	7	30.51
1.6	9	39.23
1.7	13	56.66
1.8	19	82.81
1.9	23	100.24
2.0	22	90.62
2.1	20	82.38
2.2	17	70.02
2.3	10	41.19
2.4	9	37.07
2.5	12	49.43
2.6	14	57.67
2.7	16	65.90
2.8	75	308.92
2.9	150	617.85
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		

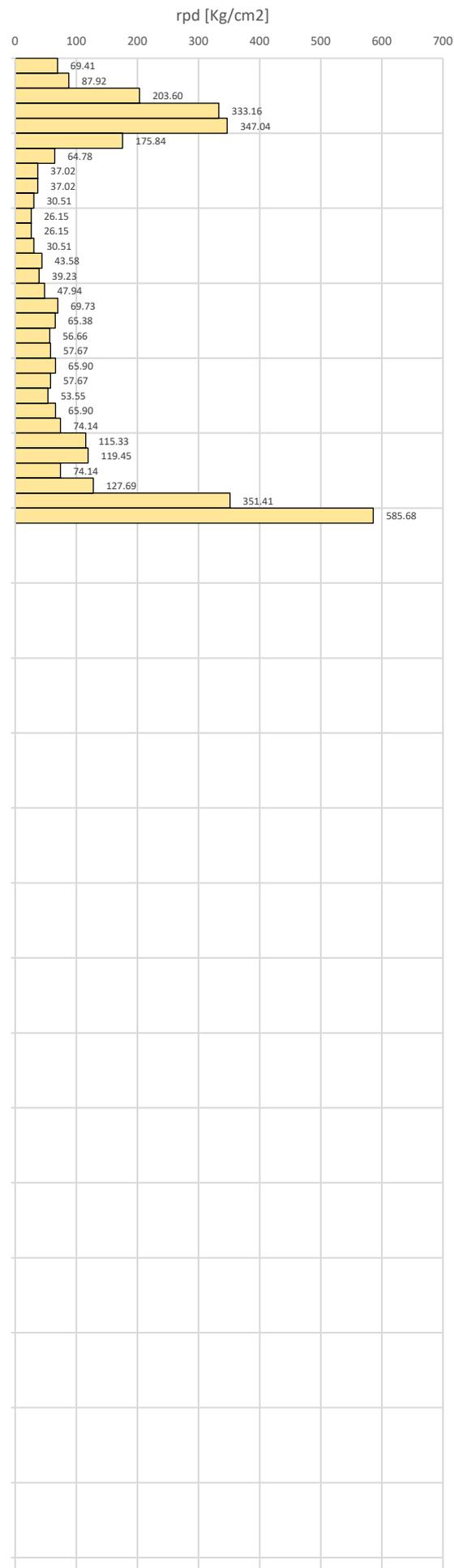
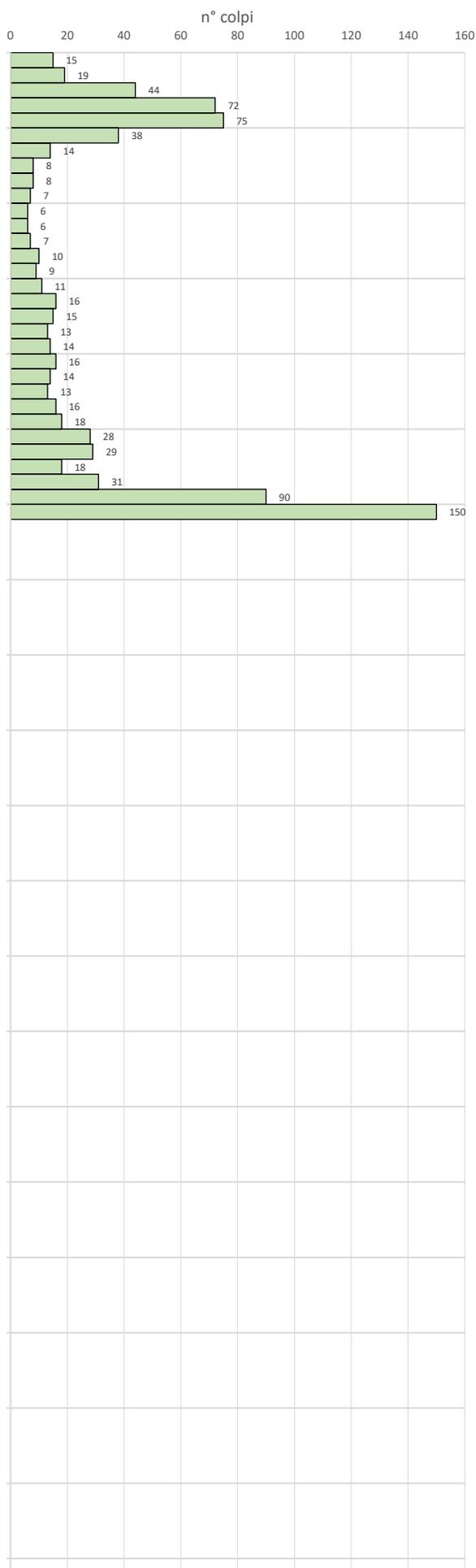


Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>25/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM7</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

# GEOLOGO

Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpdc [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	15	69.41
0.2	19	87.92
0.3	44	203.60
0.4	72	333.16
0.5	75	347.04
0.6	38	175.84
0.7	14	64.78
0.8	8	37.02
0.9	8	37.02
1.0	7	30.51
1.1	6	26.15
1.2	6	26.15
1.3	7	30.51
1.4	10	43.58
1.5	9	39.23
1.6	11	47.94
1.7	16	69.73
1.8	15	65.38
1.9	13	56.66
2.0	14	57.67
2.1	16	65.90
2.2	14	57.67
2.3	13	53.55
2.4	16	65.90
2.5	18	74.14
2.6	28	115.33
2.7	29	119.45
2.8	18	74.14
2.9	31	127.69
3.0	90	351.41
3.1	150	585.68
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		

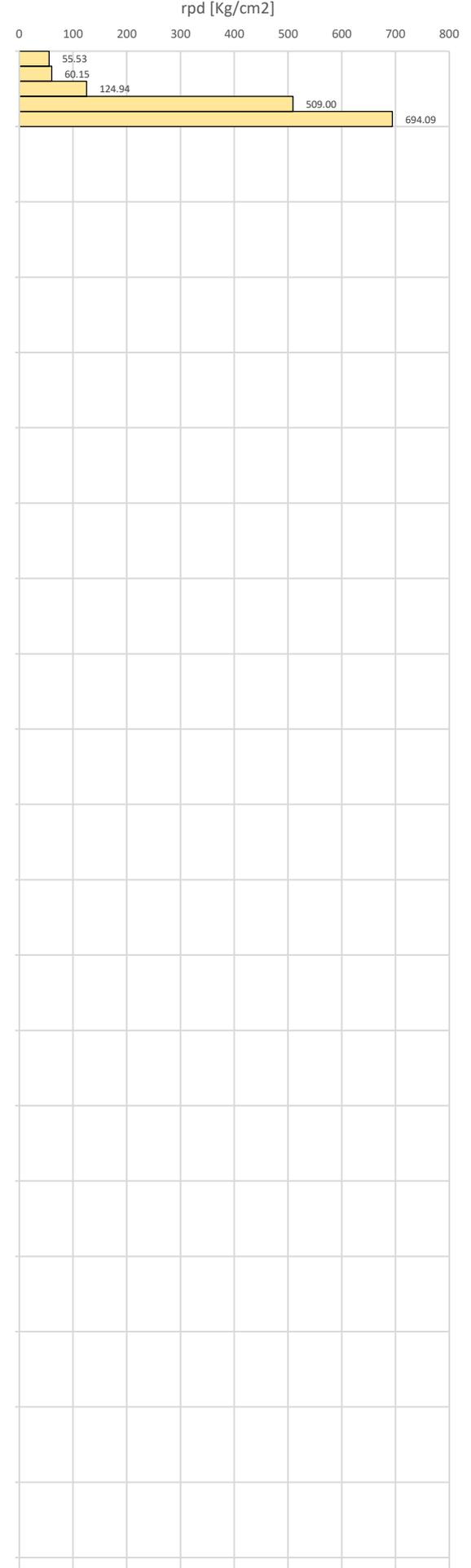
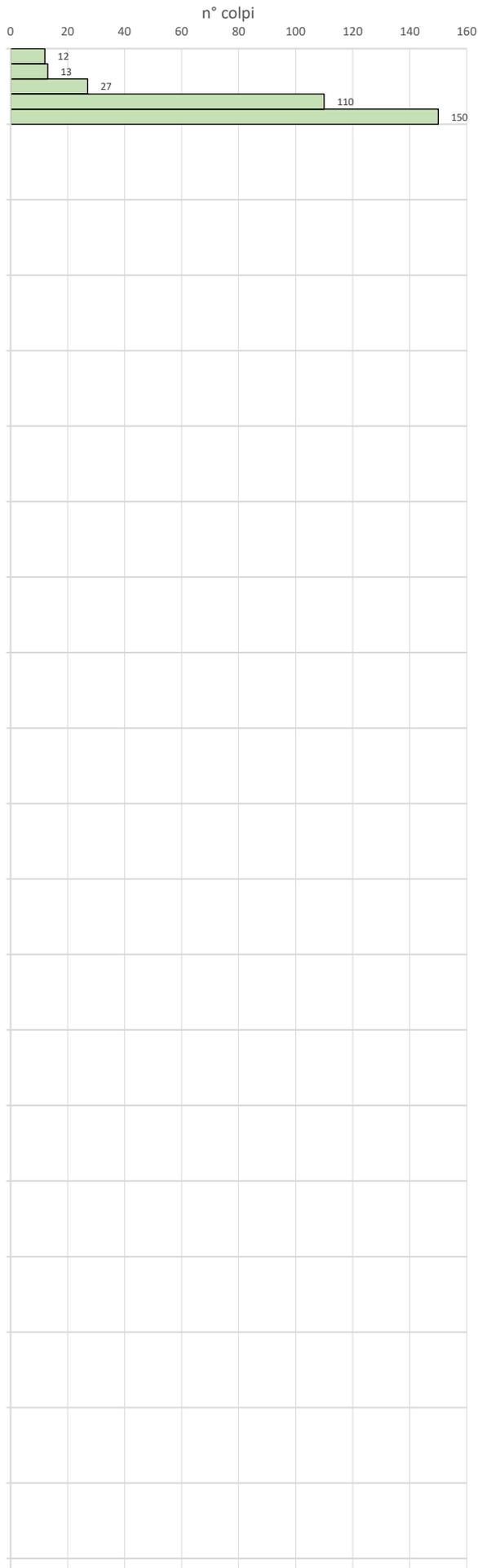


Committente:	<b>MATE Engineering Soc. Coop.va</b>	peso massa battente <b>M</b>	30 kg
Località:	<b>Quartiere Borgo Panigale e Barca</b>	altezza di caduta <b>H</b>	0.2 m
Comune:	<b>Bologna e Casalecchio (BO)</b>	area base punta conica <b>A</b>	10 cm <sup>2</sup>
Data:	<b>20/06/2024</b>	peso asta <b>pa</b>	2.4 kg
Prova:	<b>DPM8</b>	peso sistema caduta <b>ps</b>	6.5 kg

**GEOLOGO**

Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm <sup>2</sup> ]
0.1	12	55.53
0.2	13	60.15
0.3	27	124.94
0.4	110	509.00
0.5	150	694.09
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



# ALLEGATO C

## RELAZIONE SULLE INDAGINI SISMICHE (Re.Mi e HVSR)

Strumento utilizzato per Re.Mi: Moho “SoilSpy” – sismografo digitale

Strumento utilizzato per HVSR: Moho “Tromino” – tromografo digitale

## 1 LE ONDE SISMICHE DI SUPERFICIE

Le onde sismiche di superficie sono generate in caso di eventi sismici e si generano da fenomeni di rifrazione, riflessione, fenomeni di guida d'onda e dispersione. Sono definite 'onde di superficie' in quanto si propagano prevalentemente lungo l'interfaccia tra due materiali a differenti velocità di propagazione delle onde sismiche (interfaccia terra-aria). In particolare la loro **ampiezza decade in modo esponenziale con la profondità**, interessando quindi solo un limitato spessore superficiale, la cui profondità dipende dalla lunghezza d'onda considerata.

La distinzione riconosciuta in quest'ambito è tra due differenti tipologie: onde di Rayleigh, onde di Love, che prendono il nome dagli scienziati che le hanno teorizzate. Queste si distinguono sulla base del tipo di movimento che imprimono alla particella del mezzo in cui si propagano.

Osservando un accelerogramma è possibile notare come le onde di superficie mostrino un'ampiezza nettamente maggiore rispetto alle onde di volume (Onde P ed S). Le tecniche classiche di elaborazione dei segnali sismici considerano come "disturbo" la porzione di sismogramma in cui sono presenti le onde di superficie, mentre le nuove metodologie di analisi del segnale permettono di analizzare ed interpretare questa parte di 'disturbo' tramite un modello matematico.

### 1.1 INDAGINE SISMICA NEL SITO IN ESAME

Nel sito in esame sono state utilizzate in abbinata due indagini sismiche per lo studio delle onde di superficie che si sono ampiamente affermate in ambito scientifico e professionale negli ultimi anni. In particolare è stata impiegata la **tecnica passiva Re.Mi** e la **tecnica passiva HVSR**. Di seguito saranno brevemente descritte le due tipologie di indagine, facendo riferimento a cenni delle rispettive teorie sismiche ed alle metodologie inerenti alle acquisizioni.

### 1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

#### 1.2.1 Misura HVSR

Lo strumento utilizzato è un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione *Engineering*. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 µm), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione, il segnale digitalizzato viene gestito tramite un software dedicato (**Grilla**), il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i relativi grafici.

#### 1.2.2 Indagine multicanale

Per la realizzazione della misura di **sismica passiva di tipo Re.Mi**, è stato utilizzato lo stendimento "*SoilSpy*" dotato di 25 canali in cui il segnale è digitalizzato in corrispondenza dei singoli geofoni anziché alla fine dell'*array*, consentendo un utilizzo ed una messa in campo dello stendimento più semplici, incrementando la qualità del dato raccolto (sono ridotti al massimo i problemi di interferenze nel segnale elettrico). A ciascun canale può essere collegato un geofono (verticale o orizzontale) con frequenza propria di 4,5 Hz, ancorato al suolo tramite un puntale o una placca per i terreni sconnessi o rigidi. I segnali vengono registrati direttamente su pc tramite il *software* dedicato **Rosina**, che permette di intervenire per la correzione e verifica delle singole tracce. Gli accelerogrammi registrati vengono poi elaborati con

**Grilla**, che permette l'inversione della curva di dispersione abbinando la misura HVSR al modello. In particolare le misure sono state abbinare nel seguente modo:

- Re.Mi.1 + Tr1

## 2 REFRACTION MICROTREMOR (RE.MI.)

Il metodo Re.Mi. è un metodo sismico che studia le onde di superficie utilizzando il rumore ambientale come sorgente. Tale tecnica permette di ottenere una inversione del modello fisico del terreno fino a ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio (S) del sito. Tale metodo consiste nell'analisi delle onde di superficie *Rayleigh*, registrate da una serie di geofoni posizionati a formare uno stendimento. A differenza di tutte le altre tecniche di indagine sismica, i metodi basati sull'analisi delle onde di superficie di *Rayleigh* non risultano limitati dalle inversioni di velocità; infatti la loro propagazione è funzione innanzitutto delle onde S e solo in parte legata alla Vp ed alla densità del mezzo, risultando così un ottimo strumento per la caratterizzazione sismica del sito tramite la ricostruzione del profilo di Vs, come previsto dalla vigente normativa (NTC'18).

L'utilizzo della tecnica Re.Mi. risulta un ottimo compromesso negli ambienti urbani caratterizzati da intenso rumore sismico, che per le altre tecniche sismiche classiche risulta un disturbo tale da poter compromettere la buona riuscita della prova.

### 2.1 METODOLOGIA DI MISURA

Lo strumento *SoilSpy*, costituito da un cavo dotato di 25 moduli a cui collegare altrettanti geofoni, permette di realizzare stendimenti sismici tradizionali di una lunghezza massima di 125 m (25 x 5 m di interdistanza), con ogni configurazione spaziale possibile.

In particolare nel sito si è predisposto uno stendimento dotato di 8 geofoni con interdistanza di 3 m (totale lunghezza stendimento = 24 m). Il software di acquisizione dei dati (**Rosina**) permette di realizzare una registrazione della lunghezza desiderata, inseguito interpretata con il software proprietario Grilla.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva dei principali parametri relativi all'analisi della misura.

Re.Mi.1	
Inizio registrazione	12/07/2024 11:56:56
Fine registrazione	12/07/2024 12:01:56
Lunghezza della traccia	5'00"
Frequenza di campionamento	1024 Hz
Lunghezza stendimento	36 m
N° geofoni	11

Tabella 1: descrizione tecnica della misura.

Di seguito sono riportati i segnali sismici registrati.

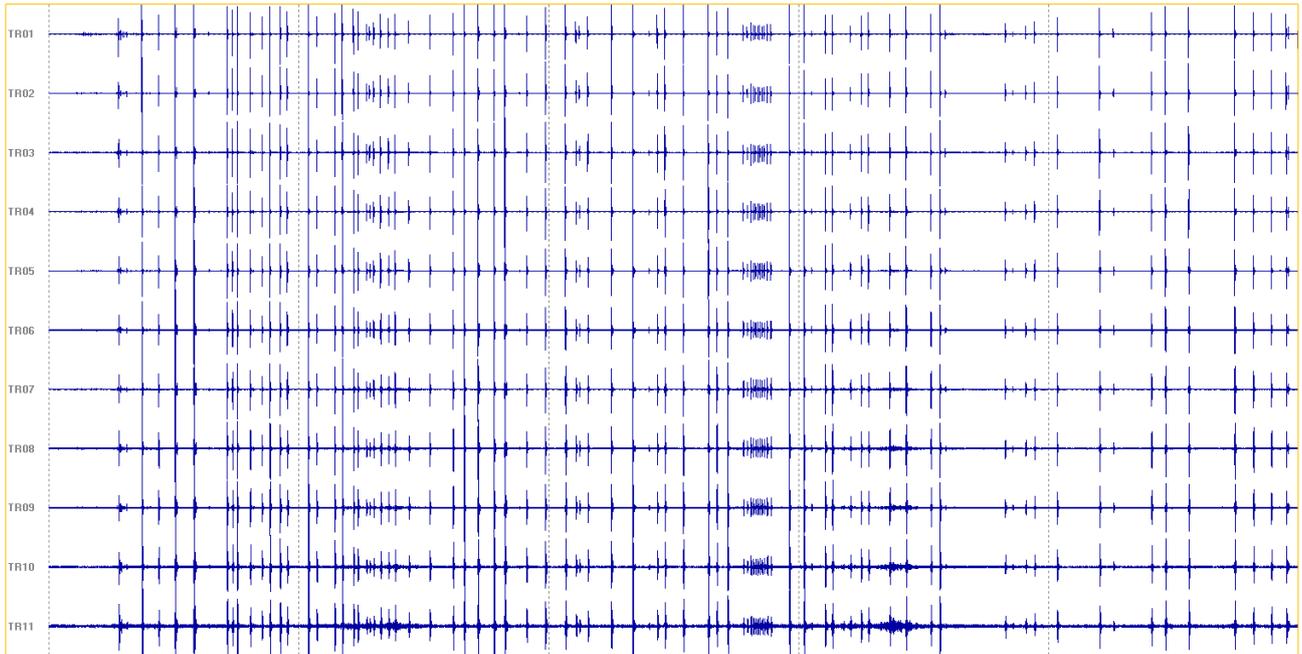


Figura 1: registrazione delle tracce dei geofoni.

La curva di dispersione fornisce, per mezzo di una scala cromatica, l'intensità dell'energia delle onde di Rayleigh alle varie frequenze ( $f$  – asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate).

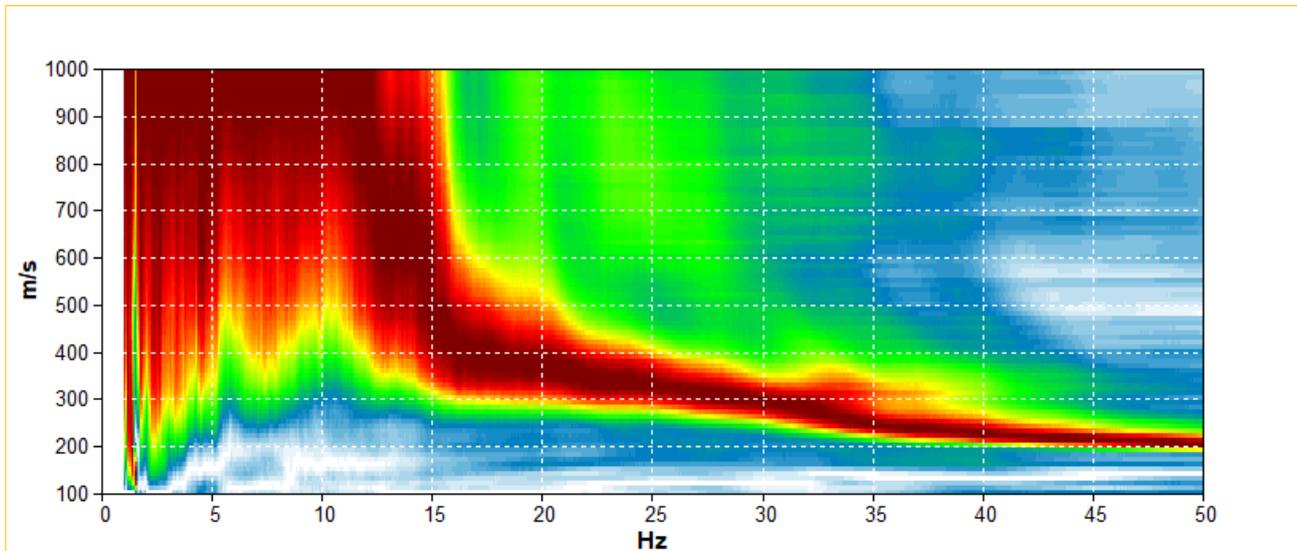


Figura 2: curva di dispersione del sito.

### 3 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR)

La sismica tomografica è una tecnica passiva che studia le onde a bassa frequenza e di bassa entità del terreno (microtremori) tramite misure puntuali sul suolo.

Le vibrazioni sismiche ambientali (microtremore) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di  $10^{-4}$  ÷  $10^{-2}$  mm (Okada, 2003). L'origine del rumore sismico è riconducibile ad esempio alle perturbazioni atmosferiche sugli oceani che si propagano come onde superficiali sui continenti, mentre le sorgenti dei microtremori sono le attività antropiche e si propagano come onde superficiali di Rayleigh. I metodi che si basano sull'acquisizione e l'elaborazione

di tale “rumore” si dicono ‘passivi’ in quanto le vibrazioni non risultano quindi localizzate e fornite *ad hoc*, come per le tecniche di simica attiva (con le apposite energizzazioni).

### 3.1 METODOLOGIA DI MISURA – Tr1

È stata effettuata inoltre una misura di sismica passiva; lo strumento è stato posizionato al di sopra di una superficie resa idonea dall’operatore, al fine di permettere il perfetto accoppiamento tra lo strumento ed il terreno.

Tr1	
Inizio registrazione	12/07/2024 10:57:22
Fine registrazione	12/07/2024 11:17:22
Lunghezza della traccia	20'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	12 sec
Percentuale di traccia analizzata	92%
Lisciamento	10%

Tabella 2: descrizione tecnica della misura.

La misura è stata elaborata in studio mediante il *software* dedicato **Grilla** fornito dalla Micromed.

L’elaborazione del segnale ha previsto i seguenti passaggi:

- analisi delle tre componenti del segnale con suddivisione in finestre opportunamente dimensionate (*Windows Size*);
- depurazione del segnale da rumori anomali (*Detrend*);
- calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra;
- lisciamento dello spettro di ogni finestra (*Smoothing*);
- calcolo della trasformata di *Fourier* (FFT) per ciascuna finestra;
- calcolo del rapporto spettrale HVSR per ogni frequenza e per ogni finestra.

Per procedere con l’interpretazione della misura tomografica eseguita, è stata effettuata una selezione delle finestre da utilizzare per l’analisi (serie temporale H/V), in quanto alcune di esse presentavano disturbi che interferivano e rendevano poco chiari i risultati grafici.

Il grafico “DIREZIONALITÀ H/V” mostra con una scala cromatica l’intensità dei picchi alle diverse frequenze (ordinate), fornendo una distribuzione spaziale di 180° nell’intorno del punto di misura partendo dal nord (0°) dello strumento.

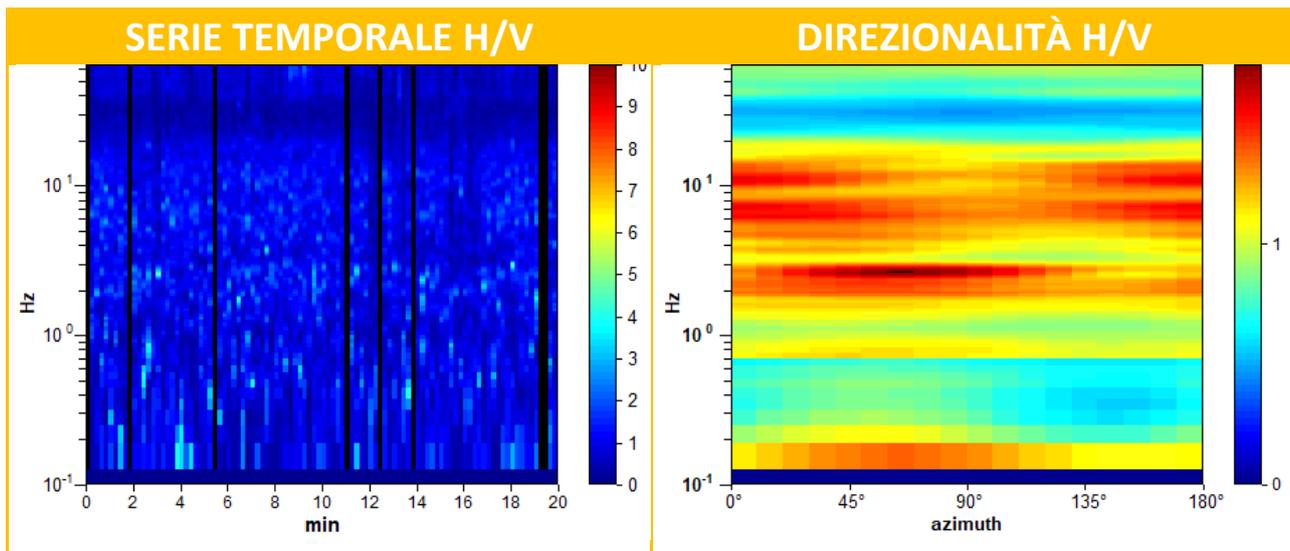


Figura 3: Grafico della serie temporale H/V (sinistra) e grafico della direzionalità H/V (destra) relativi alla misura Tr1.

Osservando gli spettri delle singole componenti è possibile notare, dall’andamento uniforme delle tre linee (fig. 3), come la misura sia stata eseguita correttamente, effettuando un buon accoppiamento tra strumento e terreno.

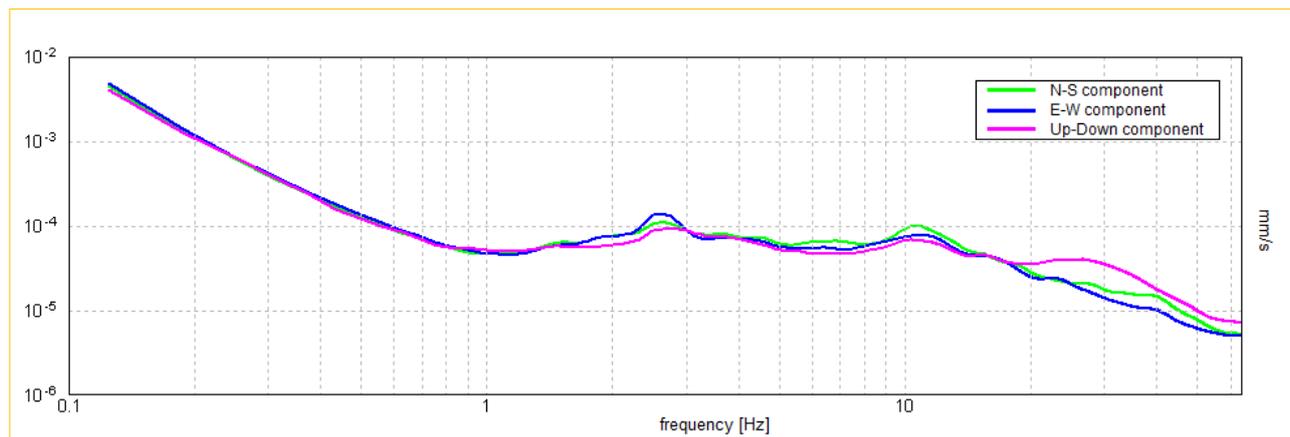


Figura 4: Grafico delle componenti ortogonali della misura Tr1.

Di seguito si riporta il grafico HVSR derivante dall’elaborazione della misura.

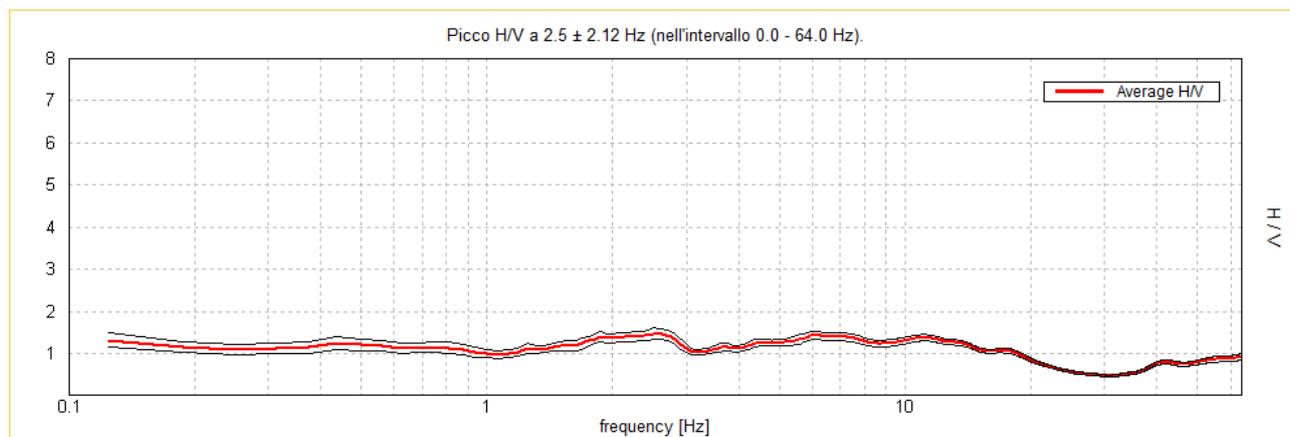


Figura 5: Diagramma HVSR relativo alla misura Tr1.

## 4 INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE

### 4.1 RE.MI 1 E TR1

Il *software* utilizzato per l'analisi delle tracce permette l'elaborazione sincrona dei due tipi di misura. È possibile quindi ricostruire il profilo sismico delle onde S utilizzando i dati di entrambe le indagini.

L'**interpretazione** della curva di dispersione consiste nell'ottenere una **curva sintetica** di dispersione che riesca a riprodurre al meglio quella registrata, facendo attenzione ad osservare i cambi di pendenza. Il grafico H/V si elabora generando una **curva sintetica** in grado di riprodurre al meglio la curva reale ed in particolare i punti di massimo locale significativi della misura registrata.

Di seguito si riportano i grafici della curva di dispersione ottenuta dalla tecnica Re.Mi. e la curva H/V ottenuta dall'analisi della registrazione dei microtremori, ai quali è applicata la curva sintetica corrispondente al profilo sismico ottenuto dall'interpretazione delle tracce. Inoltre si riporta il profilo sismico in forma tabellare e grafica ottenuto dall'interpretazione combinata delle due indagini.

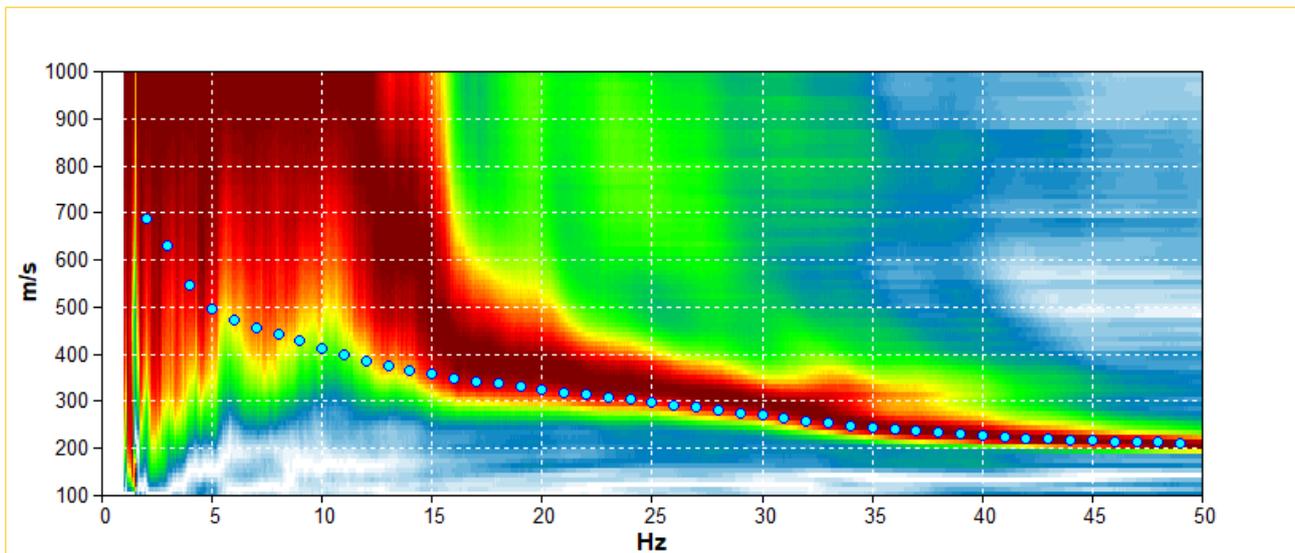


Figura 6: Grafico della curva di dispersione con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

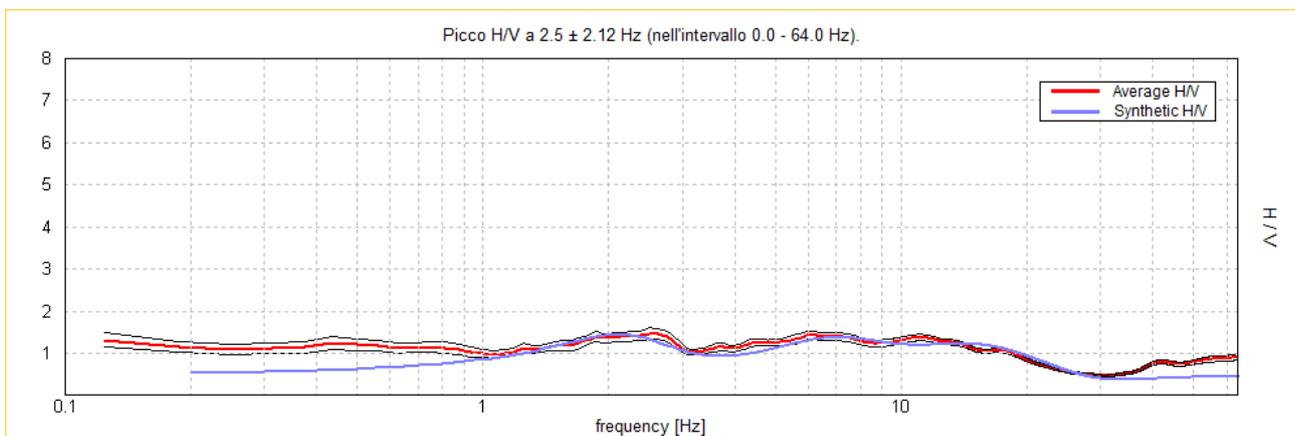


Figura 7: Grafico della curva H/V con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

Sismostrato	Profondità dello strato [m]	Spessore dello strato [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1	2.80	2.80	210	0.46
2	7.80	5.00	340	0.40
3	17.80	10.00	420	0.39
4	62.80	45.00	540	0.34
5	inf.	inf.	820	0.31

Tabella 3: profilo sismostratigrafico del modello sismico.

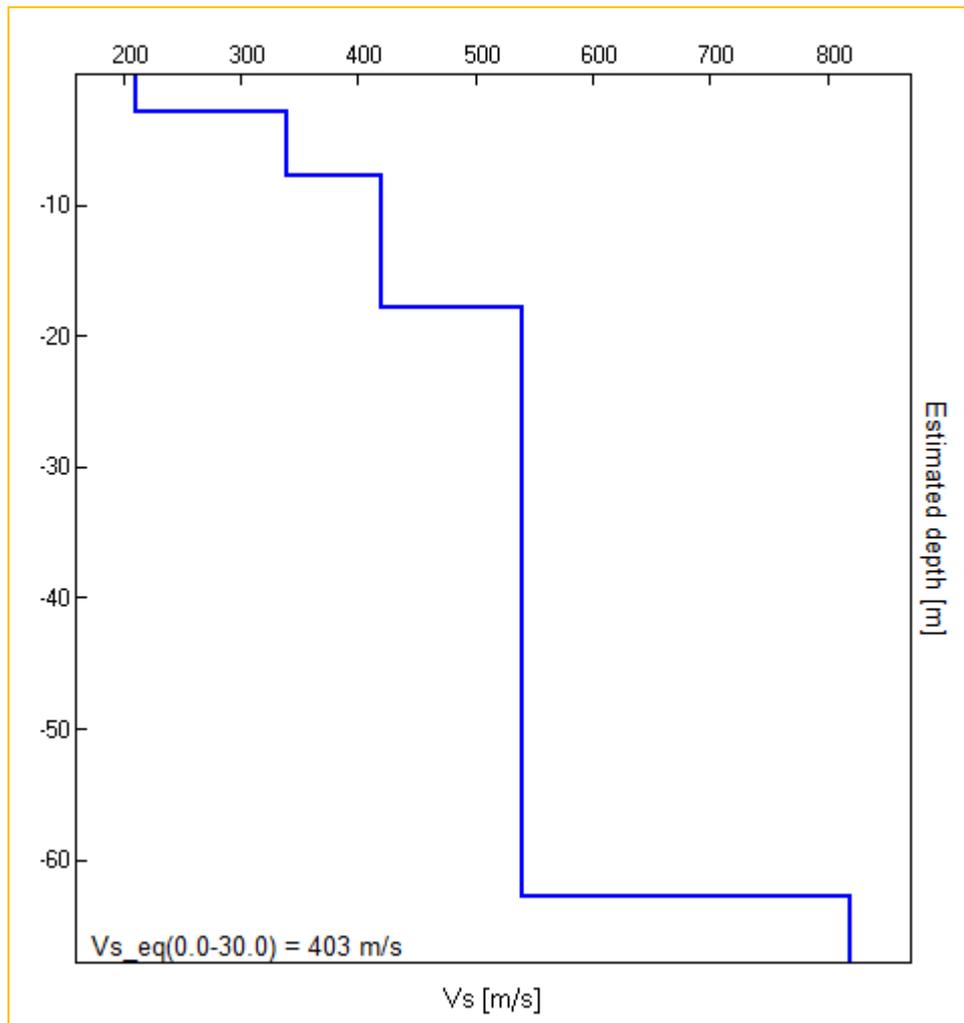


Figura 8: profilo sismostratigrafico del modello sismico.