



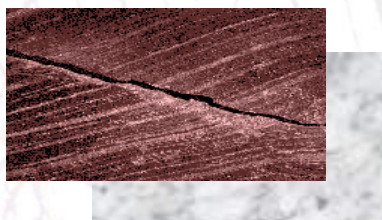
**GEOLOGO Carlo Malgarotto**

European geologist n.1337 - Dottore di Ricerca

Via A. Benedicenti, 14 – 19123 La Spezia

Tel. 348/3559368 – e-mail: [geo@carlomalgarotto.it](mailto:geo@carlomalgarotto.it)

Cod.Fis. MLGCRL64S08L736F p.IVA 01014800112



**Comune di Bolano**  
**Provincia della Spezia**

## Relazione Geologica

Relativa a: Distretto di Trasformazione – D.T.R.04 Piano Urbanistico Operativo “subdistretto sub 1.a”.

Committente: Lerici s.r.l.

Località: Via Romana

Rif. N°: 13/23

Data: 15 maggio 2023

Il Tecnico:

Geol. Carlo Malgarotto



## 1. PREMESSA

La presente relazione, riporta i risultati di un'indagine geologica eseguita in Via Romana, Loc. Ceparana, nel Comune di Bolano (Sp), su incarico di Lerici s.r.l., sul terreno è in progetto il Piano Urbanistico Operativo “subdistretto sub 1.1” nell'ambito del Distretto di Trasformazione DTR04.

In considerazione dell'incidenza sul terreno delle opere in oggetto e delle condizioni generali della zona, le metodologie di indagine adottate hanno previsto, nell'ordine:

- ricognizione preliminare necessaria per prendere visione dello stato dei luoghi e raccogliere tutta la documentazione occorrente con ricerca bibliografica ed esame dei relativi studi geologici;
- esecuzione di un rilevamento geologico, esecuzione di una campagna geognostica consistente in n.1 stesa sismica a rifrazione in onde p e onde s, n.1 misura sismica MASW, n.2 misure sismiche passive HVSR e n.3 prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH;
- rielaborazione di quanto emerso dal rilevamento e redazione della presente relazione tecnica.

Le indagini sono state condotte in conformità a quanto previsto dalle normative vigenti. Alla presente relazione è allegata (nel testo) la seguente documentazione cartografica:

- Allegato a) planimetria geologica;
- Allegato b) sezione geologica;
- Allegato c) carta di analisi;
- Allegato d) carta di sintesi;
- Allegato e) risultati delle indagini geognostiche.

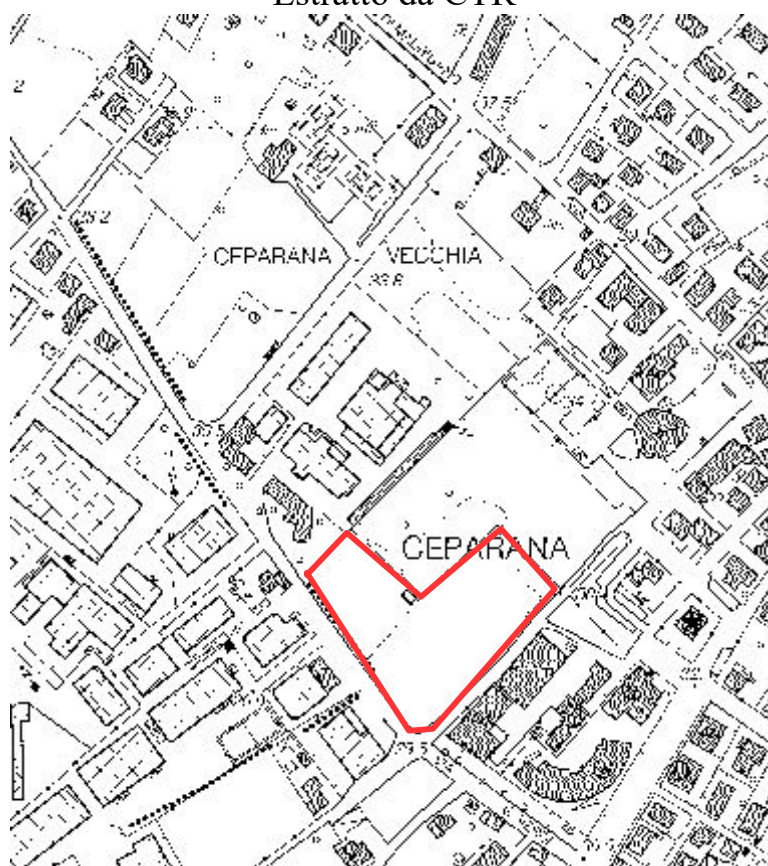
## 2. UBICAZIONE DELL'AREA

L'area interessata dall'indagine è situata nei pressi di Via Romana in Loc. Ceparana, nel Comune di Bolano, all'area si accede dalla viabilità ordinaria. L'ubicazione è riportata negli allegati cartografici.





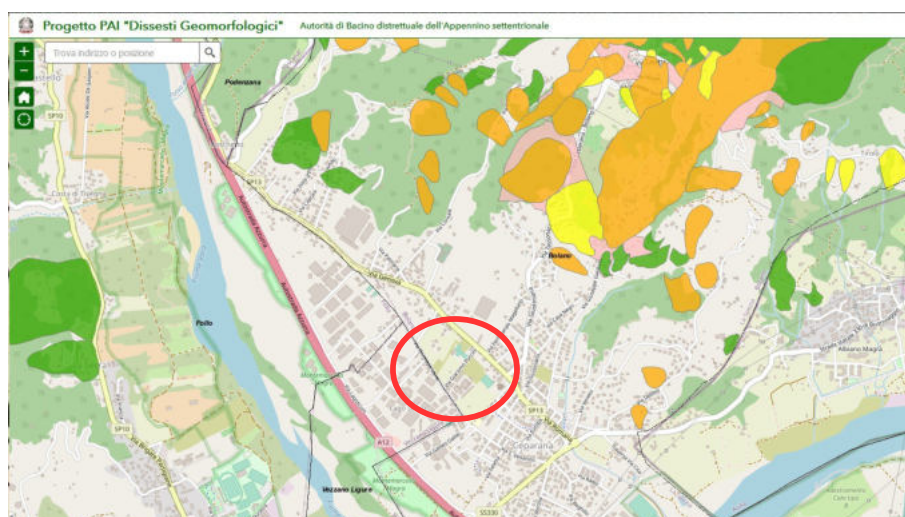
Estratto da CTR



area in esame

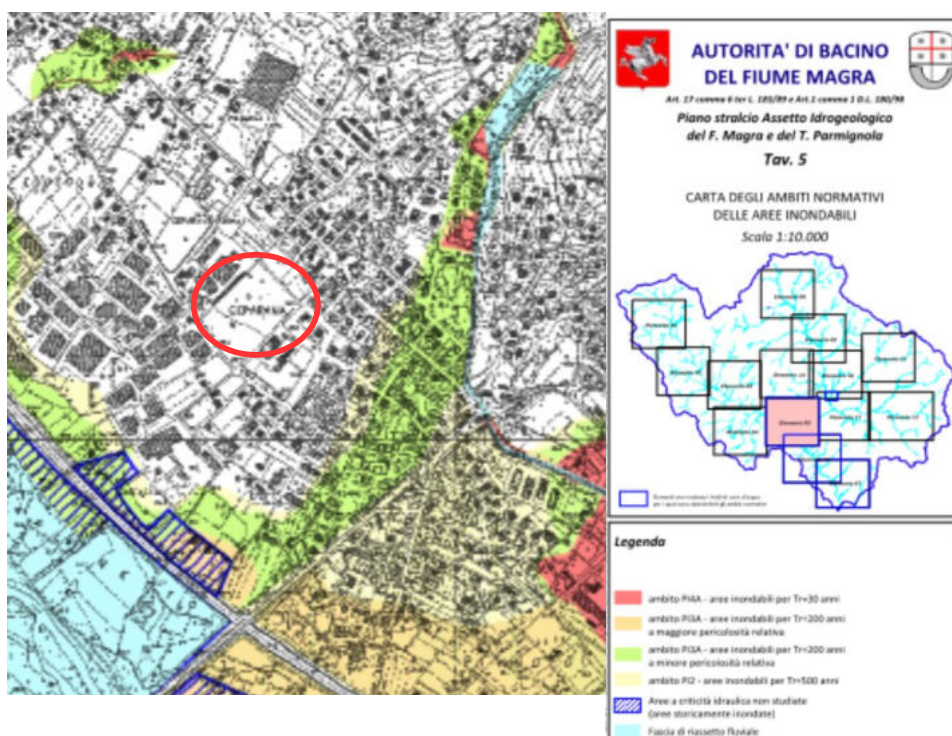
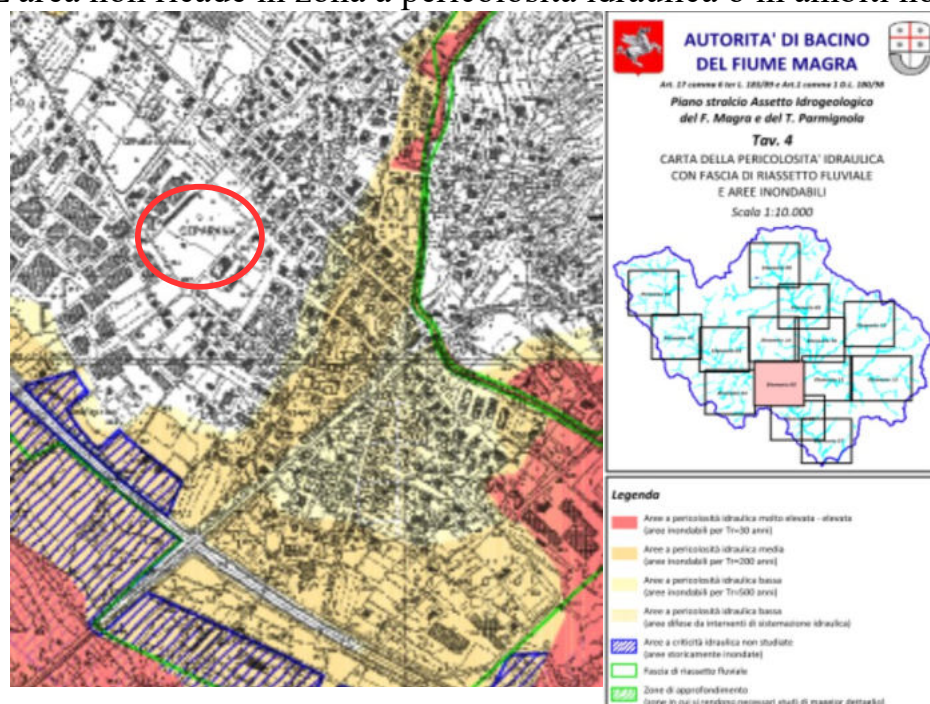
### 3. ZONIZZAZIONE GEOLOGICA E SUSCETTIVITÀ D'USO DEL TERRITORIO

L'area ricade nel Piano di Bacino relativo all'ex Autorità di Bacino del Fiume Magra, ora Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. L'area non ricade in alcuna zona classificata a pericolosità geomorfologica, anche nel più recente progetto PAI “Dissesti Geomorfologici”.





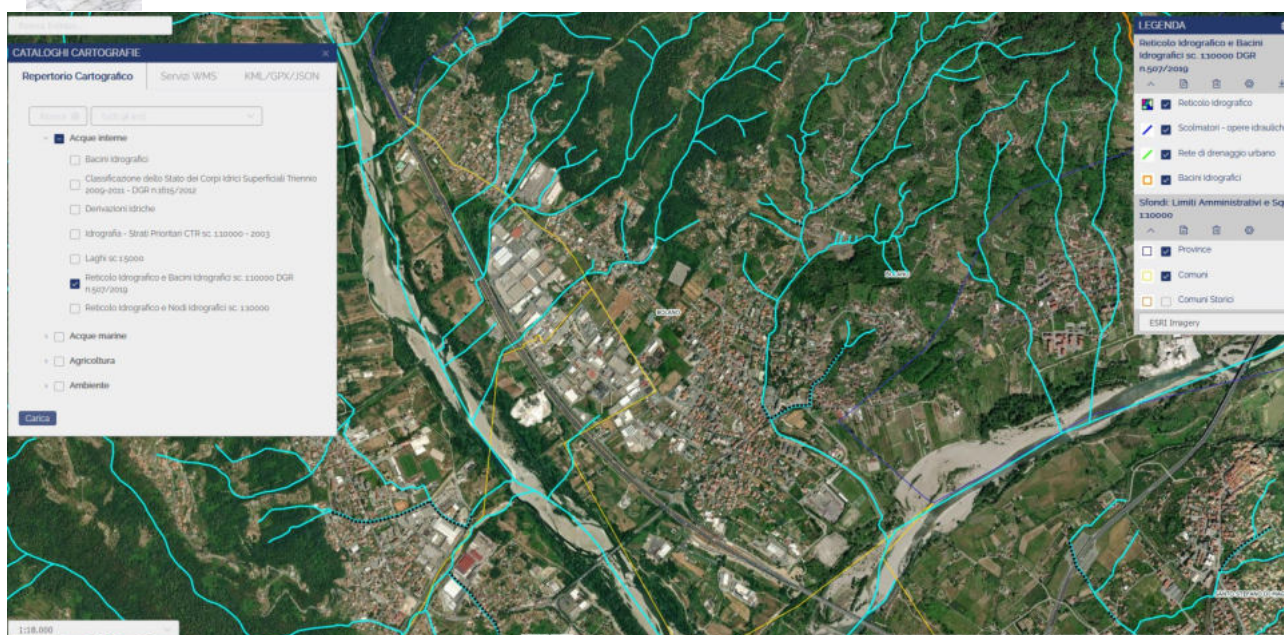
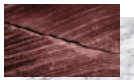
L'area non ricade in zona a pericolosità idraulica o in ambiti normativi.



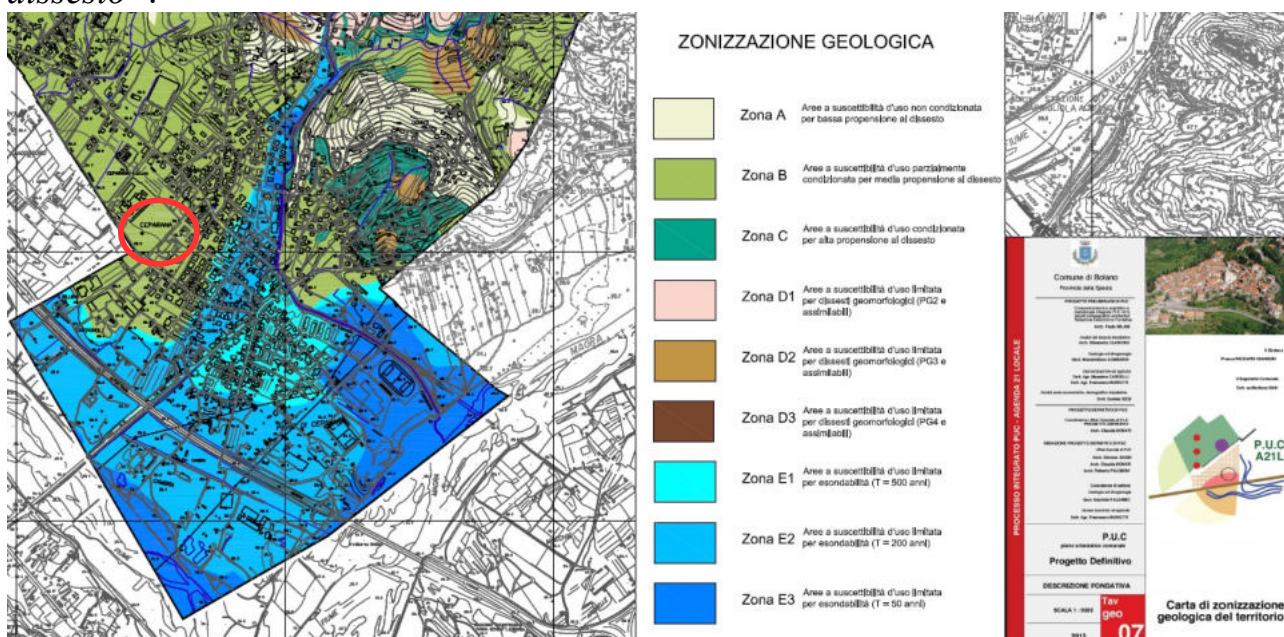
L'area si trova al di fuori della fascia di inedificabilità assoluta e fuori dalla fascia di rispetto del reticolo idrografico regionale.

L'area non ricade in area soggetta ai seguenti vincoli:, area carsica, Pietre Verdi, vincolo idrogeologico.





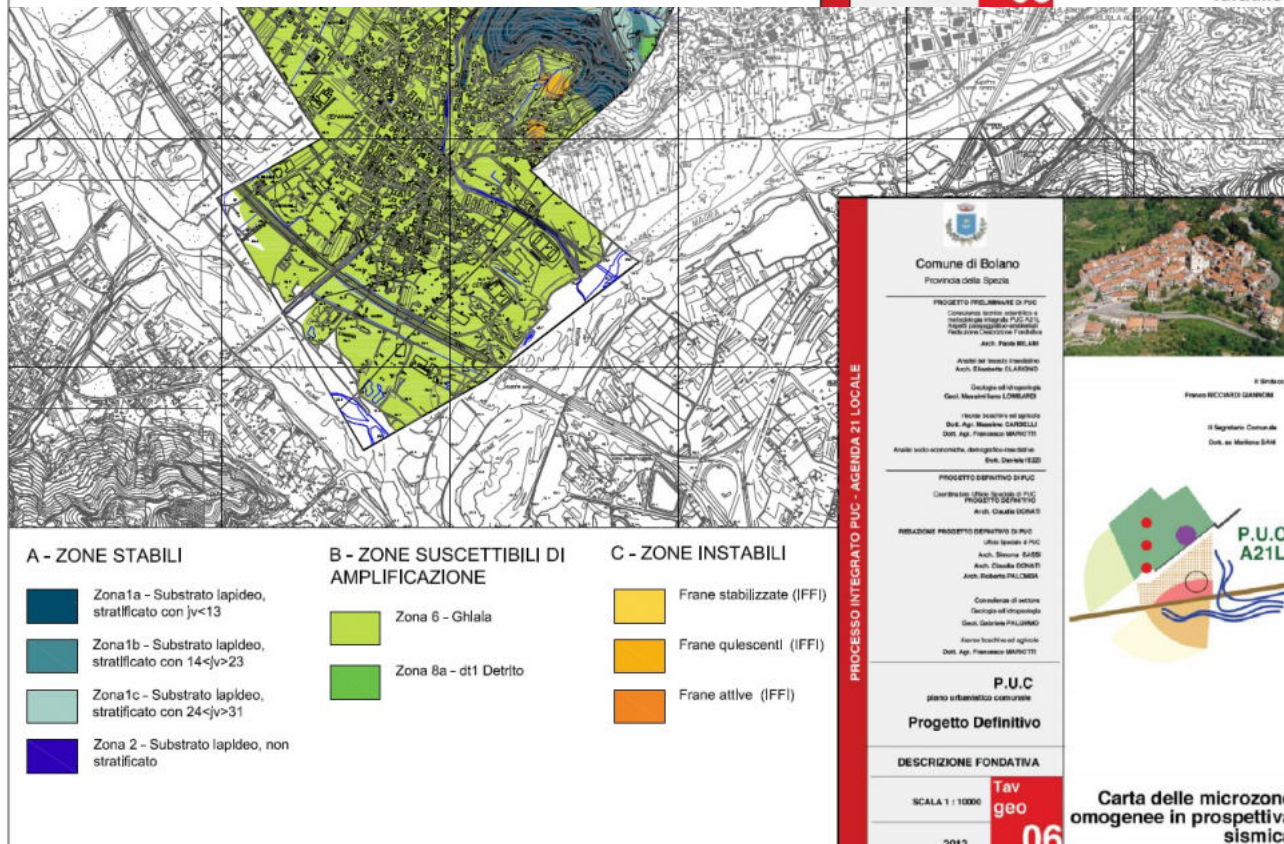
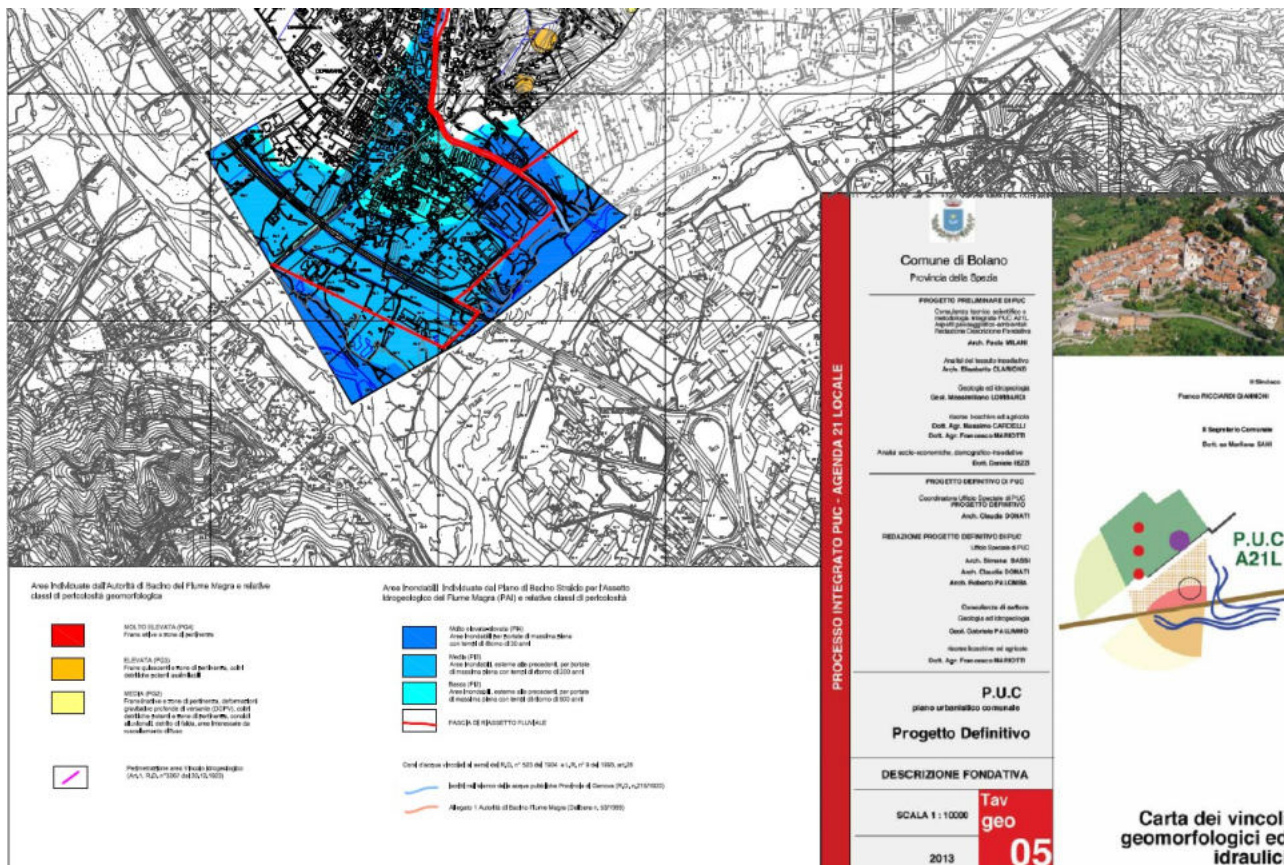
La Carta di zonizzazione geologica del territorio del PUC classifica l'area come zona B *“aree a suscettibilità d'uso parzialmente condizionata per media propensione al dissesto”*.



La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica indica l'area come B – Zone suscettibili di amplificazione - Zona 6 – Ghiaia.

La Carta dei Vincoli geomorfologici ed idraulici del PUC conferma le previsioni dell'Autorità di Bacino..









#### 4. CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE E LITOSTRATIGRAFICHE

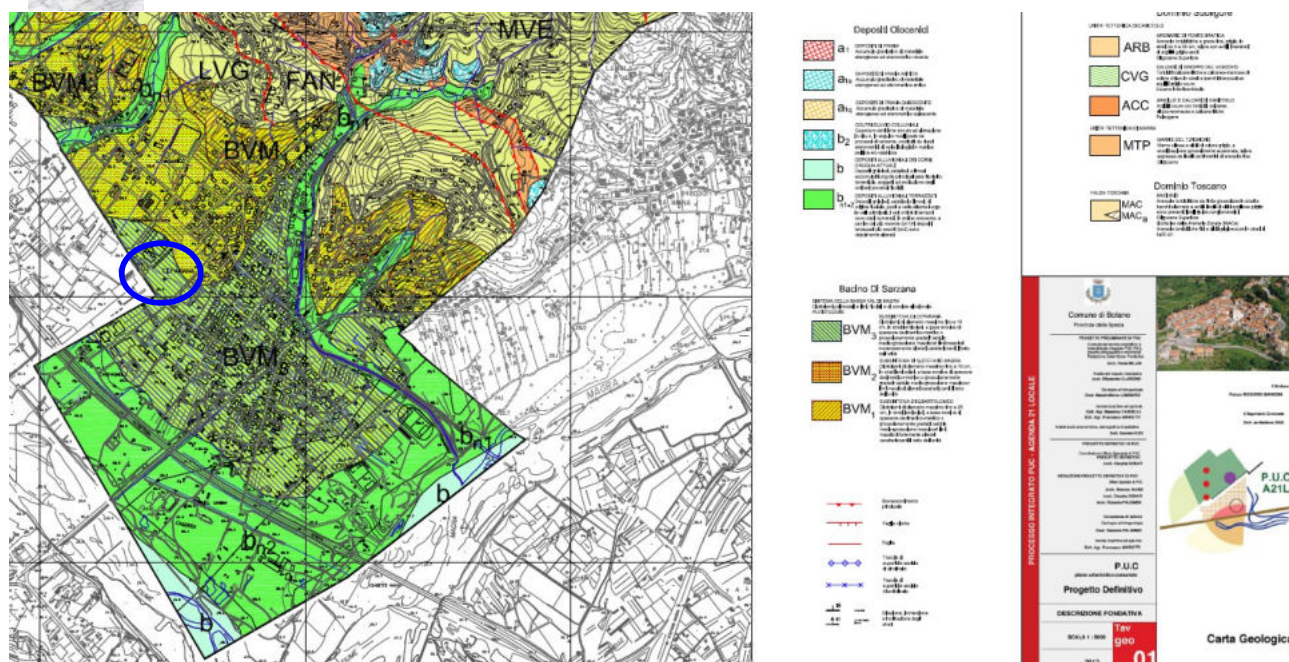
Con riferimento alla bibliografia ufficiale, rappresentata dalla Carta Geologica d'Italia Foglio "La Spezia" e, soprattutto, dal rilevamento geologico, effettuato in un'area ritenuta significativa, il terreno è rappresentato da depositi alluvionali del "Sintema della Bassa Val di Magra" (Pleistocene) ed in particolare del "subsintema di Ceparana" consistente in "ciottolami con diametro massimo fino a 15 cm, in strati



*lenticolari a base erosiva di spessore decimetrico-metrico massicci o grossolanamente gradati; sabbie medio-grossolane e massicce; limi massicci moderatamente alterati caratterizzanti il tetto dell'unità"* (da Carta Geologica d'Italia).

Anche la Carta Geologica del PUC riporta i medesimi depositi alluvionali.





Le indagini effettuate hanno mostrato la presenza, al di sotto di circa 30 cm di suolo agricolo, di depositi alluvionali consistenti in limo argilloso con clasti arenacei seguiti da livelli più limosi e da ghiaie limose, prevalenti.

Da un punto di vista tettonico nell'area non affiorano altri elementi significativi.

In generale, nell'area di interesse, ci troviamo in corrispondenza di alternanze di strati e livelli di depositi misti costituiti da ghiaie, sabbie, ciottoli e limi in percentuali diverse, eteropici, di spessore superiore ai 30 m, che costituiscono quindi il volume di interesse geologico, geotecnico e sismico.

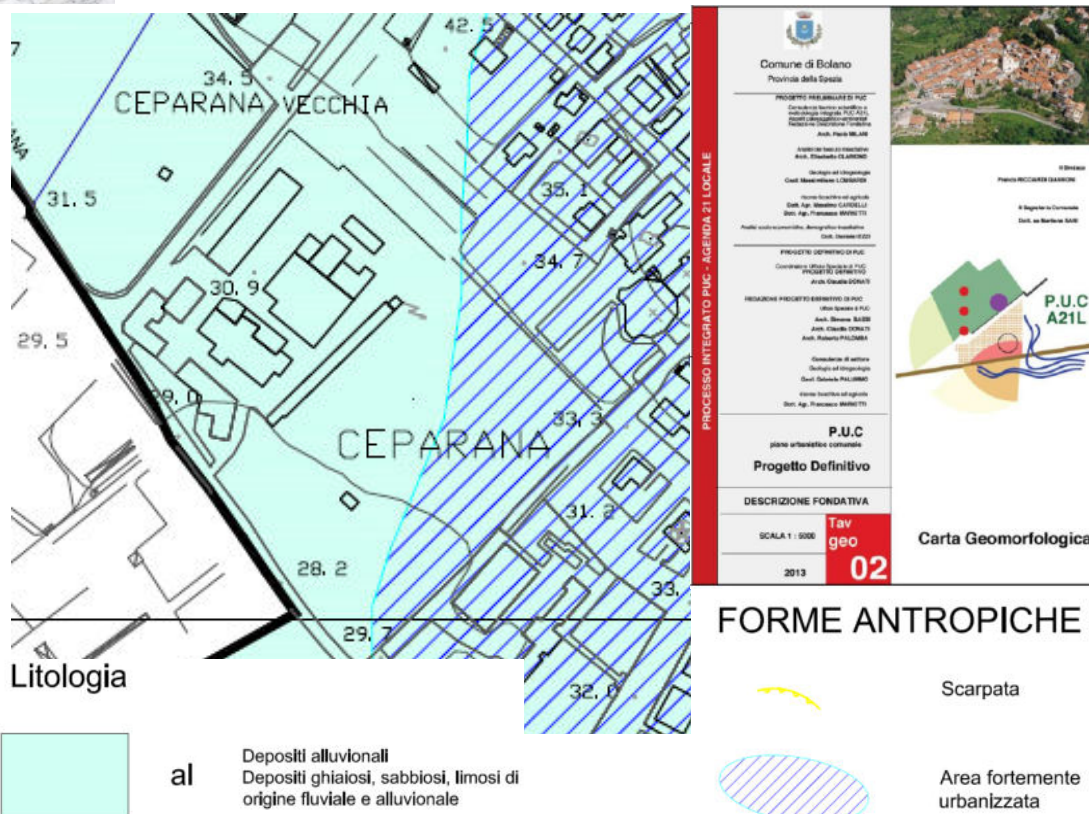
## 5. CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE

L'area in esame è situata ad una quota di circa 30÷31 m s.l.m., in corrispondenza di una pianura alluvionale con pendenze molto basse. Ci troviamo in un'area antropizzata in cui l'originaria morfologia è stata poco modificata dalla realizzazione degli edifici e delle strade.

Nella cartografia dell'Autorità di Bacino, l'area non ricade in alcuna zona classificata a pericolosità geomorfologica. La Carta Geomorfologica del PUC non evidenzia forme di rilievo.

Non si notano, all'interno dell'area di indagine, segni di dissesto, cedimenti o lesioni nel terreno.





Dal punto di vista idrogeologico non si nota la presenza di un reticolo idrografico superficiale organizzato, sono presenti solo vecchi solchi irrigui non mantenuti.

I depositi alluvionali sono permeabili per porosità (permeabilità primaria) e sono caratterizzati da valori medio-alti.

I terreni alluvionali sono sede di una falda che può arrivare a quote prossime al piano campagna in condizioni di piogge intense e persistenti, falda che ha generalmente una direzione di flusso da monte verso valle, in particolare verso il Fiume Vara, e presenta forti escursioni del livello statico.

Nell'area non sono presenti sorgenti, né si ha notizie di pozzi esistenti, esistono nelle vicinanze pozzi che sono censiti nella Carta idrogeologica del PUC.

Il PUC di Bolano riporta nell'area la profondità della falda a circa 8 metri dal piano campagna (p.c.), per quanto sia noto che tali valori siano variabili in funzione degli apporti, si nota comunque una falda abbastanza superficiale.

Nel corso delle indagini è stato misurato il livello della falda nei fori delle penetrometrie, misurando valori di 2,2 m dal p.c. nella prova P1, 4,5 m nella P2 e 3,7 m nella P3, valori che mostrano un livello statico abbastanza superficiale nonostante





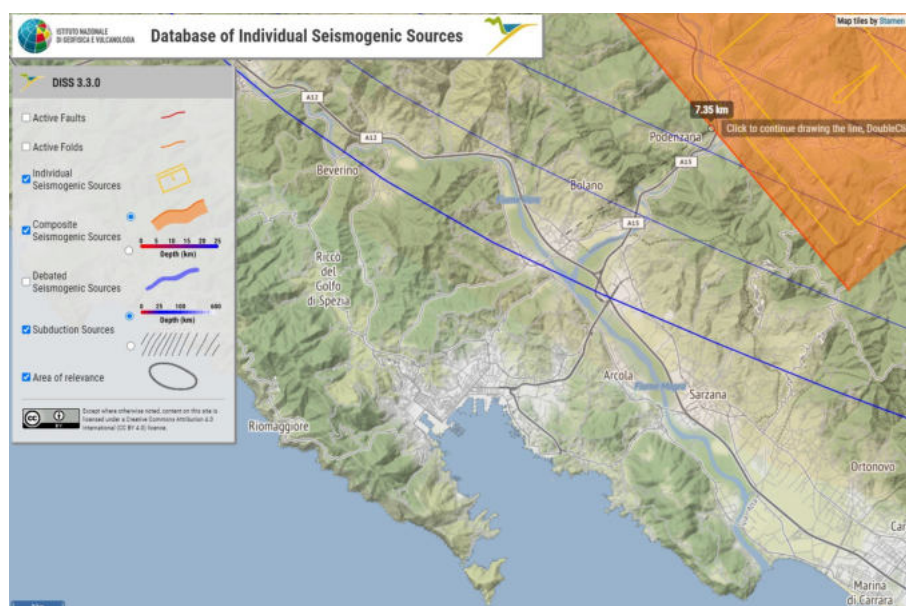
il periodo non particolarmente ricco di precipitazioni, anzi a poco tempo da un periodo siccitoso.



## 6. NORME SISMICHE

Il Comune di Bolano, in base al DGR 216 del 13.03.2017 Regione Liguria, viene classificato come “Zona 2” con accelerazione di gravità  $pga=0,25g$ .

Ci troviamo in prossimità di zone sismogenetiche, così come riportato nel database DISS dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Come evidenziato dall'immagine successiva tratta dal WebGis di DISS, ci troviamo ad una distanza di circa 7 Km dalla sorgente sismogenetica più vicina.





Il catalogo ISPRA delle faglie attive e capaci ITHACA, non riporta faglie che attraversano l'area, siamo a oltre un chilometro di distanza dalla Faglia Magra 2, diretta, sulla quale si hanno però poche informazioni sulla capacità (*low reliability capability consensus and low study quality* – da sito ITHACA).



I recenti approfondimenti dell'Università di Genova hanno evidenziato l'assenza di Faglie Attive e Capaci in Liguria, sono presenti solo Faglie potenzialmente attive e capaci.

Dalle caratteristiche geologiche dell'area, con velocità delle onde s misurate con tecniche MASW e HVSr, oltre ad avere il profilo tomografico della rifrazione in onde s, pari a  $v_{seq}=v_{s30}=421\div424$  m/s, con substrato sismico situato a profondità oltre i 30 m (indicativamente alla profondità di circa 40 m, da verificare), l'area è caratterizzata da terreni riconducibili a terreni di tipo B secondo il D.M. 17.01.2018, riferita al piano campagna, è caratterizzata da terreni con crescita regolare della velocità delle onde s.

Per quanto riguarda il pericolo di liquefazione, esso risulta poco probabile viste le granulometrie dei depositi, vista la presenza di materiali grossolani (ghiaie e ciottoli) e, in minor misura, materiali fini coesivi (limi e minori argille), si ricade al di fuori del fuso granulometrico critico indicato dal D.M.17.01.2018 (NTC18).

L'amplificazione topografica dell'area può essere in classe T1.





La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica del PUC indica l'area come B – Zone Stabili suscettibili di amplificazione - Zona 6 – Ghiaia.

## 7. ZONIZZAZIONE E SUSCETTIVITÀ D'USO DEL TERRITORIO

Gli studi sono stati condotti in base alla Circolare n.4551 del 12/12/1989 e della DGR 714/11. L'area è costituita da una pianura alluvionale pedemontana, quindi ricadente nella categoria AP della circolare 4551, quindi in cui le problematiche possono essere sostanzialmente di tipo geotecnico/sismico.

La stratigrafia vede, al di sotto di un sottile strato legato alle attività agricole, terreni alluvionali costituiti da livelli e strati di ghiaie, limi e sabbie, con ciottoli, con eteropie di facies, di spessore rilevante, sicuramente superiore ai 30 m, con substrato, sia roccioso che sismico, che si trova a profondità di 40 m o oltre.

L'area si presenta omogenea sia dal punto di vista morfologico, siamo in pianura, che litologico, con normali strati e livelli eteropici, come evidente dalle tomografie sismiche eseguite.

Ci troviamo quindi in una Zona B1, Zona stabile suscettibile di amplificazioni locali per litologia. Siamo in presenza di depositi alluvionali pleistocenici con spessori superiori ai 30 m con generale incremento della velocità delle onde s con la profondità, velocità che pone i terreni nella categoria di terreno B.

I terreni sono sede di una falda che ha una elevata escursione del suo livello statico, anche di diversi metri, che può avvicinarsi al piano campagna in occasione di piogge intense e persistenti.

Non sono presenti Faglie Attive e Capaci nell'area e la granulometria dei depositi è esterna ai fusi critici per il fenomeno della liquefazione.

La DGR 714/11 indica chiaramente che gli approfondimenti di II° livello di microzonazione sismica *“devono essere svolti unicamente negli areali caratterizzati da oggettiva disomogeneità locale in termini litologici o morfologici ovvero su progetti attuativi che riguardino estensioni territoriali rilevanti, comunque superiori ai 5 ha”*, di conseguenza in questo caso tali approfondimenti non devono essere svolti.



Normativa geologica d'attuazione:

Vista la situazione geologica *s.l.*, gli approfondimenti in fase progettuale di ogni singolo intervento dovranno essere focalizzati sugli aspetti geotecnico-sismici. Dovrà quindi essere descritto il Modello Geologico ai sensi delle Norme Tecniche sulle Costruzioni, eseguendo una campagna di indagini geognostiche dirette ed indirette che verranno individuate dal geologo incaricato in funzione delle caratteristiche del singolo intervento, generalmente consistenti in sondaggi a carotaggio continuo e relative prove in foro, eventuali analisi di laboratorio anche cicliche, prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH, sismiche a rifrazione, MASW, Down-Hole e/o Cross-Hole. Le indagini dovranno essere il supporto per la corretta parametrizzazione geotecnica del terreno e della Risposta Sismica Locale, eventualmente, solo se possibile, anche con il metodo semplificato delle categorie di suolo.

Il Modello Geologico e quello Geotecnico serviranno di base per le verifiche di stabilità dei fronti di scavo ove previsti, in condizioni dinamiche e di completa saturazione, le relazioni con la falda e la sua protezione, la non interferenza con i manufatti adiacenti.

## 8. CONCLUSIONI

A conclusione dell'indagine, sulla risultanza delle varie osservazioni effettuate, si ritiene l'area idonea dal punto di vista geologico al Piano Urbanistico Operativo, attenendosi alle indicazioni della presente relazione, compatibile con i vincoli e le classificazioni dell'area.

Si è evidenziata la stratigrafia dell'area consistente nel “*Sintema della Bassa Val di Magra*” (Pleistocene), costituiti da “*ciottolami polimodali e limi, fluviali e di conoide alluvionale*” nel particolare sono presenti depositi del “*subsintema di Ceparana*” costituiti da “*conglomerati con diametro massimo fino a 15 cm, in strati lenticolari a base erosiva di spessore decimetrico-metrico massicci o grossolanamente gradati; sabbie medio-grossolane e massicce; limi massicci moderatamente alterati caratterizzanti il tetto dell'unità*”; si tratta di depositi





prevalentemente ghiaioso-sabbiosi con limi e ciottoli in presenza di falda che in condizioni di piogge intense e persistenti può arrivare a quote prossime al piano campagna.

Siamo in un'area di pianura, in Zona Stabile suscettibile di amplificazioni locali, in cui andranno puntualmente verificate le condizioni geotecniche e sismiche anche con la realizzazione di apposite campagne geognostiche, con prove dirette ed indirette.

Si raccomanda la manutenzione necessaria al mantenimento delle condizioni di stabilità e il controllo della regimazione delle acque.

Per ogni chiarimento si resta a disposizione.

La Spezia, 15 maggio 2023

Geol. Carlo Malgarotto



## Allegato "a" Planimetria geologica



da rilievo originale su catastale, modificato, scala arbitraria



Subsistema di Ceparana

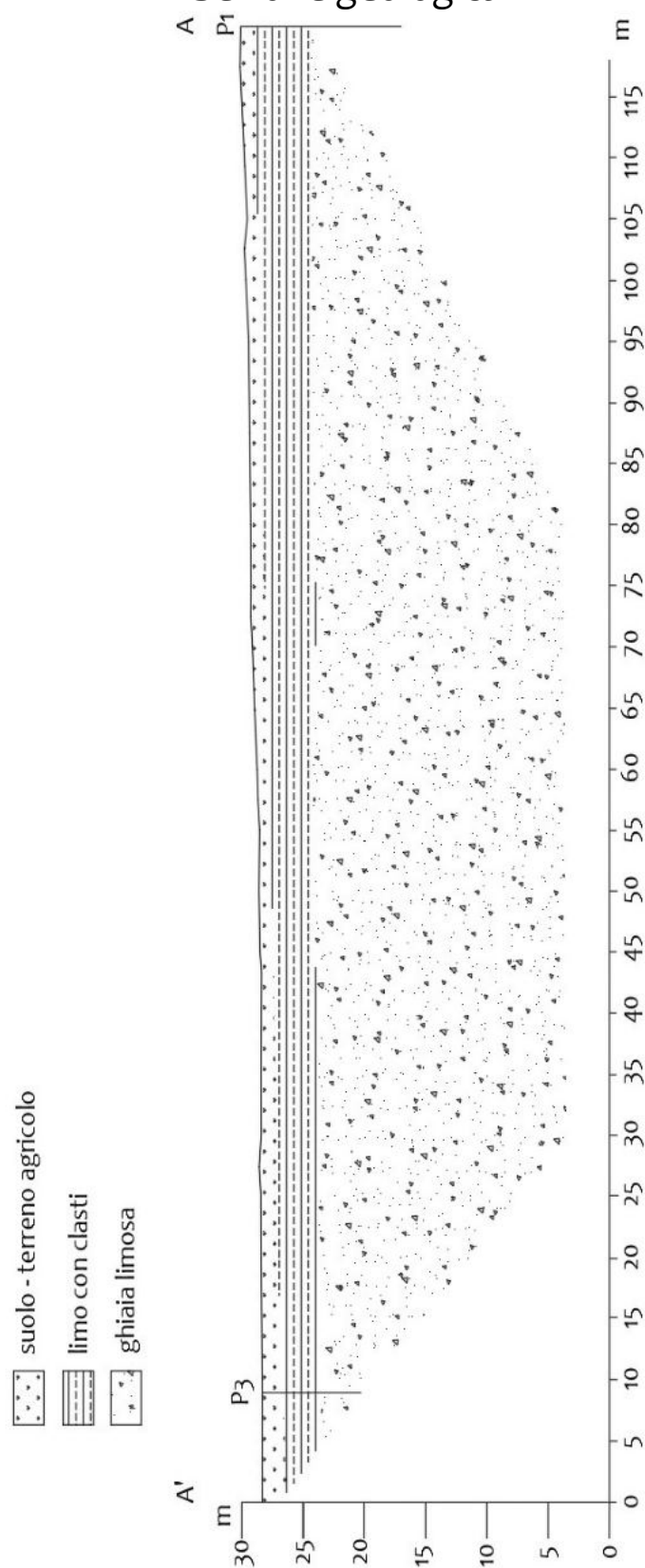


traccia sezione





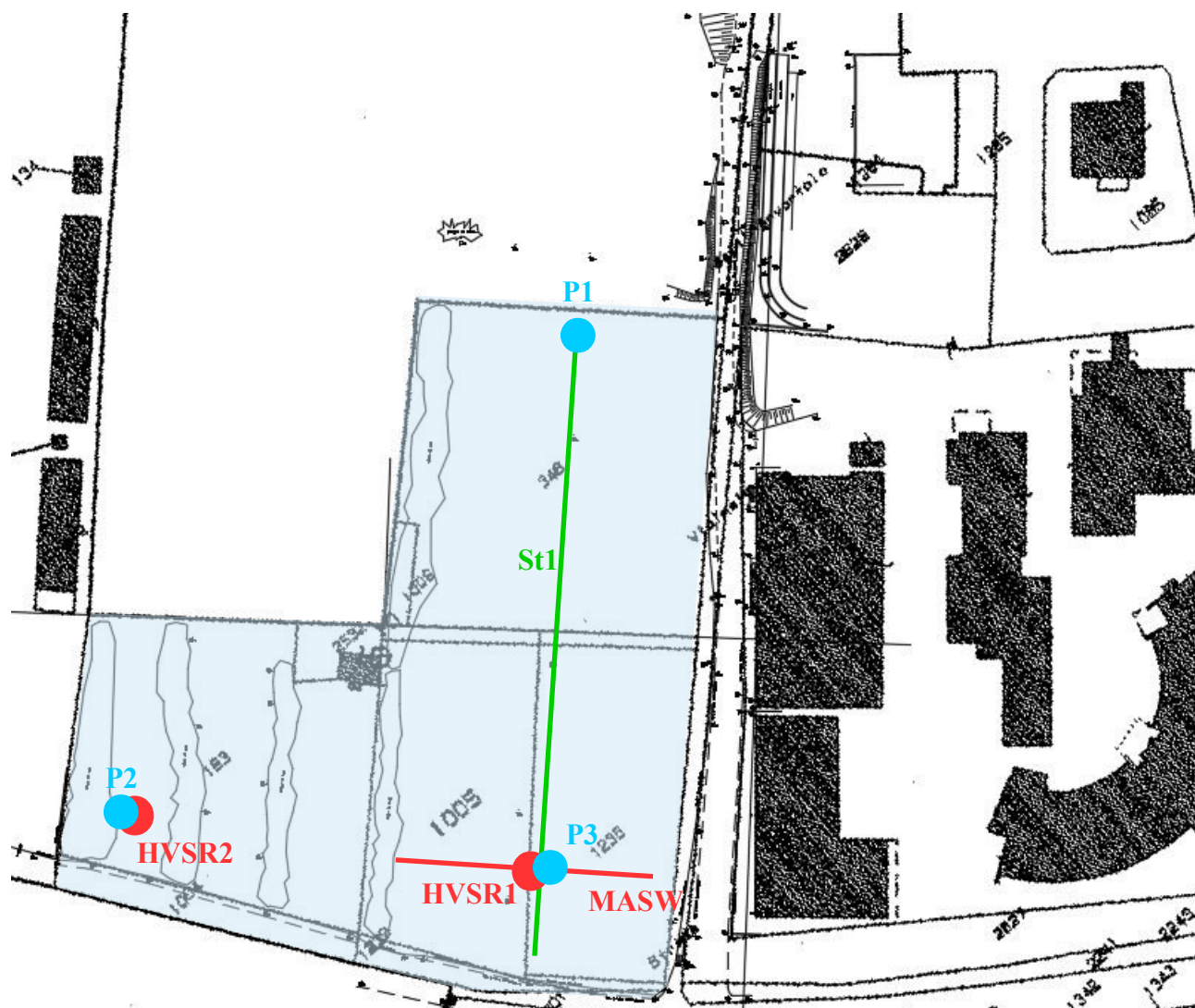
## Allegato "b" Sezione geologica



tratto da sezione sismica, modificato, scala arbitraria



## Allegato "c" carta di analisi



da rilievo originale su catastale, modificato, scala arbitraria



Zona Unica B1: depositi pleistocenici ghiaioso-sabbiosi con ciottoli e limi, in falda, zona stabile suscettibile di amplificazioni locali per litologia

**HVSRI**



misure sismiche HVSRI

**St1**



stesa sismica a rifrazione onde p + s

**MASW**



misura sismica MASW

**P1**

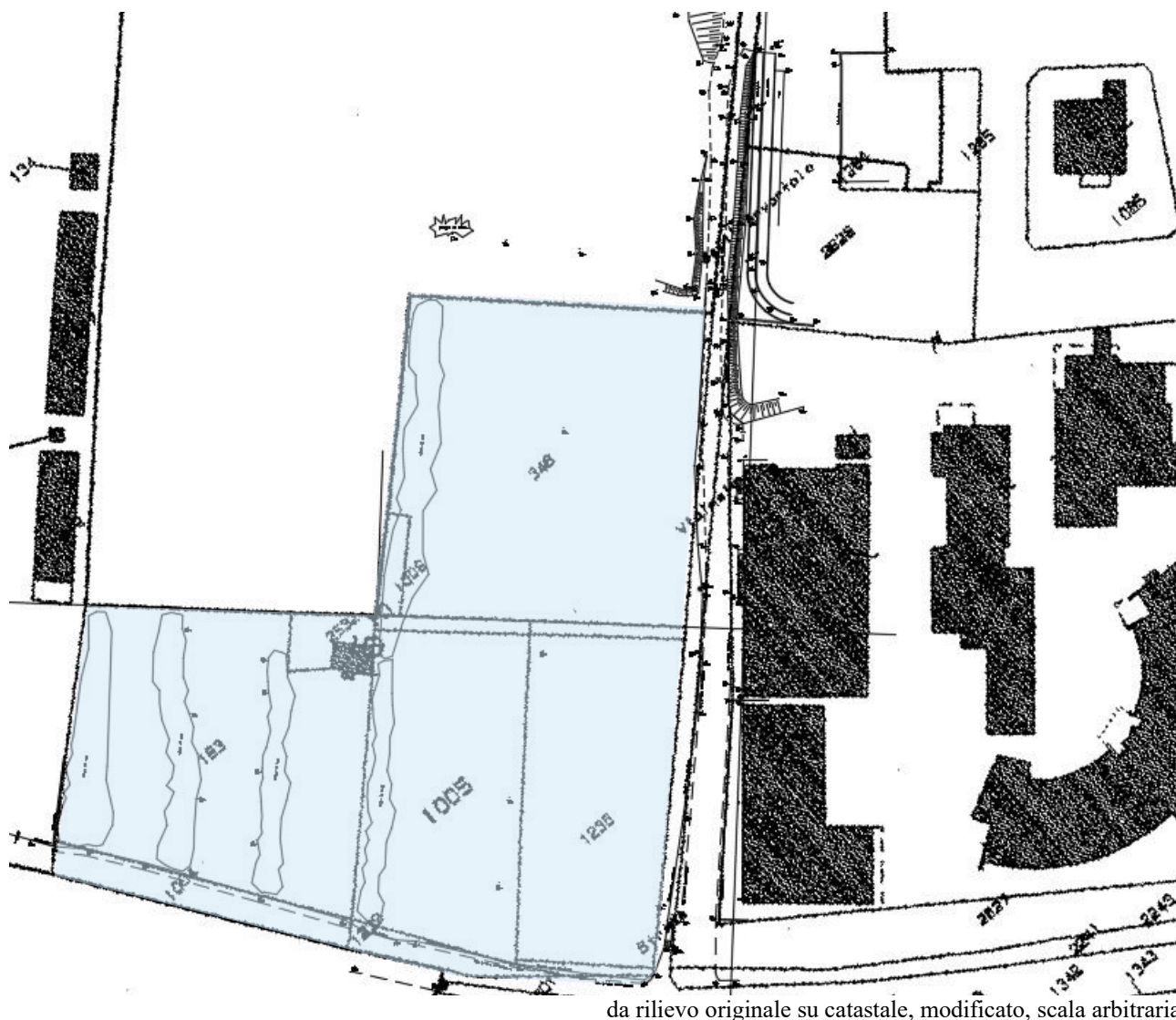


Prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH





## Allegato "d" carta di sintesi



da rilievo originale su catastale, modificato, scala arbitraria



**Zona B1 Stabile suscettibile di amplificazione locale**  
per ogni singolo intervento campagna geognostica con indagini dirette ed indirette individuate dal geologo incaricato volte a definire il Modello Geologico con particolare attenzione agli aspetti geotecnici e sismici, alla protezione della falda ed alle possibili interazioni con i manufatti adiacenti



## Allegato "e"

### Risultati delle indagini geognostiche

#### PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

|                                                                |  |
|----------------------------------------------------------------|--|
| Committente: Lerici srl<br>Descrizione:<br>Localita': Ceparana |  |
|----------------------------------------------------------------|--|

#### Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH TG 63-200 PAGANI

|                                  |                       |
|----------------------------------|-----------------------|
| Rif. Norme                       | DIN 4094              |
| Peso Massa battente              | 63.5 Kg               |
| Altezza di caduta libera         | 0.75 m                |
| Peso sistema di battuta          | 0.63 Kg               |
| Diametro punta conica            | 51.00 mm              |
| Area di base punta               | 20.43 cm <sup>2</sup> |
| Lunghezza delle aste             | 1 m                   |
| Peso aste a metro                | 6.31 Kg/m             |
| Profondita' giunzione prima asta | 0.40 m                |
| Avanzamento punta                | 0.20 m                |
| Numero colpi per punta           | N(20)                 |
| Coeff. Correlazione              | 1.47                  |
| Rivestimento/fanghi              | No                    |
| Angolo di apertura punta         | 90 °                  |

#### PROVA ... Nr.1

Strumento utilizzato...DPSH TG 63-200 PAGANI

Prova eseguita in data 05-05-2023

Profondita' prova 13.00 mt

Falda rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondita' (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Mpa) | Res. dinamica (Mpa) | Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (KPa) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (KPa) |
|-----------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0.20            | 4         | 0.855                              | 3.52                        | 4.12                | 176.13                                                     | 206.08                                       |
| 0.40            | 4         | 0.851                              | 3.51                        | 4.12                | 175.33                                                     | 206.08                                       |
| 0.60            | 2         | 0.847                              | 1.60                        | 1.89                | 80.10                                                      | 94.57                                        |
| 0.80            | 3         | 0.843                              | 2.39                        | 2.84                | 119.63                                                     | 141.85                                       |
| 1.00            | 7         | 0.840                              | 5.56                        | 6.62                | 277.95                                                     | 330.99                                       |
| 1.20            | 8         | 0.836                              | 6.33                        | 7.57                | 316.34                                                     | 378.28                                       |
| 1.40            | 6         | 0.833                              | 4.73                        | 5.67                | 236.29                                                     | 283.71                                       |





|       |    |       |      |       |        |        |
|-------|----|-------|------|-------|--------|--------|
| 1.60  | 5  | 0.830 | 3.62 | 4.37  | 181.23 | 218.46 |
| 1.80  | 5  | 0.826 | 3.61 | 4.37  | 180.52 | 218.46 |
| 2.00  | 5  | 0.823 | 3.60 | 4.37  | 179.84 | 218.46 |
| 2.20  | 4  | 0.820 | 2.87 | 3.50  | 143.33 | 174.77 |
| 2.40  | 7  | 0.817 | 5.00 | 6.12  | 249.92 | 305.85 |
| 2.60  | 5  | 0.814 | 3.31 | 4.06  | 165.32 | 203.04 |
| 2.80  | 5  | 0.811 | 3.30 | 4.06  | 164.75 | 203.04 |
| 3.00  | 5  | 0.809 | 3.28 | 4.06  | 164.19 | 203.04 |
| 3.20  | 6  | 0.806 | 3.93 | 4.87  | 196.38 | 243.65 |
| 3.40  | 3  | 0.803 | 1.96 | 2.44  | 97.87  | 121.82 |
| 3.60  | 4  | 0.801 | 2.43 | 3.03  | 121.51 | 151.72 |
| 3.80  | 4  | 0.798 | 2.42 | 3.03  | 121.13 | 151.72 |
| 4.00  | 4  | 0.796 | 2.42 | 3.03  | 120.77 | 151.72 |
| 4.20  | 2  | 0.794 | 1.20 | 1.52  | 60.21  | 75.86  |
| 4.40  | 2  | 0.791 | 1.20 | 1.52  | 60.04  | 75.86  |
| 4.60  | 2  | 0.789 | 1.12 | 1.42  | 56.17  | 71.17  |
| 4.80  | 3  | 0.787 | 1.68 | 2.13  | 84.02  | 106.75 |
| 5.00  | 3  | 0.785 | 1.68 | 2.13  | 83.80  | 106.75 |
| 5.20  | 5  | 0.783 | 2.79 | 3.56  | 139.31 | 177.92 |
| 5.40  | 4  | 0.781 | 2.22 | 2.85  | 111.17 | 142.33 |
| 5.60  | 5  | 0.779 | 2.61 | 3.35  | 130.54 | 167.55 |
| 5.80  | 6  | 0.777 | 3.13 | 4.02  | 156.28 | 201.06 |
| 6.00  | 11 | 0.775 | 5.72 | 7.37  | 285.85 | 368.61 |
| 6.20  | 10 | 0.774 | 5.19 | 6.70  | 259.27 | 335.10 |
| 6.40  | 8  | 0.772 | 4.14 | 5.36  | 206.96 | 268.08 |
| 6.60  | 7  | 0.770 | 3.42 | 4.43  | 170.75 | 221.65 |
| 6.80  | 12 | 0.769 | 5.84 | 7.60  | 292.11 | 379.98 |
| 7.00  | 18 | 0.717 | 8.18 | 11.40 | 408.77 | 569.97 |
| 7.20  | 19 | 0.716 | 8.61 | 12.03 | 430.56 | 601.63 |
| 7.40  | 21 | 0.664 | 8.83 | 13.30 | 441.64 | 664.96 |
| 7.60  | 18 | 0.713 | 7.70 | 10.80 | 385.02 | 540.23 |
| 7.80  | 15 | 0.711 | 6.40 | 9.00  | 320.21 | 450.19 |
| 8.00  | 13 | 0.710 | 5.54 | 7.80  | 276.98 | 390.16 |
| 8.20  | 13 | 0.709 | 5.53 | 7.80  | 276.46 | 390.16 |
| 8.40  | 10 | 0.757 | 4.55 | 6.00  | 227.27 | 300.13 |
| 8.60  | 11 | 0.756 | 4.74 | 6.28  | 237.20 | 313.76 |
| 8.80  | 17 | 0.705 | 6.83 | 9.70  | 341.72 | 484.91 |
| 9.00  | 17 | 0.703 | 6.82 | 9.70  | 341.13 | 484.91 |
| 9.20  | 25 | 0.652 | 9.30 | 14.26 | 465.15 | 713.10 |
| 9.40  | 26 | 0.651 | 9.66 | 14.83 | 482.88 | 741.63 |
| 9.60  | 21 | 0.650 | 7.42 | 11.41 | 370.93 | 570.70 |
| 9.80  | 22 | 0.649 | 7.76 | 11.96 | 387.91 | 597.88 |
| 10.00 | 22 | 0.648 | 7.74 | 11.96 | 387.25 | 597.88 |
| 10.20 | 13 | 0.697 | 4.92 | 7.07  | 246.10 | 353.29 |
| 10.40 | 12 | 0.746 | 4.86 | 6.52  | 243.12 | 326.12 |
| 10.60 | 12 | 0.744 | 4.64 | 6.23  | 231.82 | 311.40 |
| 10.80 | 10 | 0.743 | 3.86 | 5.19  | 192.91 | 259.50 |
| 11.00 | 12 | 0.742 | 4.62 | 6.23  | 231.17 | 311.40 |
| 11.20 | 10 | 0.741 | 3.85 | 5.19  | 192.37 | 259.50 |
| 11.40 | 14 | 0.690 | 5.02 | 7.27  | 250.78 | 363.30 |



|       |     |       |       |       |         |         |
|-------|-----|-------|-------|-------|---------|---------|
| 11.60 | 18  | 0.689 | 6.16  | 8.94  | 308.05  | 446.94  |
| 11.80 | 16  | 0.688 | 5.47  | 7.95  | 273.42  | 397.28  |
| 12.00 | 12  | 0.737 | 4.39  | 5.96  | 219.66  | 297.96  |
| 12.20 | 16  | 0.686 | 5.45  | 7.95  | 272.61  | 397.28  |
| 12.40 | 12  | 0.735 | 4.38  | 5.96  | 219.05  | 297.96  |
| 12.60 | 19  | 0.684 | 6.19  | 9.04  | 309.40  | 452.24  |
| 12.80 | 31  | 0.583 | 8.61  | 14.76 | 430.27  | 737.87  |
| 13.00 | 100 | 0.532 | 25.33 | 47.60 | 1266.51 | 2380.22 |



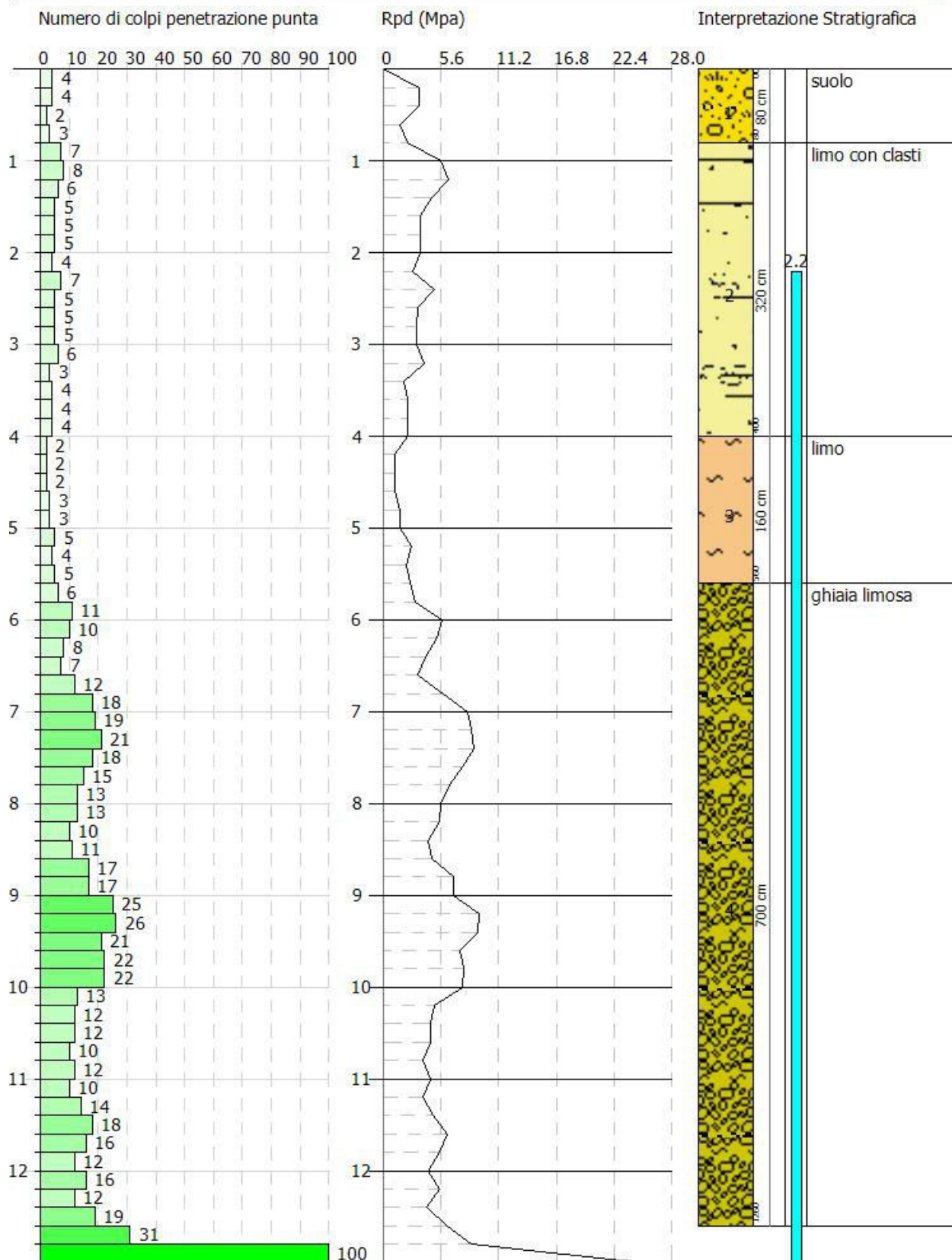




PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.1  
Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI

Committente: Lerici srl  
Descrizione:  
Localita': Ceparana

Scala 1:59



**PROVA ... Nr.2**

Strumento utilizzato...DPSH TG 63-200 PAGANI

Prova eseguita in data 05-05-2023

Profondita' prova 9.00 mt

Falda rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondita' (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Mpa) | Res. dinamica (Mpa) | Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (KPa) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (KPa) |
|-----------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0.20            | 1         | 0.855                              | 0.88                        | 1.03                | 44.03                                                      | 51.52                                        |
| 0.40            | 4         | 0.851                              | 3.51                        | 4.12                | 175.33                                                     | 206.08                                       |
| 0.60            | 3         | 0.847                              | 2.40                        | 2.84                | 120.15                                                     | 141.85                                       |
| 0.80            | 3         | 0.843                              | 2.39                        | 2.84                | 119.63                                                     | 141.85                                       |
| 1.00            | 3         | 0.840                              | 2.38                        | 2.84                | 119.12                                                     | 141.85                                       |
| 1.20            | 5         | 0.836                              | 3.95                        | 4.73                | 197.71                                                     | 236.42                                       |
| 1.40            | 14        | 0.783                              | 10.36                       | 13.24               | 518.25                                                     | 661.99                                       |
| 1.60            | 9         | 0.830                              | 6.52                        | 7.86                | 326.21                                                     | 393.23                                       |
| 1.80            | 7         | 0.826                              | 5.05                        | 6.12                | 252.73                                                     | 305.85                                       |
| 2.00            | 8         | 0.823                              | 5.75                        | 6.99                | 287.74                                                     | 349.54                                       |
| 2.20            | 4         | 0.820                              | 2.87                        | 3.50                | 143.33                                                     | 174.77                                       |
| 2.40            | 6         | 0.817                              | 4.28                        | 5.24                | 214.22                                                     | 262.16                                       |
| 2.60            | 7         | 0.814                              | 4.63                        | 5.69                | 231.45                                                     | 284.25                                       |
| 2.80            | 4         | 0.811                              | 2.64                        | 3.25                | 131.80                                                     | 162.43                                       |
| 3.00            | 3         | 0.809                              | 1.97                        | 2.44                | 98.52                                                      | 121.82                                       |
| 3.20            | 3         | 0.806                              | 1.96                        | 2.44                | 98.19                                                      | 121.82                                       |
| 3.40            | 3         | 0.803                              | 1.96                        | 2.44                | 97.87                                                      | 121.82                                       |
| 3.60            | 4         | 0.801                              | 2.43                        | 3.03                | 121.51                                                     | 151.72                                       |
| 3.80            | 4         | 0.798                              | 2.42                        | 3.03                | 121.13                                                     | 151.72                                       |
| 4.00            | 4         | 0.796                              | 2.42                        | 3.03                | 120.77                                                     | 151.72                                       |
| 4.20            | 2         | 0.794                              | 1.20                        | 1.52                | 60.21                                                      | 75.86                                        |
| 4.40            | 3         | 0.791                              | 1.80                        | 2.28                | 90.06                                                      | 113.79                                       |
| 4.60            | 3         | 0.789                              | 1.69                        | 2.13                | 84.25                                                      | 106.75                                       |
| 4.80            | 5         | 0.787                              | 2.80                        | 3.56                | 140.04                                                     | 177.92                                       |
| 5.00            | 4         | 0.785                              | 2.23                        | 2.85                | 111.73                                                     | 142.33                                       |
| 5.20            | 10        | 0.783                              | 5.57                        | 7.12                | 278.62                                                     | 355.83                                       |
| 5.40            | 15        | 0.731                              | 7.80                        | 10.67               | 390.19                                                     | 533.75                                       |
| 5.60            | 10        | 0.779                              | 5.22                        | 6.70                | 261.09                                                     | 335.10                                       |
| 5.80            | 14        | 0.727                              | 6.82                        | 9.38                | 341.19                                                     | 469.14                                       |
| 6.00            | 14        | 0.725                              | 6.81                        | 9.38                | 340.35                                                     | 469.14                                       |
| 6.20            | 11        | 0.774                              | 5.70                        | 7.37                | 285.20                                                     | 368.61                                       |
| 6.40            | 18        | 0.722                              | 8.71                        | 12.06               | 435.50                                                     | 603.18                                       |
| 6.60            | 17        | 0.720                              | 7.76                        | 10.77               | 387.77                                                     | 538.30                                       |
| 6.80            | 17        | 0.719                              | 7.74                        | 10.77               | 386.90                                                     | 538.30                                       |
| 7.00            | 26        | 0.667                              | 10.99                       | 16.47               | 549.28                                                     | 823.29                                       |





|      |     |       |       |       |         |         |
|------|-----|-------|-------|-------|---------|---------|
| 7.20 | 15  | 0.716 | 6.80  | 9.50  | 339.91  | 474.97  |
| 7.40 | 6   | 0.764 | 2.90  | 3.80  | 145.18  | 189.99  |
| 7.60 | 13  | 0.713 | 5.56  | 7.80  | 278.07  | 390.16  |
| 7.80 | 11  | 0.761 | 5.03  | 6.60  | 251.33  | 330.14  |
| 8.00 | 12  | 0.760 | 5.47  | 7.20  | 273.68  | 360.15  |
| 8.20 | 16  | 0.709 | 6.81  | 9.60  | 340.25  | 480.20  |
| 8.40 | 28  | 0.657 | 11.05 | 16.81 | 552.32  | 840.35  |
| 8.60 | 33  | 0.606 | 11.41 | 18.83 | 570.40  | 941.29  |
| 8.80 | 34  | 0.605 | 11.73 | 19.40 | 586.46  | 969.82  |
| 9.00 | 100 | 0.553 | 31.58 | 57.05 | 1578.77 | 2852.41 |

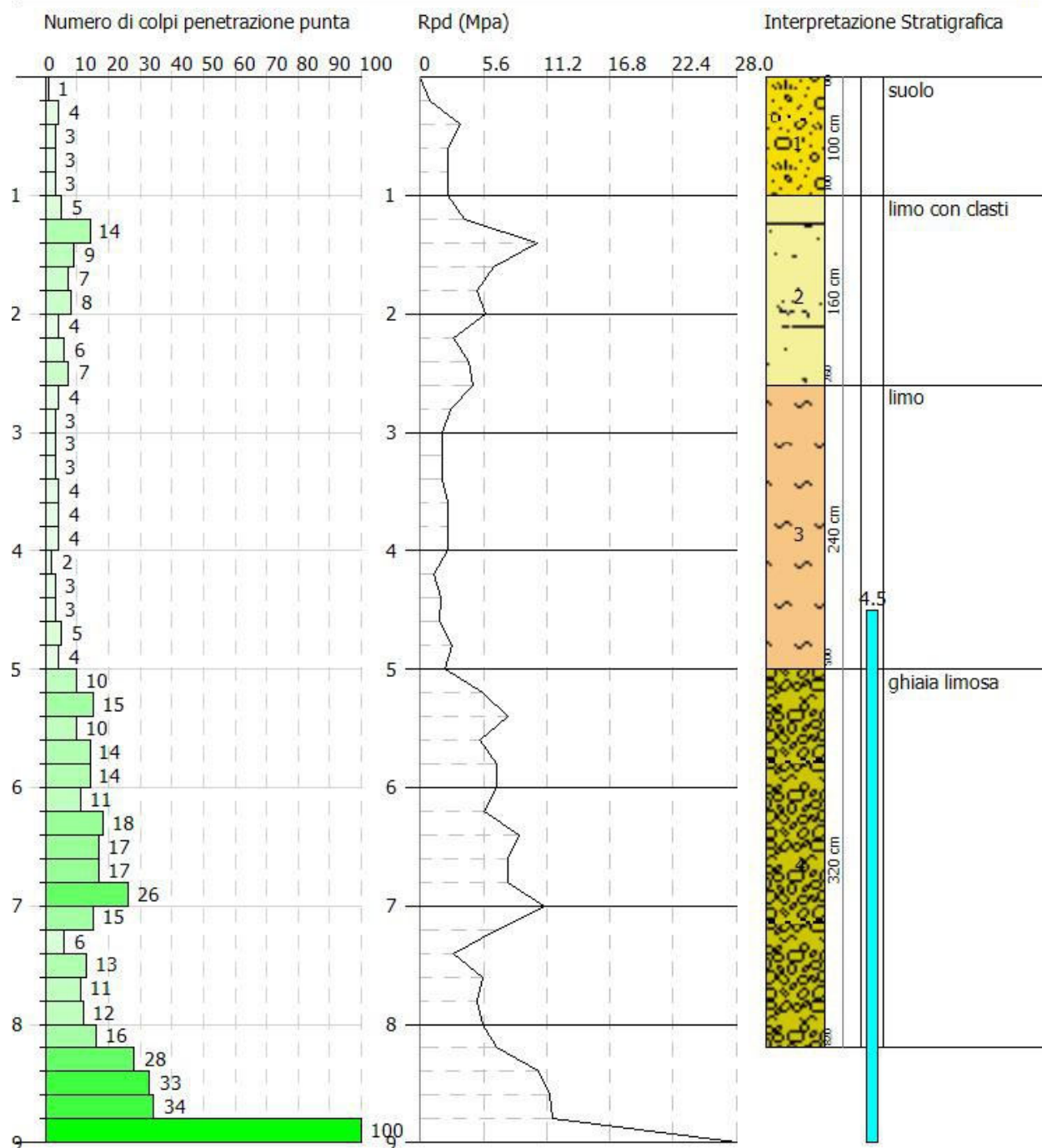




PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.2  
Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI

Committente: Lerici srl  
Descrizione:  
Localita': Ceparana

Scala 1:50







## PROVA ... Nr.3

Strumento utilizzato...DPSH TG 63-200 PAGANI

Prova eseguita in data 05-05-2023

Profondita' prova 8.40 mt

Falda rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondita' (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Mpa) | Res. dinamica (Mpa) | Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (KPa) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (KPa) |
|-----------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0.20            | 3         | 0.855                              | 2.64                        | 3.09                | 132.09                                                     | 154.56                                       |
| 0.40            | 3         | 0.851                              | 2.63                        | 3.09                | 131.50                                                     | 154.56                                       |
| 0.60            | 2         | 0.847                              | 1.60                        | 1.89                | 80.10                                                      | 94.57                                        |
| 0.80            | 1         | 0.843                              | 0.80                        | 0.95                | 39.88                                                      | 47.28                                        |
| 1.00            | 1         | 0.840                              | 0.79                        | 0.95                | 39.71                                                      | 47.28                                        |
| 1.20            | 1         | 0.836                              | 0.79                        | 0.95                | 39.54                                                      | 47.28                                        |
| 1.40            | 1         | 0.833                              | 0.79                        | 0.95                | 39.38                                                      | 47.28                                        |
| 1.60            | 2         | 0.830                              | 1.45                        | 1.75                | 72.49                                                      | 87.39                                        |
| 1.80            | 5         | 0.826                              | 3.61                        | 4.37                | 180.52                                                     | 218.46                                       |
| 2.00            | 5         | 0.823                              | 3.60                        | 4.37                | 179.84                                                     | 218.46                                       |
| 2.20            | 5         | 0.820                              | 3.58                        | 4.37                | 179.17                                                     | 218.46                                       |
| 2.40            | 4         | 0.817                              | 2.86                        | 3.50                | 142.81                                                     | 174.77                                       |
| 2.60            | 4         | 0.814                              | 2.65                        | 3.25                | 132.26                                                     | 162.43                                       |
| 2.80            | 3         | 0.811                              | 1.98                        | 2.44                | 98.85                                                      | 121.82                                       |
| 3.00            | 3         | 0.809                              | 1.97                        | 2.44                | 98.52                                                      | 121.82                                       |
| 3.20            | 3         | 0.806                              | 1.96                        | 2.44                | 98.19                                                      | 121.82                                       |
| 3.40            | 6         | 0.803                              | 3.91                        | 4.87                | 195.75                                                     | 243.65                                       |
| 3.60            | 3         | 0.801                              | 1.82                        | 2.28                | 91.13                                                      | 113.79                                       |
| 3.80            | 5         | 0.798                              | 3.03                        | 3.79                | 151.42                                                     | 189.65                                       |
| 4.00            | 5         | 0.796                              | 3.02                        | 3.79                | 150.96                                                     | 189.65                                       |
| 4.20            | 6         | 0.794                              | 3.61                        | 4.55                | 180.63                                                     | 227.58                                       |
| 4.40            | 4         | 0.791                              | 2.40                        | 3.03                | 120.08                                                     | 151.72                                       |
| 4.60            | 4         | 0.789                              | 2.25                        | 2.85                | 112.33                                                     | 142.33                                       |
| 4.80            | 6         | 0.787                              | 3.36                        | 4.27                | 168.04                                                     | 213.50                                       |
| 5.00            | 8         | 0.785                              | 4.47                        | 5.69                | 223.47                                                     | 284.66                                       |
| 5.20            | 12        | 0.783                              | 6.69                        | 8.54                | 334.34                                                     | 427.00                                       |
| 5.40            | 9         | 0.781                              | 5.00                        | 6.40                | 250.13                                                     | 320.25                                       |
| 5.60            | 10        | 0.779                              | 5.22                        | 6.70                | 261.09                                                     | 335.10                                       |
| 5.80            | 14        | 0.727                              | 6.82                        | 9.38                | 341.19                                                     | 469.14                                       |
| 6.00            | 14        | 0.725                              | 6.81                        | 9.38                | 340.35                                                     | 469.14                                       |
| 6.20            | 11        | 0.774                              | 5.70                        | 7.37                | 285.20                                                     | 368.61                                       |
| 6.40            | 13        | 0.722                              | 6.29                        | 8.71                | 314.53                                                     | 435.63                                       |
| 6.60            | 16        | 0.720                              | 7.30                        | 10.13               | 364.96                                                     | 506.64                                       |
| 6.80            | 13        | 0.719                              | 5.92                        | 8.23                | 295.87                                                     | 411.64                                       |
| 7.00            | 9         | 0.767                              | 4.37                        | 5.70                | 218.63                                                     | 284.98                                       |



|      |     |       |       |       |         |         |
|------|-----|-------|-------|-------|---------|---------|
| 7.20 | 9   | 0.766 | 4.36  | 5.70  | 218.20  | 284.98  |
| 7.40 | 10  | 0.764 | 4.84  | 6.33  | 241.97  | 316.65  |
| 7.60 | 12  | 0.763 | 5.49  | 7.20  | 274.69  | 360.15  |
| 7.80 | 8   | 0.761 | 3.66  | 4.80  | 182.79  | 240.10  |
| 8.00 | 8   | 0.760 | 3.65  | 4.80  | 182.46  | 240.10  |
| 8.20 | 19  | 0.709 | 8.08  | 11.40 | 404.05  | 570.24  |
| 8.40 | 100 | 0.557 | 33.45 | 60.03 | 1672.46 | 3001.26 |







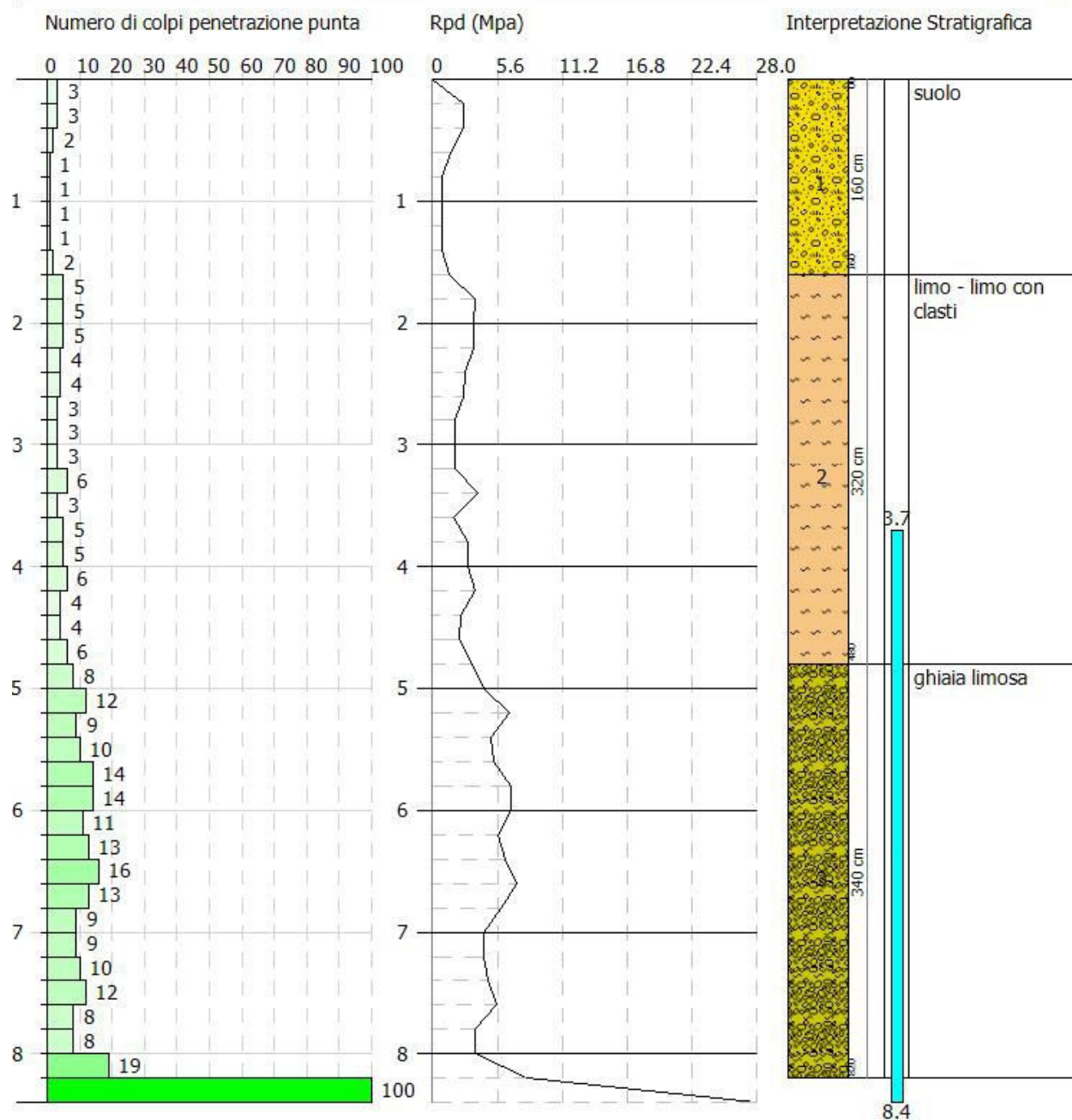
PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.3  
Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI

Committente: Lerici srl

Descrizione:

Localita': Ceparana

Scala 1:50



|                                                                                                                                                      |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| OGGETTO:<br><b>INDAGINI GEOFISICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELL'ASSETTO<br/>SISMOSTRATIGRAFICO DEI LIVELLI PIU' SUPERFICIALI DEL<br/>SOTTOSUOLO</b> |                    |
| TIPOLOGIA INDAGINI:<br><b>SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh<br/>MASW<br/>HVSr</b>                                                                  | DATA               |
|                                                                                                                                                      | <b>Maggio 2023</b> |
| LOCALITA':<br><b>COMUNE DI BOLANO (SP)<br/>FRAZIONE DI CEPARANA</b>                                                                                  |                    |
| RICHIEDENTE:<br><b>Dott. Geol. CARLO MALGAROTTO</b>                                                                                                  |                    |

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| codice documento:    | <b>j23035.05.05_cpr.doc</b> |
| versione /revisione: | <b>01</b>                   |
| stato documento:     | <b>definitivo</b>           |
| autore:              | <b>a.benvenuti</b>          |
| revisione:           | <b>v.carnicelli</b>         |
| approvazione:        | <b>v.carnicelli</b>         |
| data:                | <b>Maggio 2022</b>          |



## SOMMARIO

|     |                                                                              |   |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1   | PREMESSA.....                                                                | 2 |
| 2   | TIPO D'INDAGINE.....                                                         | 2 |
| 2.1 | STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....                                              | 3 |
| 3   | INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE ... | 3 |
| 3.1 | INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE .....                              | 4 |
| 3.2 | INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE .....                              | 6 |
| 4   | RISULTATI.....                                                               | 7 |
| 4.1 | INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh.....                            | 7 |
| 4.2 | INDAGINE MASW .....                                                          | 8 |
| 4.3 | INDAGINI HVSR.....                                                           | 9 |

## 1 PREMESSA

Su richiesta del dott. Geol. Carlo Malgarotto è stata eseguita un'indagine geofisica nel Comune di Bolano (SP), nella frazione di Ceparana, finalizzata alla caratterizzazione dell'assetto sismostratigrafico dei livelli più superficiali del sottosuolo e alla determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di compressione (Onde P), di taglio (Onde Sh) e al calcolo del parametro  $V_{S,eq}$ .

La campagna di indagini, svolta nel mese di Maggio 2023, è stata condotta conformemente alla vigente normativa sismica.

Nella fattispecie particolare le procedure adottate sono state eseguite in accordo con le norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

L'ubicazione delle prove è riportata nelle tavole allegate; le indagini sono state posizionate sulla base CTR - Fonte dei dati Regione Liguria integrata con un rilievo ad hoc eseguito, con sistema GPS Leica modello RX1250.

## 2 TIPO D'INDAGINE

La caratterizzazione geofisica del sottosuolo è stata effettuata mediante prospezioni geofisiche di tipo sismico; in particolare, è stato eseguito uno stendimento in sismica a rifrazione in onde P e Sh, una prospezione sismica superficiale mediante la tecnica MASW e un'indagine puntuale in sismica passiva a stazione singola.

Attraverso la metodologia della sismica a rifrazione è possibile determinare il profilo di rigidità del sito tramite la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di volume compressionali ( $v_P$ ) e delle onde di taglio ( $v_{Sh}$ ) e quindi individuare le strutture sepolte delle litologie attraversate.

L'elaborazione delle indagini in sismica a rifrazione ha permesso di ricostruire le geometrie sepolte delle strutture presenti; i dati ottenuti sono stati restituiti con elaborazione tomografica.

Per la ricostruzione del profilo verticale di velocità delle onde S e per il calcolo del parametro  $V_{S,eq}$  è stata inoltre eseguita, ortogonalmente all'allineamento in sismica a rifrazione, n. 1 prospezione sismica superficiale mediante la tecnica MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves") in onde di Rayleigh e una misura in sismica passiva a stazione singola (HVS1), quest'ultima posizionata in corrispondenza dello stendimento geofonico.

L'indagine MASW ha avuto come scopo ricostruire il profilo verticale di velocità delle onde S e calcolare il parametro  $V_{S,eq}$  verificando i risultati ottenuti attraverso l'indagine in sismica a rifrazione e approfondendo di fatto i dati ottenuti attraverso le indagini in sismica a rifrazione.

Un'ulteriore acquisizione, denominata in seguito HVS2, è stata effettuata più a ovest con il fine di estendere arealmente l'area di indagine e verificare l'omogeneità sismostratigrafica tra le due aree.

La metodologia HVS è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal microtremore ambientale che in natura esiste ovunque.

## 2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per la campagna d'indagine è costituita da:

- un sistema di acquisizione dati:
  - ◊ Sismica a rifrazione: sismografo Ambrogeo mod. ECHO 48/2012 Seismc Unit a 48 canali + 1, 24 bits; un notebook PC Windows XP con software di acquisizione Ambrogeo;
  - ◊ MASW: sismografo P.A.S.I. modello GEA24; un notebook PC Windows 10 con software di acquisizione P.A.S.I.;
- un sistema di energizzazione in grado di produrre onde elastiche ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali:
  - ◊ Sismica a rifrazione in onde P / MASW - Sistema di energizzazione ad impatto verticale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente verticalmente su piastra quadrata in Teflon® di dimensioni di 20 x 20 x 5 cm posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche compressionali;
  - ◊ Sismica a rifrazione in onde Sh - Sistema di energizzazione ad impatto orizzontale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente orizzontalmente su traversina in legno posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche di taglio.
- un sistema di ricezione costituito da:
  - ◊ sismica a rifrazione in onde P / MASW: 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz;
  - ◊ sismica a rifrazione in onde Sh: 24 geofoni orizzontali con frequenza propria di 4.5 Hz
- un sistema di trigger: consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui si colpisce la base di battuta.

La strumentazione utilizzata per la misura dei microtremiti ambientali, elaborata attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino® di *Moho srl*) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN.

## 3 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo, giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà fisiche rilevabili con la sismica a rifrazione possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e orizzontali per la generazione di onde S e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori solidali col terreno (geofoni).



L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde sismiche è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone e relativa interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone, inversione dei dati e output tomografico.

Per le analisi interpretative è stato utilizzato il software Rayfract 3.32 (Intelligent Resources Inc.) sia per la restituzione tomografica che per l'elaborazione tradizionale.

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) delle acquisizioni in sismica a rifrazione effettuate:

| <b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E SH</b> |                                                                                                                      |           |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|
| Coordinate GB Geofono G1                                                       | 1570459.7                                                                                                            | 4891002.3 | 28.44 |
| Coordinate GB Geofono G24                                                      | 1570543.1                                                                                                            | 4891081.3 | 30.07 |
| Orientazione                                                                   | SW-NE (N47)                                                                                                          |           |       |
| Lunghezza stendimento                                                          | 115 m                                                                                                                |           |       |
| Numero Geofoni                                                                 | 24                                                                                                                   |           |       |
| Distanza intergeofonica                                                        | 5 m                                                                                                                  |           |       |
| Numero punti di energizzazione lungo lo stendimento                            | 9                                                                                                                    |           |       |
| Sorgenti                                                                       | s1: -2.5 m G1; s2: G3-G4; s3: G6-G7; s4: G9-G10; s5: G12-G13; s6: G15- G16; s7: G18-G19; s8: G21-G22; s9: +2.5 m G24 |           |       |
| Durata acquisizione                                                            | 0.5 s (onde P) – 0.74 s (onde Sh)                                                                                    |           |       |
| Intervallo di campionamento                                                    | 256 $\mu$ s                                                                                                          |           |       |

L'ubicazione dei singoli geofoni, necessaria per le successive elaborazioni via software, è stata effettuata, in fase di realizzazione delle indagini, attraverso un rilievo plano-altimetrico ad hoc realizzato con GPS Leica modello RX1250.

Nella tabella in calce alla relazione sono riportate le coordinate, nel sistema Gauss Boaga, dei geofoni e degli scoppi effettuati in metri s.l.m..

### 3.1 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio Vs, sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza 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; onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs e il parametro VS,eq.

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software winMASW® Academy 2019 (*Eliosoft*).

Le acquisizioni sono state eseguite secondo le seguenti configurazioni spaziali e temporali:

| <b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW</b> |                       |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|
| Orientazione                                            | N50 (SW-NE)           |
| Coordinate GB geofono G1                                | X= 1576493 Y= 4884411 |
| Coordinate GB geofono G18                               | X= 1576528 Y= 4884440 |
| Lunghezza stendimento                                   | 46 m                  |
| Numero Geofoni                                          | 24                    |
| Distanza intergeofonica                                 | 2 m                   |
| Numero punti di energizzazione per estremo              | 3                     |
| sorgenti                                                | 2 m, 3 m, 5 m         |
| Durata acquisizione                                     | 1 s                   |
| Intervallo di campionamento                             | 0.5 ms                |

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate con sorgenti a poste agli estremi dello stendimento.

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione

teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con l'acquisizione in sismica passiva eseguito lungo lo stendimento (HVS4).

### 3.2 INDAGINE HVS4: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVS4 o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

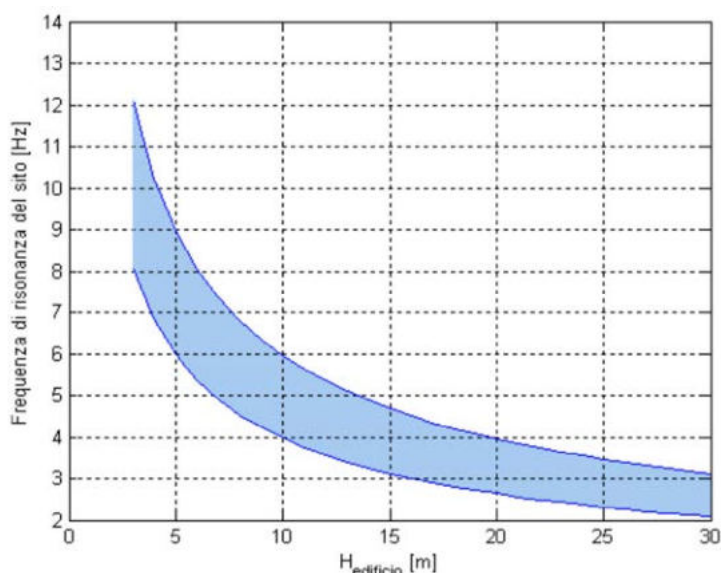
I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la velocità media delle onde di taglio  $V_s$  calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{s30}$  e la relativa categoria del suolo di fondazione;
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Per quanto concerne il fenomeno della "doppia risonanza" (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

Nella Figura seguente (tratta da Masi et al., 2007) si riporta, a titolo esemplificativo, una possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza di sito. La fascia azzurra indica l'area più vulnerabile dal punto di vista dei fenomeni di doppia risonanza.





La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

Durante questa campagna geofisica sono state eseguite due misure di microtremori ambientali (acquisizioni in sismica passiva a stazione singola) denominate in seguito HVS1 e HVS2, secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE HVS |                        |           |       |                     |                            |
|-----------------------------------------|------------------------|-----------|-------|---------------------|----------------------------|
| Denominazione                           | Coordinate Gauss Boaga |           |       | Durata acquisizione | Frequenza di campionamento |
| <b>HVS1</b>                             | 1570450.3              | 4891027.9 | 27.94 | 30 min              | 128 Hz                     |
| <b>HVS2</b>                             | 1570481.9              | 4890994.6 | 28.87 | 30 min              | 128 Hz                     |

Le misure, orientate secondo il Nord e della durata di 30 minuti ciascuna, sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino® di *Moho srl*.

I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle indagini tromografiche sono stati elaborati attraverso il software *Grilla 8.0* (MoHo srl).

## 4 RISULTATI

### 4.1 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh

Le sezioni tomografiche sono state restituite in due diversi elaborati sia per l'indagine in onde P (rif. **Figg. 5a** e **5b**) che per l'indagine in onde Sh (rif. **Figg. 6a** e **6b**).

In particolare nelle rappresentazioni delle **Figg. 5b** e **6b** sono sovrapposte alle tomografie le isolinee di uguale velocità.

La prospezione sismica ha raggiunto una profondità d'indagine massima, in corrispondenza della parte centrale della stessa, di poco superiore a circa 35 m per le onde P e di circa 25 m per le onde Sh.

In termini di velocità tomografiche, le onde P, nello spessore di sottosuolo indagato, sono comprese in un range racchiuso tra 200 m/s in superficie fino a oltre 3000 m/s più in

profondità.

L'andamento delle isotachie sismiche, riportate nella **Fig. 5b**, indica che i primi 10 - 12 m circa di sottosuolo sono caratterizzati da un incremento veloce delle velocità con la profondità (le velocità delle onde sismiche aumentano piuttosto repentinamente con la profondità) fino al raggiungimento dell'isotachia di 2000 m/s – 2200 m/s.

A di sotto le velocità tomografiche crescono con un gradiente molto più basso fino al raggiungimento dei livelli più profondi.

La sezione evidenzia la presenza di alcune anomalie positive (velocità maggiori rispetto all'intorno) e negative (velocità inferiori rispetto all'intorno) nella parte centrale della sezione. Al di sotto dell'isolinea di 3000 m/s non è stata rilevata la presenza di ulteriori anomalie.

E' possibile che, nei primi metri, le velocità siano condizionate dalla presenza di acqua nel sottosuolo.

Le elaborazioni tomografiche delle acquisizioni in onde onde Sh (**Figg. 6a e 6b**) indicano come il volume di sottosuolo indagato nei primi 5-6 m circa, sia caratterizzato da un aumento piuttosto repentino delle velocità tomografiche.

Le isolinee di uguale velocità, riportate nella **Fig. 6b**, evidenziano, in questo spessore di sottosuolo, un gradiente di velocità piuttosto accentuato con velocità che passano da 200 m/s fino a 450 m/s; al di sotto di questo livello, per uno spessore di circa 4 - 6 metri, le velocità crescono con un gradiente piuttosto basso fino a raggiungere, alla profondità di circa 8 - 10 m dal p.d.c., l'isolinea di circa 550 m/s.

Al di sotto, fino alla parte più profonda della sezione, riprendono a crescere con gradiente costante.

L'elaborazione rivela la presenza di alcune anomalie sia positive (in corrispondenza della parte centrale dello stendimento) che negative (localizzata al di sotto del tratto iniziale), individuate dall'isolinea di 500 - 550 m/s.

Dal punto di vista stratigrafico è possibile ascrivere il primo livello a terreno agricolo areato / rimaneggiato o comunque a depositi poco addensati.

A partire dall'isolinea di 500 m/s viene probabilmente intercettata la parte alterata e fratturata del substrato roccioso il cui grado di alterazione, fatto salvo le zone circoscritte in cui sono state rilevate le anomalie descritte poco sopra, decresce con la profondità.

## 4.2 INDAGINE MASW

Nel complesso le prospezioni geofisiche eseguite, per mezzo dell'analisi dell'indagine MASW e dell'acquisizione in sismica passiva HVSR1, hanno permesso di ricavare sia il modello medio di distribuzione della velocità delle onde "S" nel sottosuolo del sito indagato sia il parametro  $V_{s,eq}$ : il modello di sottosuolo in termini di  $V_s$  è stato ottenuto dal fit congiunto delle curve H/V relative a HVSR1 e delle curve di dispersione ricavate dall'indagine MASW.

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

Nella **Fig.7** è riportato il sismogramma, lo spettro di velocità e il modello di dispersione.

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:

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

in cui

- $h_i$  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 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è definita dal parametro  $V_{S,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il profilo verticale delle Onde S, in corrispondenza dell'indagine MASW, ricavato mediante elaborazione dei dati di campagna è risultato il seguente (rif. **Fig. 8**):

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | $V_s$ [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|-------------|
| 1.00                                  | 1.00         | 140         |
| 3.00                                  | 2.00         | 300         |
| 5.00                                  | 2.00         | 280         |
| 7.00                                  | 2.00         | 390         |
| 9.00                                  | 2.00         | 330         |
| 19.00                                 | 10.00        | 480         |
| 24.00                                 | 5.00         | 550         |
| 39.00                                 | 15.00        | 650         |
| inf.                                  | inf.         | 800         |

$$V_{s,eq}(0.0-30.0)=421\text{m/s}$$

Il profilo MASW individua una  **$V_{S,eq}$  riferita al piano di campagna**, pari a **421 m/s**.

#### 4.3 INDAGINI HVSR

Nella scheda relativa a ciascuna acquisizione in sismica passiva è riportato il grafico della curva sperimentale H/V e quello degli spettri delle tre componenti del moto in velocità.

Inoltre, per ogni verticale di misura è riportato, a titolo esplicativo, il confronto fra curva sperimentale H/V e la curva teorica relativa al modello di sottosuolo proposto (e, conseguentemente, il profilo delle  $V_s$  calcolato su ciascuna verticale).

Le due registrazioni in sismica passiva, effettuate a poca distanza di tempo l'una dall'altra, presentano, a partire dalla frequenza di 10 Hz fino alle frequenze più basse, una curva H/V, simile su tutto l'intervallo spettrale misurato indicando una sostanziale omogeneità sismostratigrafica in corrispondenza delle due verticali di misura.

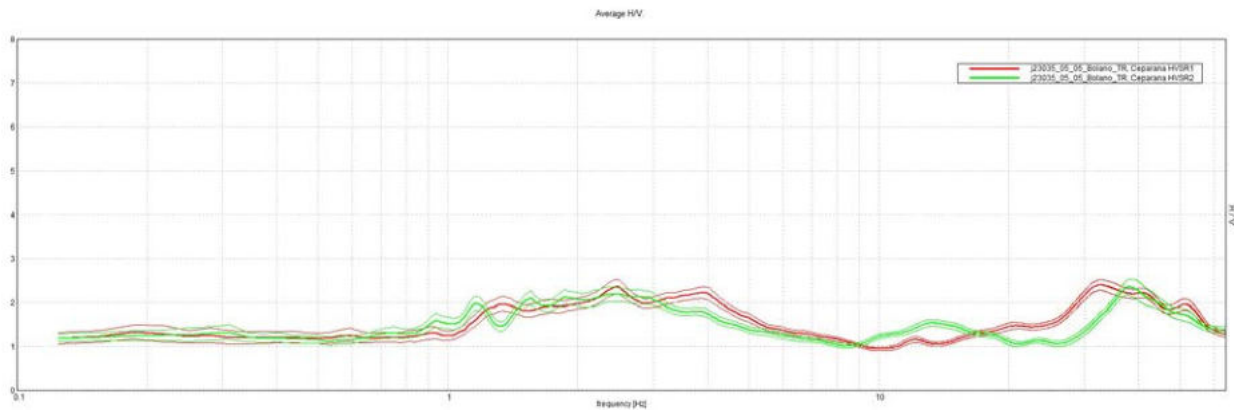


Dal confronto tra le due curve H/V sperimentali riportato nella figura sottostante, è possibile notare una differenza alle alte frequenze in cui il contrasto superficiale rilevato su HVSR1 (in rosso) è leggermente più profondo rispetto a quello rilevato su HVSR2 (in verde).

Per tutte le variabili introdotte con la metodologia utilizzata, le ricostruzioni sismostratigrafiche ottenute con questo tipo d'indagine e proposte nelle schede relative alle singole acquisizioni HVSR sono da considerarsi una delle possibili soluzioni che possono generare curve teoriche simili a quelle proposte.

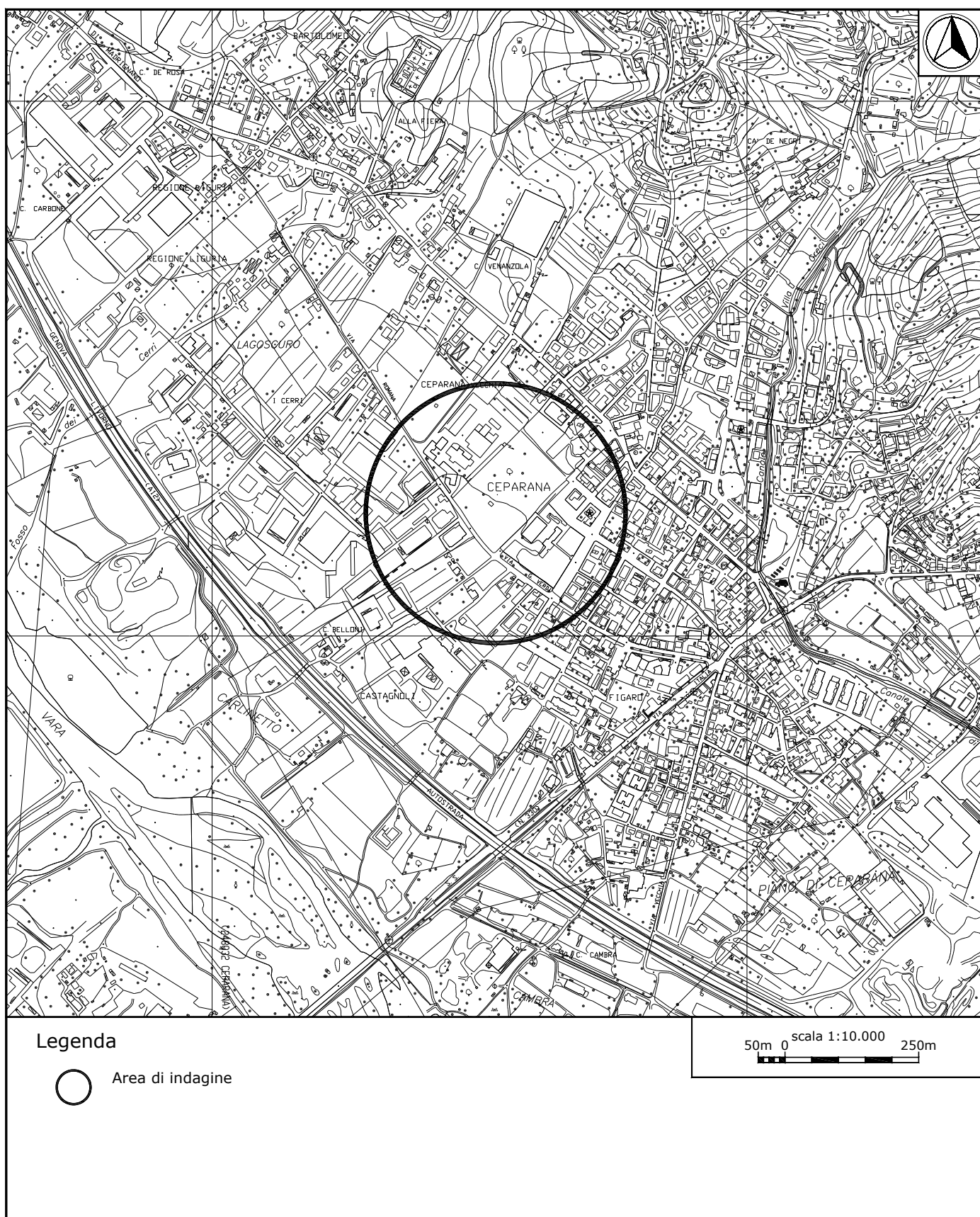
È necessario inoltre precisare che, trattandosi di misure indirette, come per tutte le indagini geofisiche, i risultati ottenuti possono variare all'interno di un range pari a circa il 20%.

#### H/V SPERIMENTALE -CONFRONTO HVSR1 e HVSR2

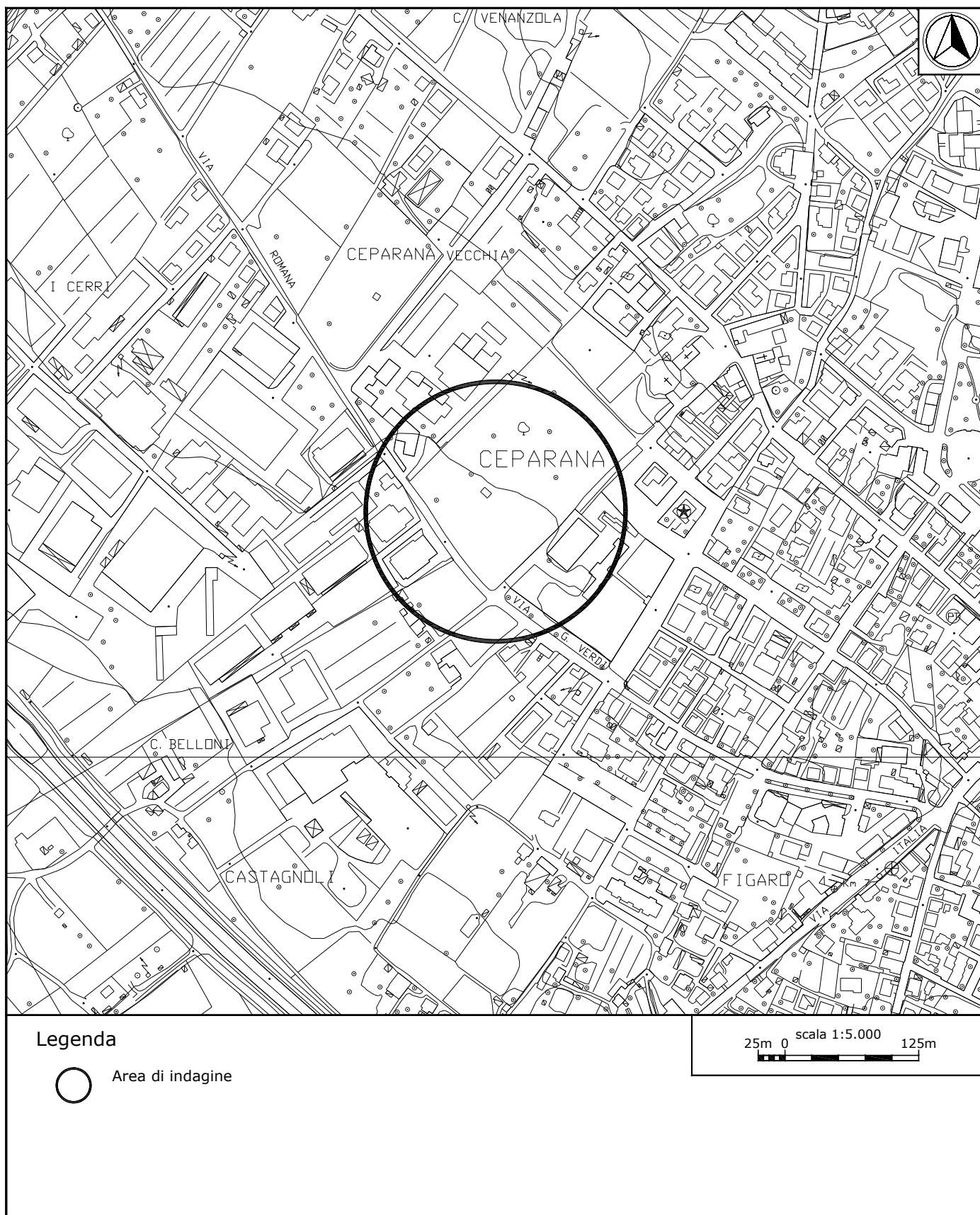


Pisa, Maggio 2023

**P3 s.n.c.**  
 Piazza Martiri della Libertà, 22/23  
 56127 PISA  
 C.F./P.IVA 01923910507  
*Alto Benvenuti*

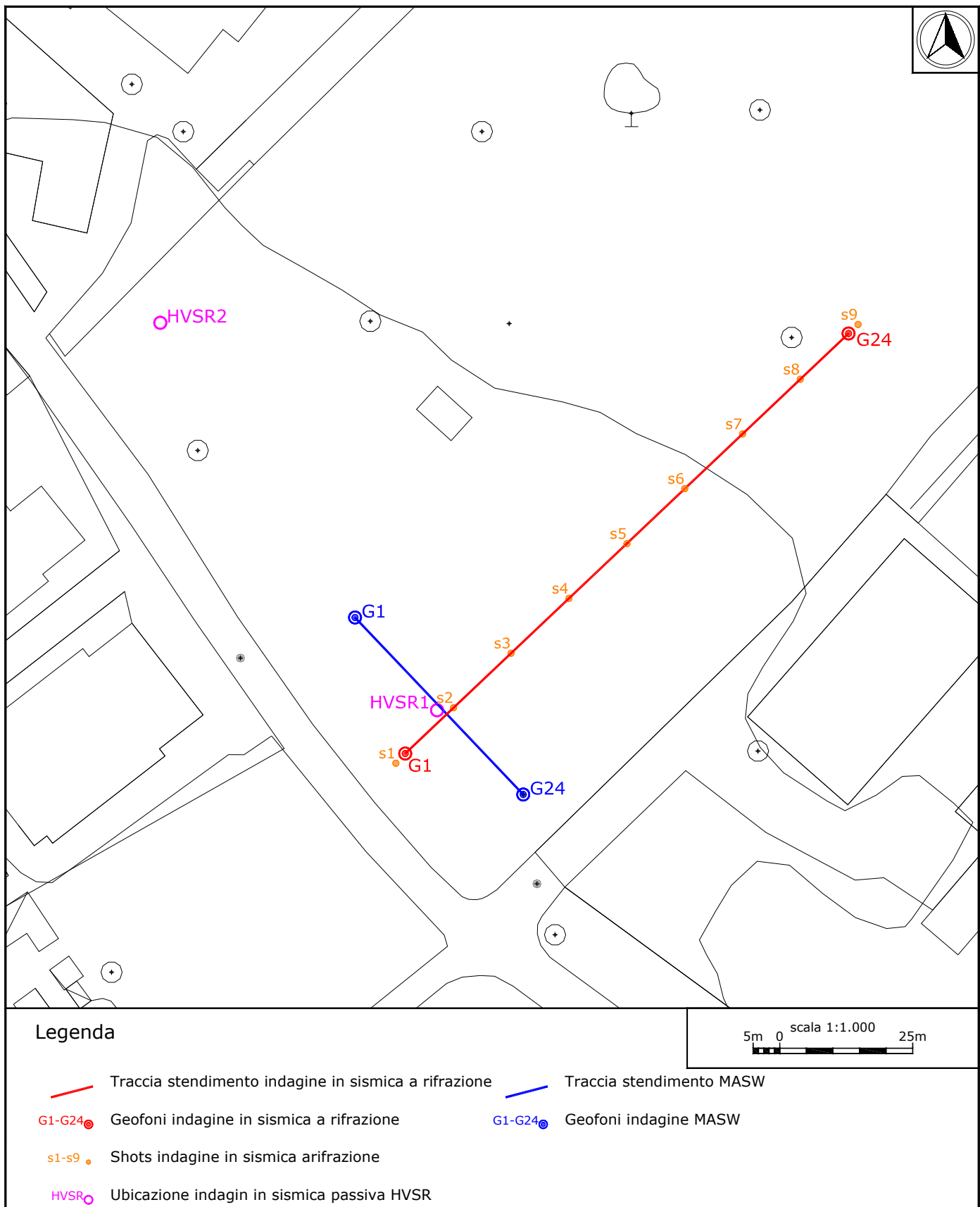


**Figura n.1: Ubicazione indagini- Inquadramento generale.**

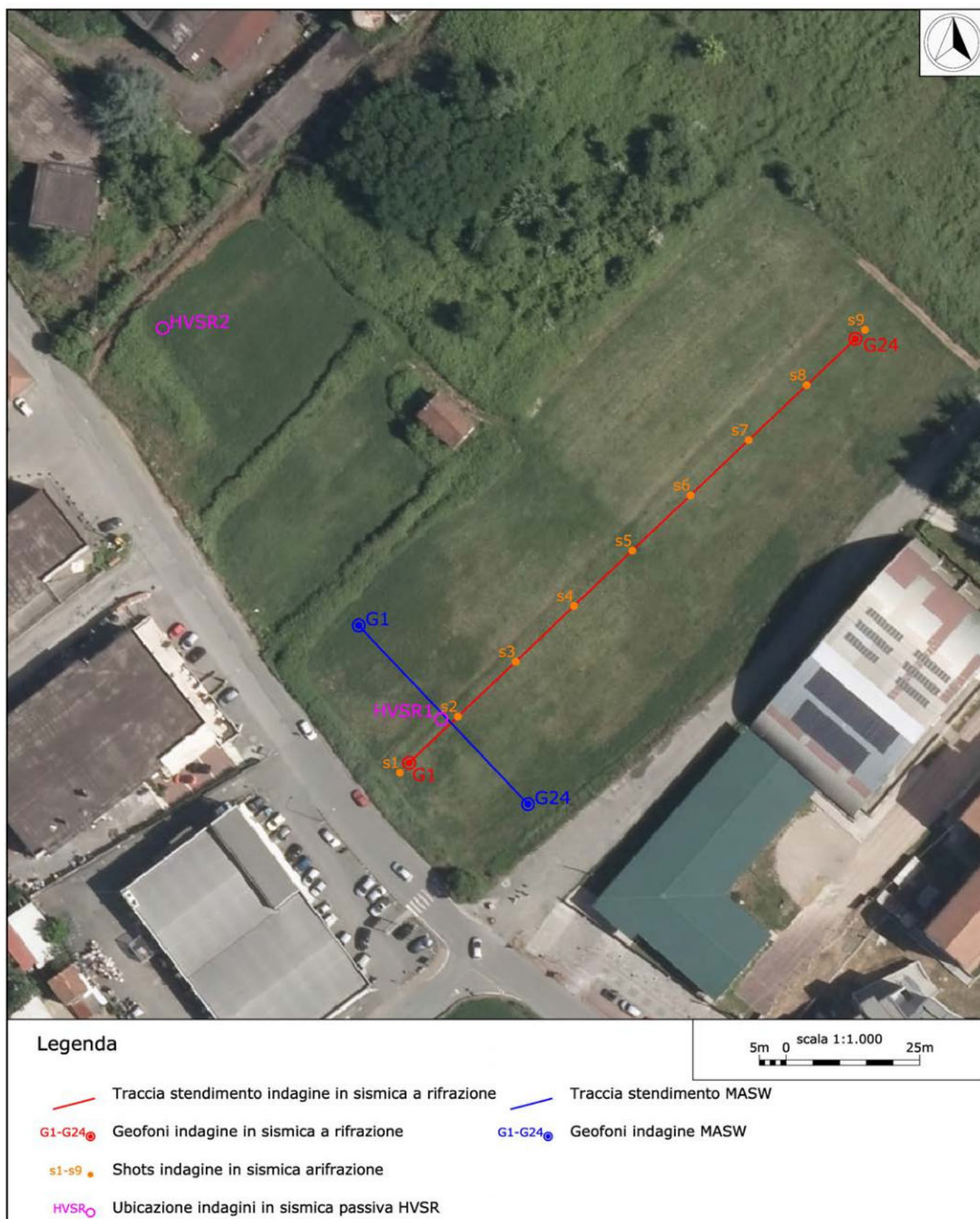


**Figura n.2: Ubicazione indagini – Inquadrimento di dettaglio.**





**Figura n.3: Ubicazione indagini – Particolare su base CTR.**



**Figura n.4: Ubicazione indagini – Particolare su base Ortofoto.**

## Comune di Bolano (SP) - Frazione di Ceparana - Indagine in sismica a rifrazione in Onde P - Sez.1 -Elaborazione tomografica

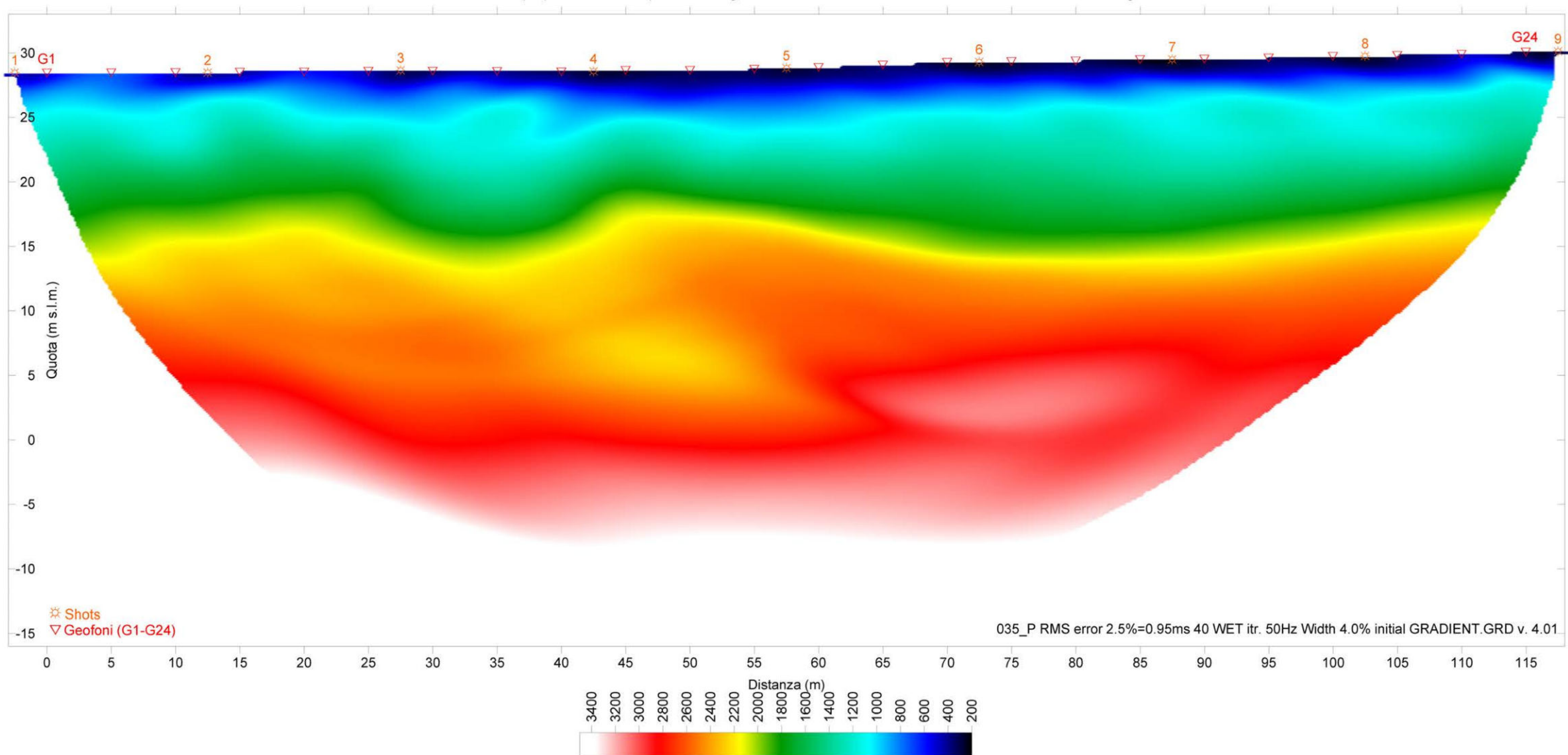


Fig.5a: Indagine in sismica a rifrazione in onde P – Elaborazione tomografica.



## Comune di Bolano (SP) - Frazione di Ceparana - Indagine in sismica a rifrazione in Onde P - Sez.1 -Elaborazione tomografica

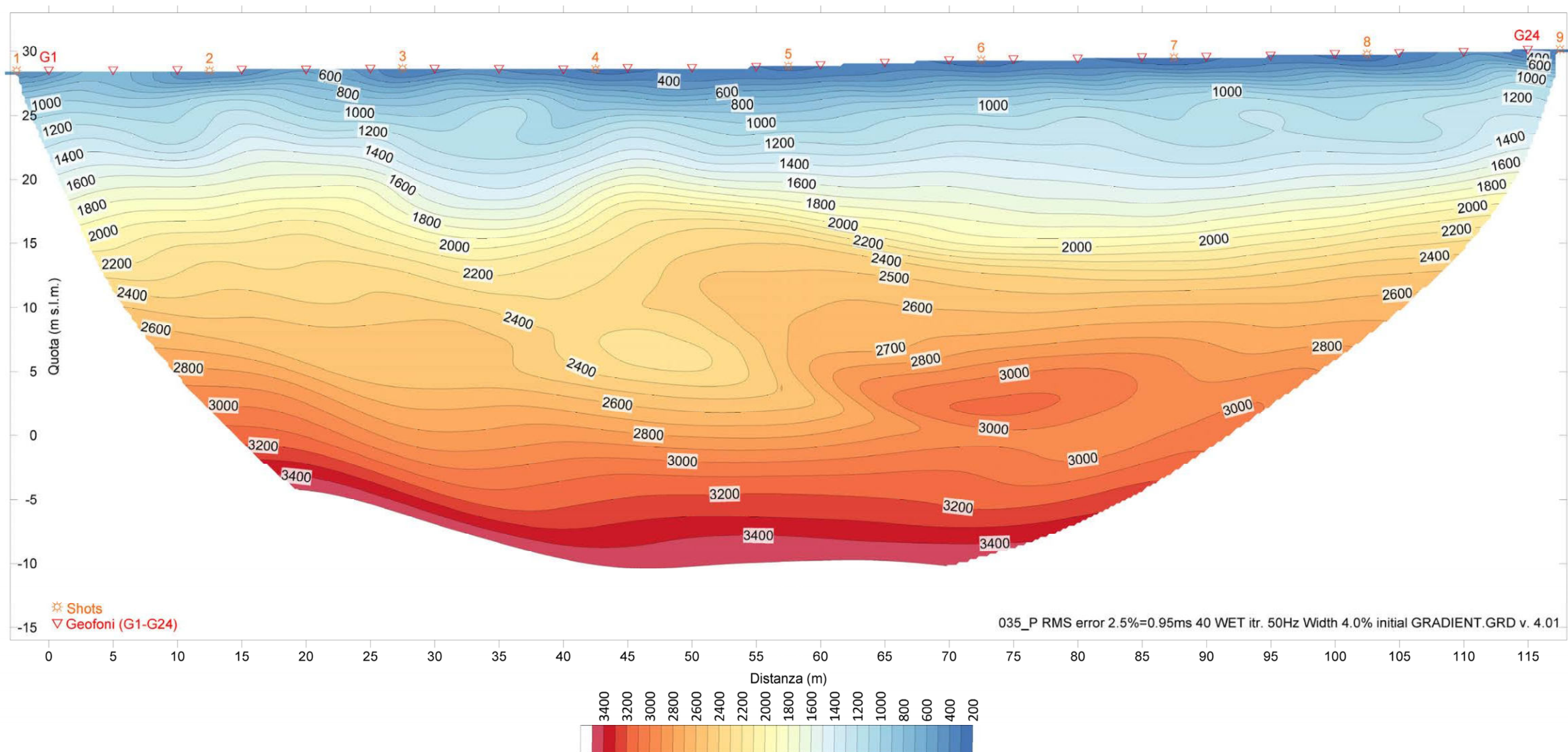


Fig.5b: Indagine in sismica a rifrazione in onde P – Elaborazione tomografica con isolinee di uguale velocità.

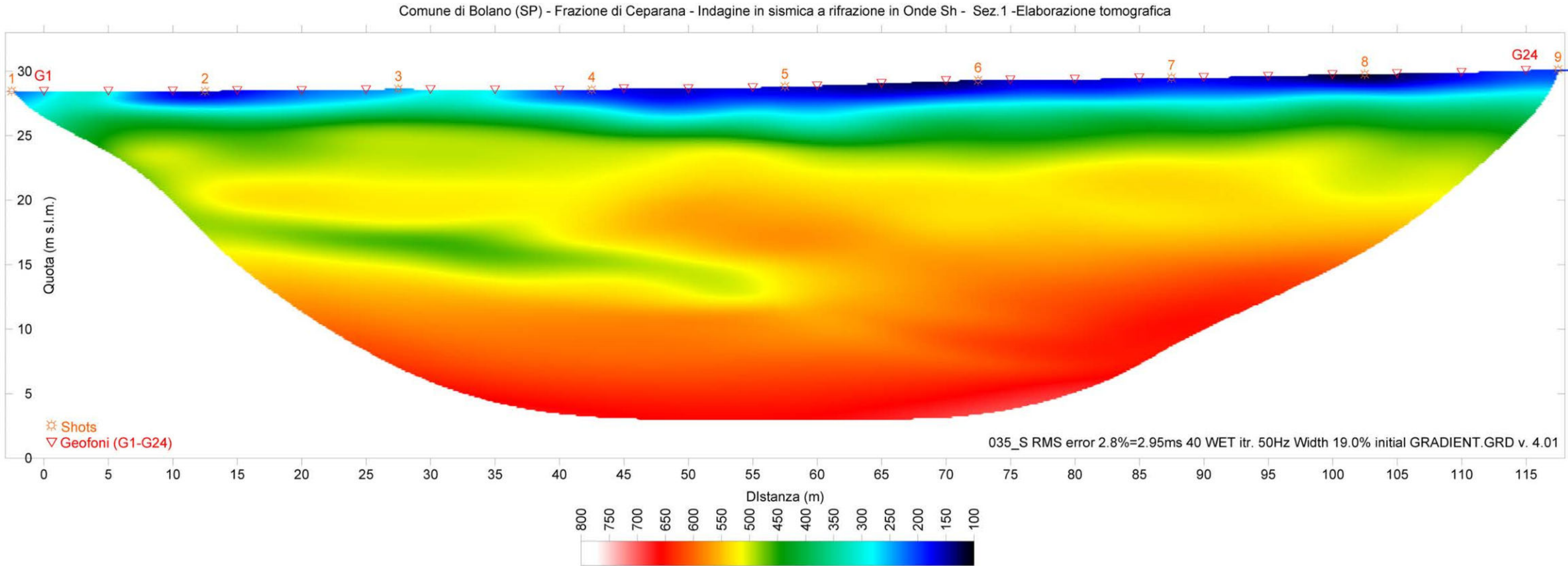


Fig.6a: Indagine in sismica a rifrazione in onde Sh – Elaborazione tomografica.



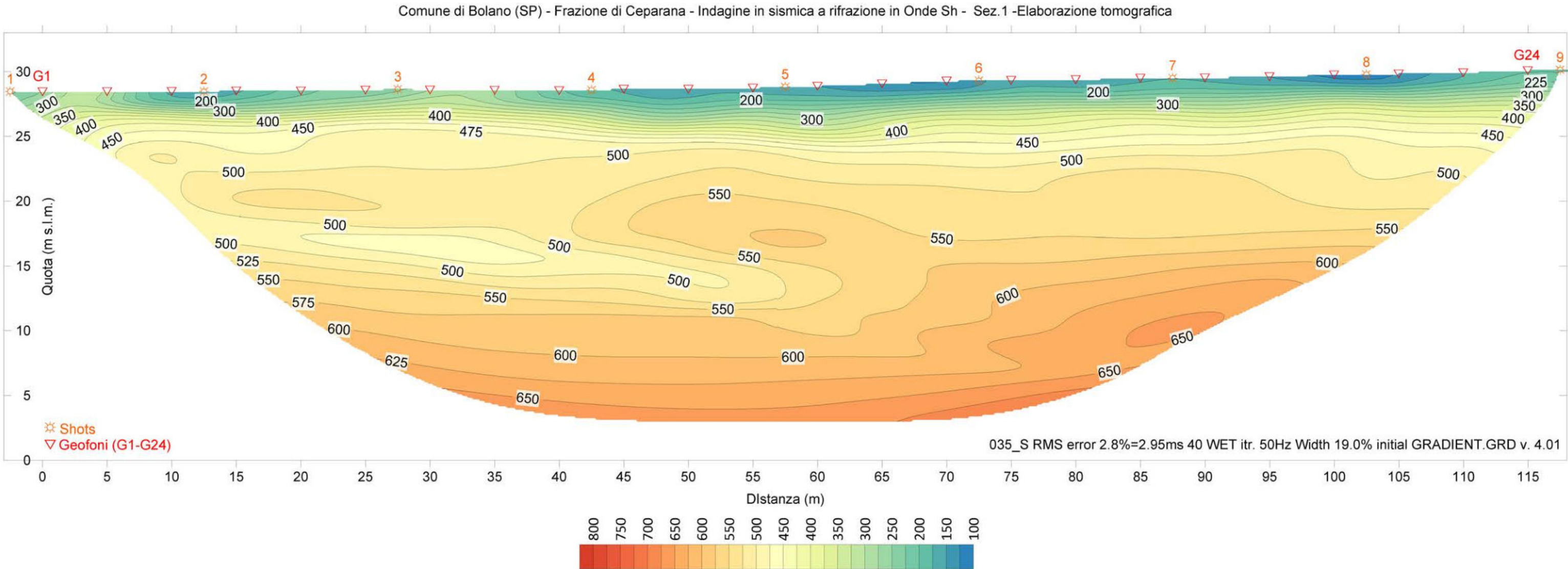


Fig.6b: Indagine in sismica a rifrazione in onde Sh – Elaborazione tomografica con isolinee di uguale velocità.



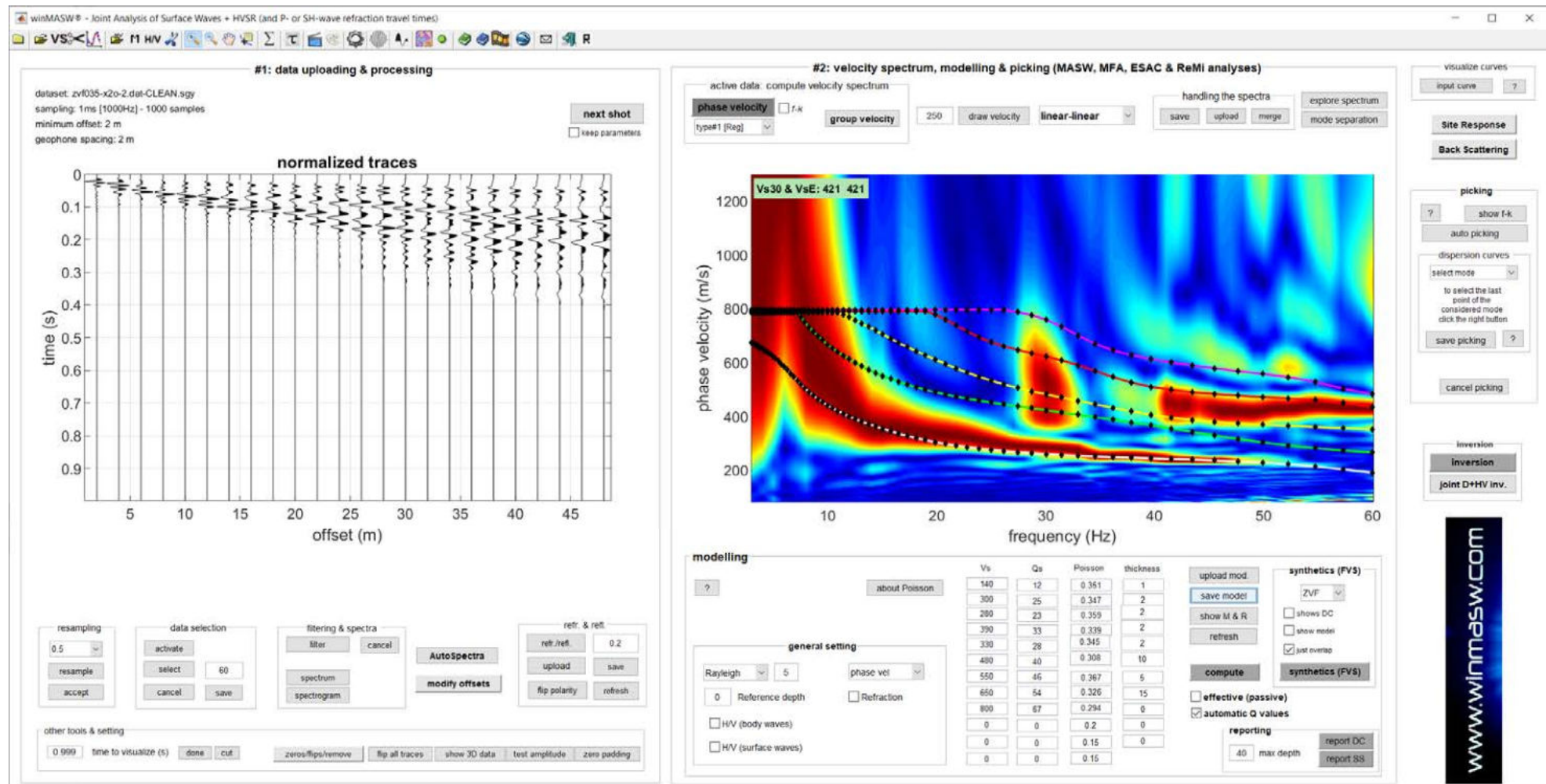
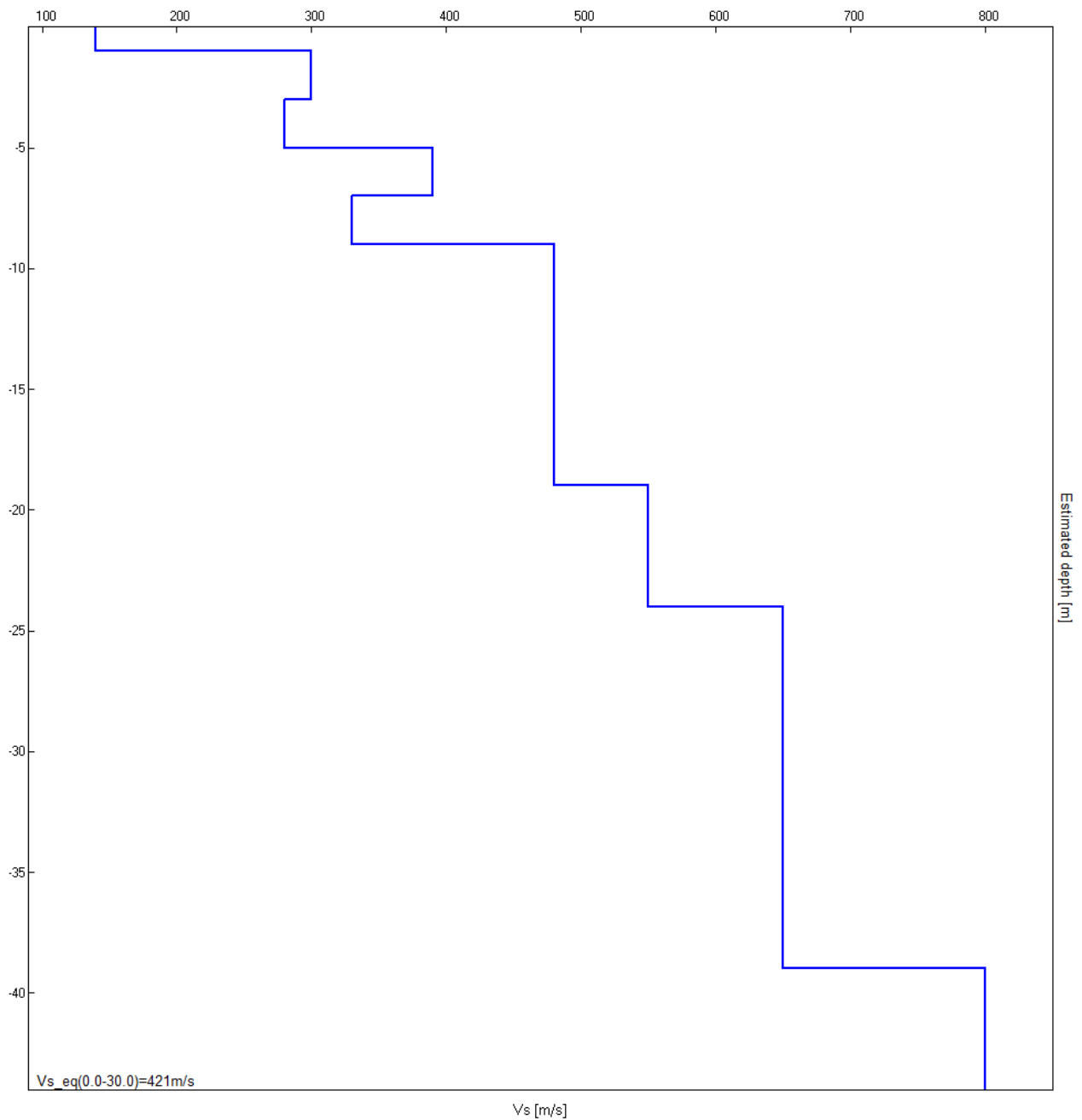


Figura 7: Indagine MASW. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.



**Figura 8: Indagine MASW. Profilo di Vs.**

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 1.00                                  | 1.00         | 140      |
| 3.00                                  | 2.00         | 300      |
| 5.00                                  | 2.00         | 280      |
| 7.00                                  | 2.00         | 390      |
| 9.00                                  | 2.00         | 330      |
| 19.00                                 | 10.00        | 480      |
| 24.00                                 | 5.00         | 550      |
| 39.00                                 | 15.00        | 650      |
| inf.                                  | inf.         | 800      |

Vs<sub>eq</sub>(0.0-30.0)=421m/s

**J23035\_05\_05\_BOLANO\_TR, CEPARANA HVSR1**

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 05/05/23 10:20:24 Fine registrazione: 05/05/23 10:50:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

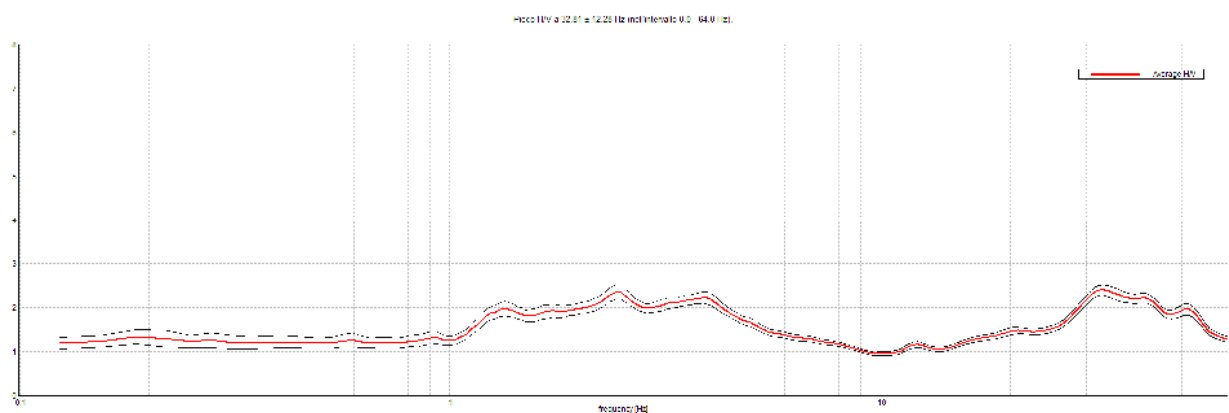
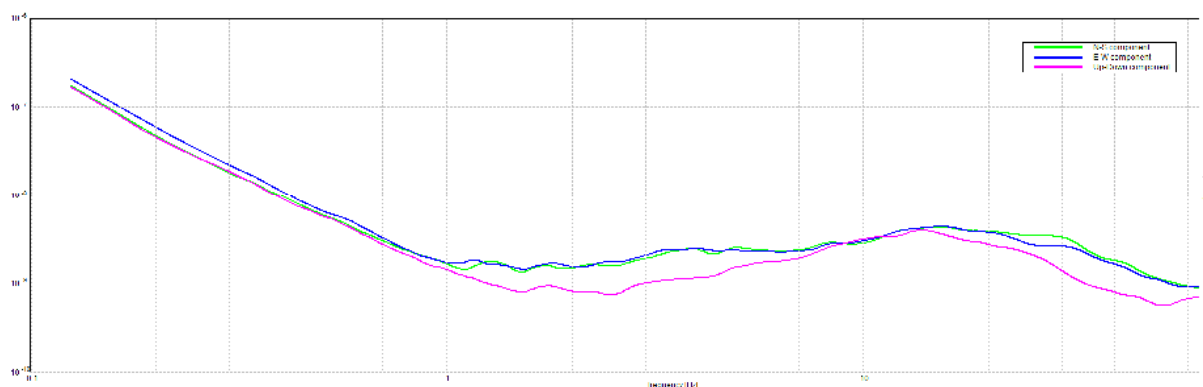
Analizzato 99% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

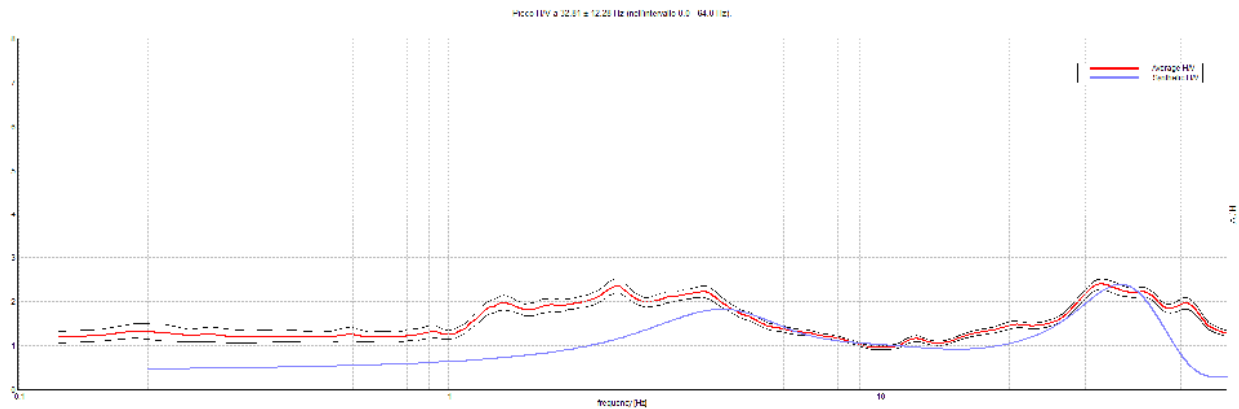
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

**RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE****SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

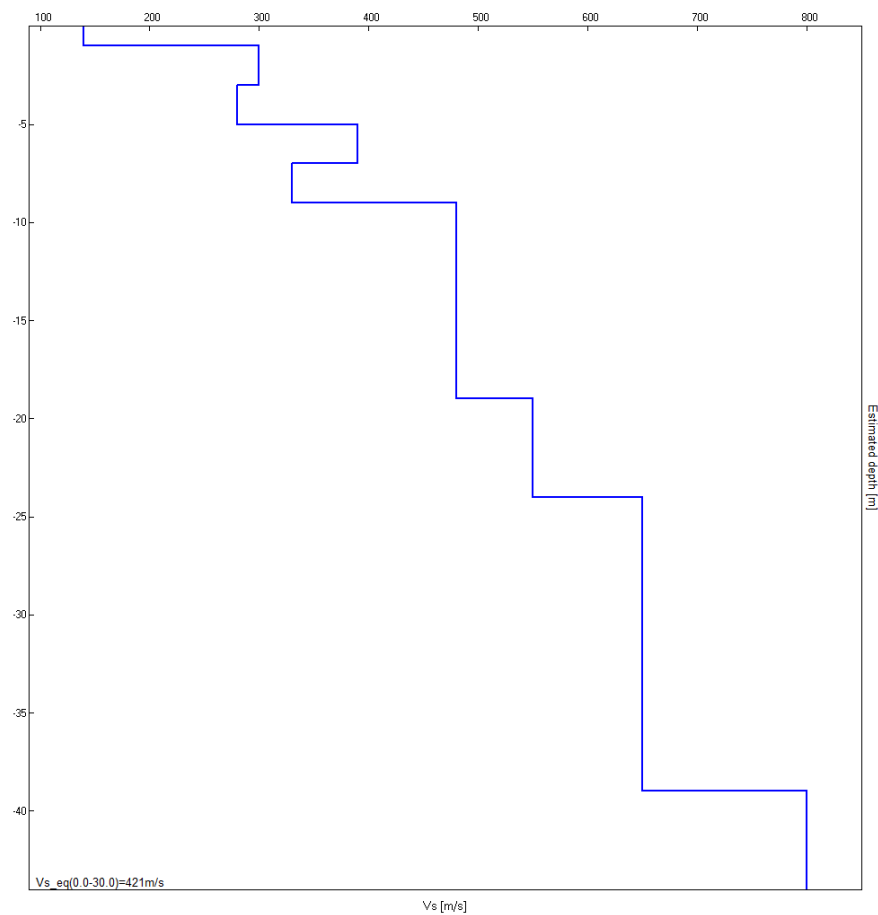


## H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 1.00                                  | 1.00         | 140      |
| 3.00                                  | 2.00         | 300      |
| 5.00                                  | 2.00         | 280      |
| 7.00                                  | 2.00         | 390      |
| 9.00                                  | 2.00         | 330      |
| 19.00                                 | 10.00        | 480      |
| 24.00                                 | 5.00         | 550      |
| 39.00                                 | 15.00        | 650      |
| inf.                                  | inf.         | 800      |

$V_{s\_eq}(0.0-30.0)=421\text{m/s}$



**J23035\_05\_05\_BOLANO\_TR, CEPARANA HVSR2**

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 05/05/23 14:06:58 Fine registrazione: 05/05/23 14:36:57

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

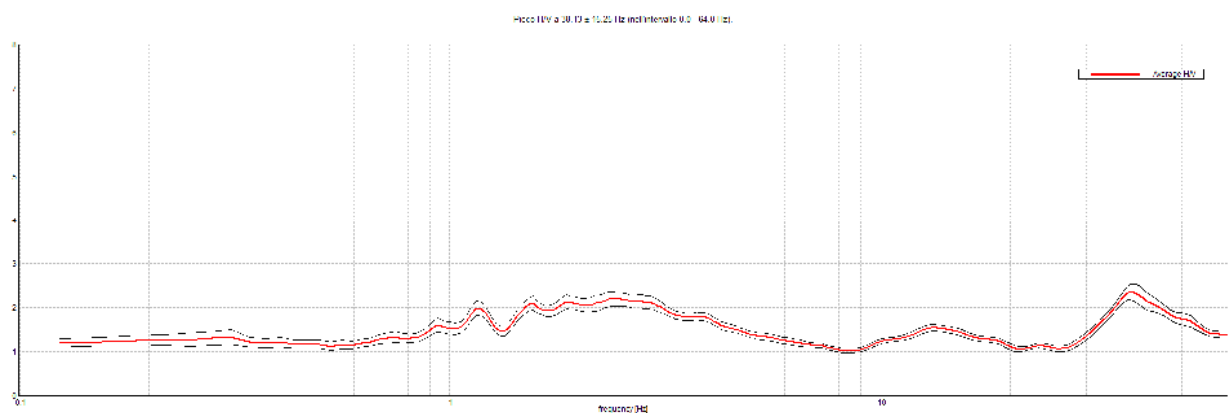
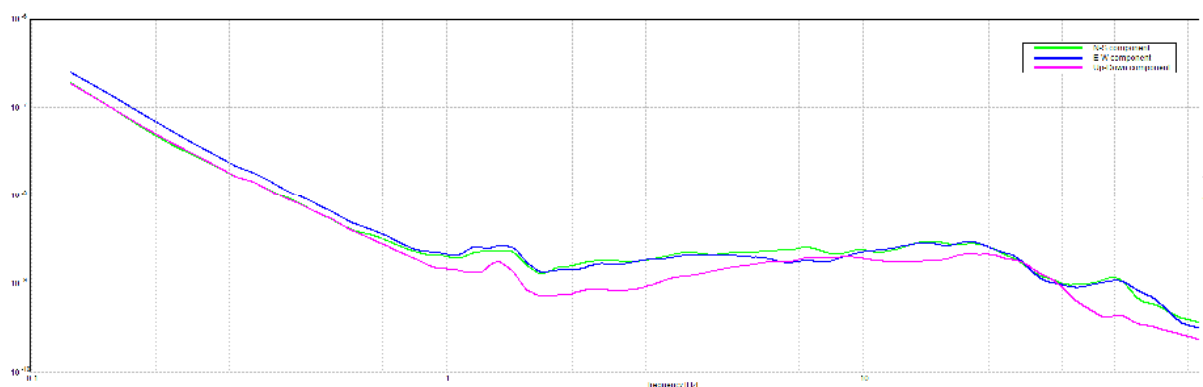
Analizzato 98% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

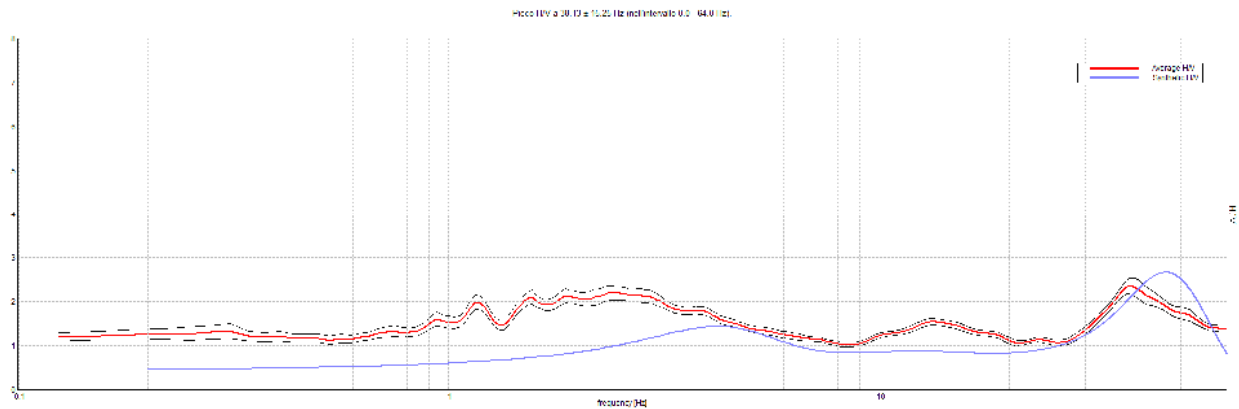
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

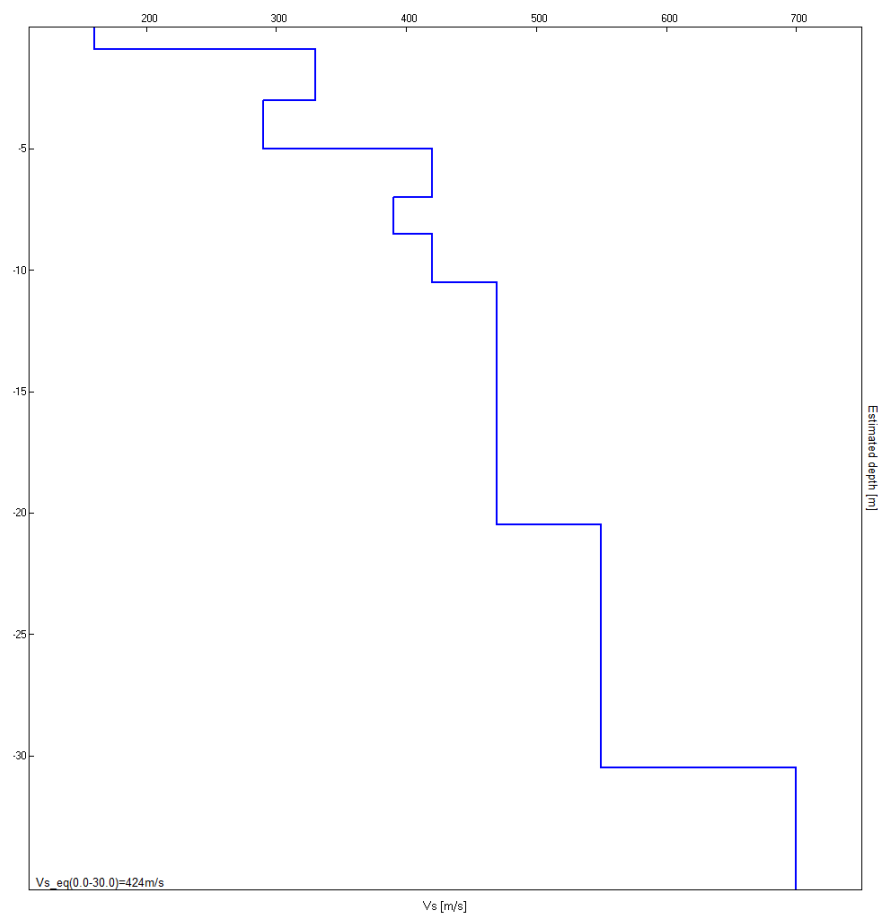
**RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE****SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

## H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.90                                  | 0.90         | 160      |
| 3.00                                  | 2.10         | 330      |
| 5.00                                  | 2.00         | 290      |
| 7.00                                  | 2.00         | 420      |
| 8.50                                  | 1.50         | 390      |
| 10.50                                 | 2.00         | 420      |
| 20.50                                 | 10.00        | 470      |
| 30.50                                 | 10.00        | 550      |
| inf.                                  | inf.         | 700      |

$V_{s\_eq}(0.0-30.0)=424\text{m/s}$







**Indagine in sismica a rifrazione in onde P e Sh - Documentazione fotografica**





**Indagine in sismica a rifrazione in onde Sh: energizzazione - Documentazione fotografica**





**Indagine MASW - Documentazione fotografica**





**Indagine in sismica a passiva a stazione singola HVSR1 - Documentazione fotografica**



**Indagine in sismica a passiva a stazione singola HVSR2 - Documentazione fotografica**

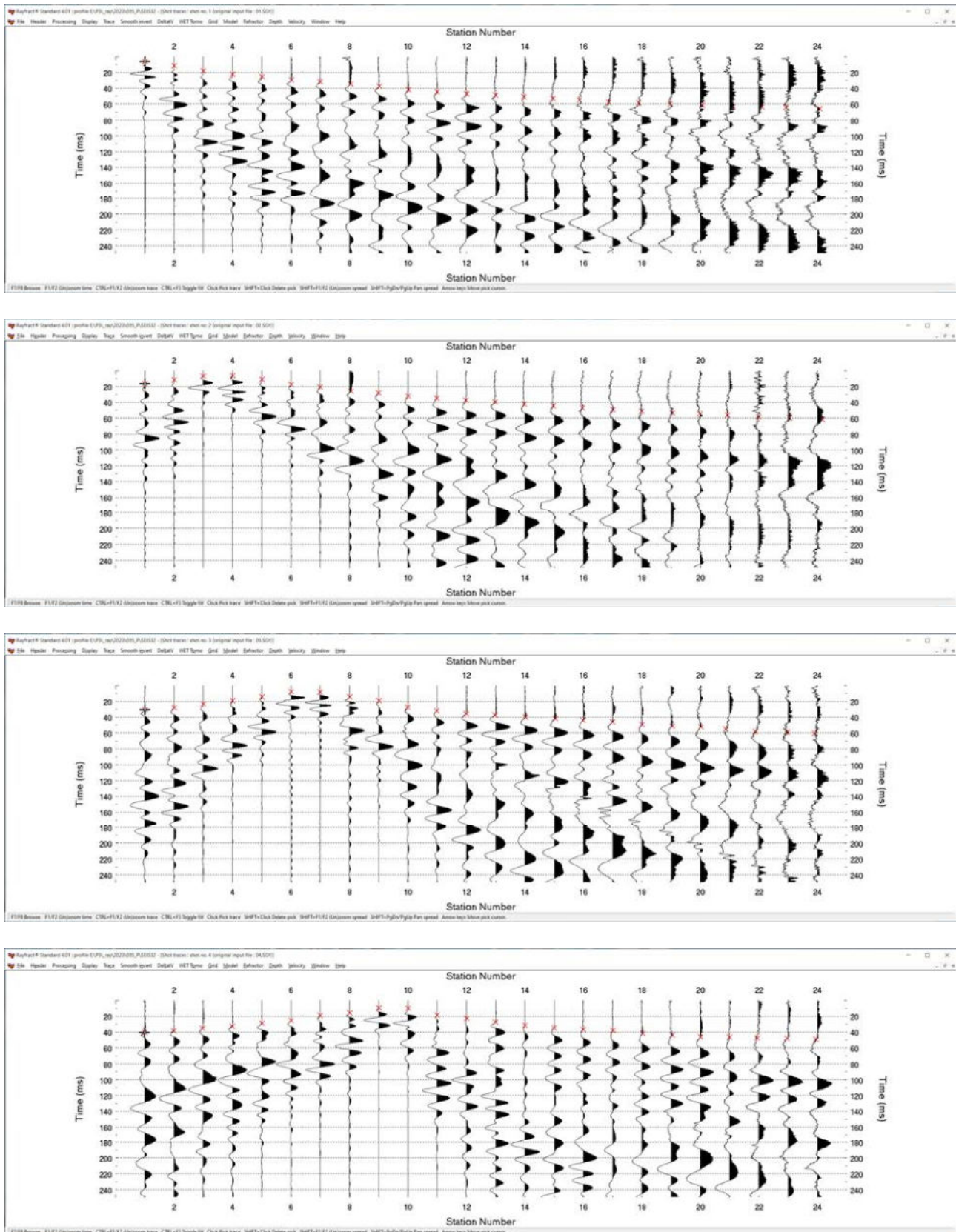


**Allegato A**

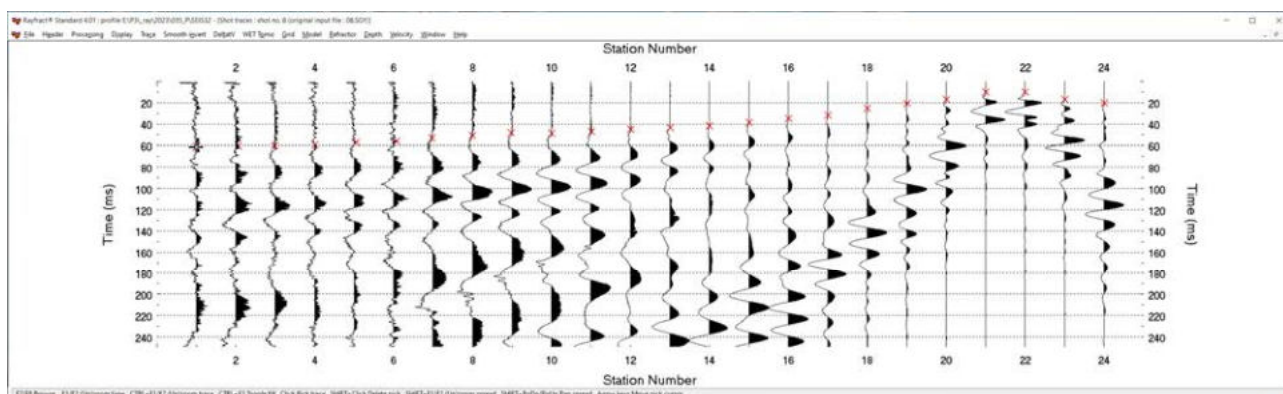
**Indagine in sismica a rifrazione**

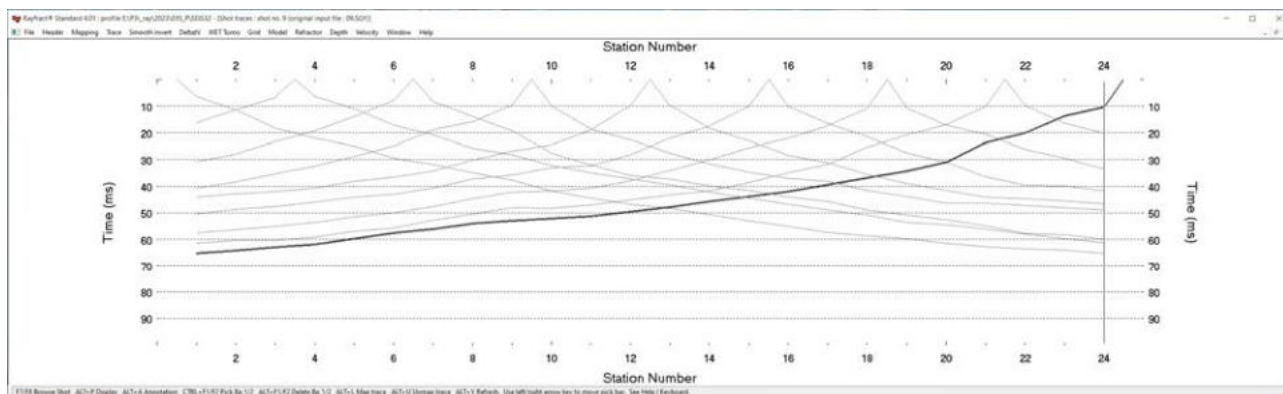
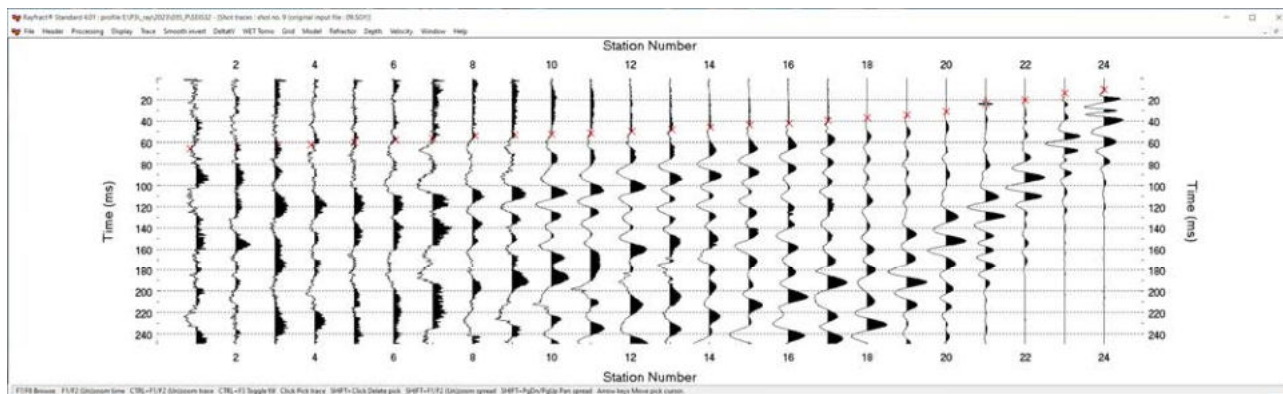
**- Sismogrammi -**

### Sismica a rifrazione in onde P – Sismogrammi e dromocrone









### Sismica a rifrazione in onde Sh – Sismogrammi e dromocrone

