

# Interventi di messa in sicurezza della scuola Primaria di Iseo Via della Manica - Iseo (BS)



Cat. Progetto di Fattibilità Tecnico Economica

## COMMITTENTE/Client

**Comune di Iseo**

Piazza Giuseppe Garibaldi, 10  
25049 Iseo (BS)



Ref. arch. Nadia Bombardieri

## PROGETTISTI/Designers

**ProgettoB20** 

**ProgettoB20 srl** società di ingegneria

via Bredina, 2c/d - 25128 Brescia - ITALY  
tel.030 383398/030 393527  
www.progettob20.it

Cap. Soc. € 30.000,00 i.v.  
C.F. e P.IVA 04068290982  
REA BS 585894

Pietro Brianza Ingegnere  
**DIRETTORE TECNICO**

Luca Pietta Architetto  
**PROGETTISTA ARCHITETTONICO**

Giovanna Riina Ingegnere  
**PROGETTISTA STRUTTURE E ANTINCENDIO**

## CONSULENZE SPECIALISTICHE/Consultants

## ELABORATO/Document

### Relazione geologica

Scale

-

ORDER  
**W19-164**

CATEGORY  
**P.F.T.E.**

SECTION  
**GEN**

NUMBER  
**C**

Rev.

N	SUBJECT	DATE	D	C
00	emissione ai fini della verifica	15/11/2019	D.C.	P.B.

File

Doc C - Relazione geologica

**RELAZIONE GEOLOGICA AI SENSI DELLA DGR IX/2616/2011 PER GLI INTERVENTI DI  
MESSA IN SICUREZZA DELLA SCUOLA PRIMARIA  
PER LO STUDIO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA**

**COMUNE DI ISEO (BS)**

---



Dott. Geol. Daniela Chiarini



## INDICE

<b>1. Premessa.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Riferimenti normativi.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Ubicazione dell'area.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Riferimenti agli studi relativi al governo del territorio (PGT, PCTP, PAI, ecc.) .....</b>	<b>8</b>
<b>5. Inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico .....</b>	<b>15</b>
<b>6. Piano d'indagine .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1. Prove penetrometriche dinamiche DPSH e modello geologico-geotecnico preliminare .....</b>	<b>24</b>
<b>7. Analisi sismica del sito.....</b>	<b>27</b>
<b>7.1. Premessa .....</b>	<b>27</b>
<b>7.2. Definizione della pericolosità sismica di base.....</b>	<b>28</b>
<b>7.3. Indagine sismica eseguita in sito.....</b>	<b>29</b>
<b>7.4. Valutazione dei fenomeni di amplificazione stratigrafica.....</b>	<b>34</b>
<b>7.5. Analisi sismica di 2° livello sito specifica .....</b>	<b>35</b>
<b>7.6. Verifica alla liquefazione.....</b>	<b>38</b>
<b>8. Prescrizioni in fase di progetto definitivo, approfondimenti d'indagine, consigli al progettista .....</b>	<b>40</b>

## ALLEGATI

1. Stratigrafia pozzi (Banca dati del sottosuolo-Regione Lombardia)
2. Elaborazione prove penetrometriche dinamiche DPSH
3. Schema modello geologico geotecnico preliminare
4. Report indagini sismiche

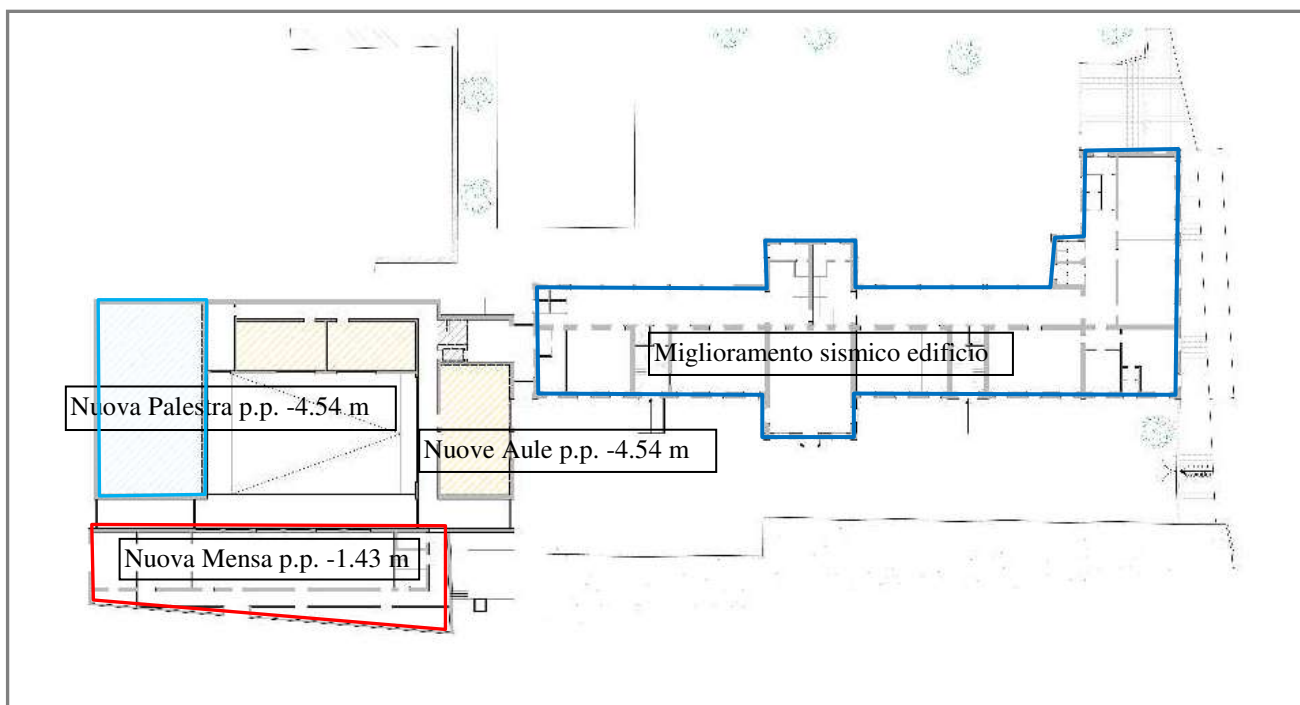
Brescia, 30 Ottobre 2019

## 1. Premessa

Su incarico e per conto della società d'ingegneria Progetto B20 S.r.l si è redatta la relazione geologica ai sensi della DGR IX/2616/2011 per lo studio di fattibilità tecnico economica per gli interventi di messa in sicurezza della scuola Primaria posta in comune d'Iseo in via Cerca 10.

Il progetto di fattibilità prevede la riconversione di porzione dell'ex liceo in mensa scolastica (piano pavimento di progetto p.p. -1.43 m) con miglioramento sismico abbattimento barriere architettoniche e riqualificazione energetica, miglioramento sismico della porzione storica dell'edificio, demolizione di porzione dell'ex liceo e realizzazione di nuove aule e di una palestra (p.p. -4.78 m).

Si riporta di seguito una planimetria con le aree d'intervento:



Lo scopo principale del lavoro consta :

- nella ricostruzione preliminare del modello geologico del sito sviluppato in prospettiva sismica e geologico-tecnica attraverso la determinazione della categoria di suolo dei terreni sottostanti l'opera di progetto e della caratterizzazione geotecnica preliminare/di massima del sottosuolo sulla base delle prime indagini geognostiche eseguite.
- nella definizione degli approfondimenti da svolgere in fase di progetto definitivo per affinare le conoscenze preliminari di base.

Il modello geologico preliminare fornisce indicazioni sui caratteri stratigrafici, litologici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e in generale di pericolosità geologica. Pertanto per la redazione del quadro conoscitivo si sono utilizzati dati di letteratura, dati in possesso della scrivente relativi a stratigrafie di pozzi, lavori eseguiti nelle vicinanze dell'area e dalle prime prove eseguite in situ.

Si è proceduto quindi come segue:

- raccolta della bibliografia geologica esistente e consultazione della componente geologica idrogeologica e sismica del PGT;
- sopralluogo e rilevamento di un'intorno significativo;
- descrizione geolitologica, geomorfologica e idrogeologica del sito sulla base delle indagini esistenti, del rilevamento eseguito e delle indagini svolte;
- esecuzione di una indagine geofisica a rifrazione in onde P e onde S combinata a MASW diretta e ad un'indagine HVSr a stazione singola;
- esecuzione ed elaborazione di 3 prove penetrometriche dinamiche DPSH;
- ricostruzione del modello geologico - geotecnico preliminare/di massima;
- analisi sismica della pericolosità di base del sito e determinazione della categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC – DM 17 gennaio 2018;
- analisi sismica di secondo livello;
- valutazione sulla verifica alla liquefazione;
- prescrizioni in fase di progetto definitivo sulla base delle risultanze delle prime indagini svolte.

## **2. Riferimenti normativi**

Per quanto attiene alle competenze del geologo l'opera in oggetto comporta l'osservazione della normativa nazionale e regionale vigente che si interessa, in generale, della realizzazione di scavi, della posa di fondazioni e della stabilità delle scarpate artificiali nel rispetto delle norme tecniche di attuazione del piano di governo del territorio.

Per quanto riguarda la normativa vigente si è fatto riferimento a:

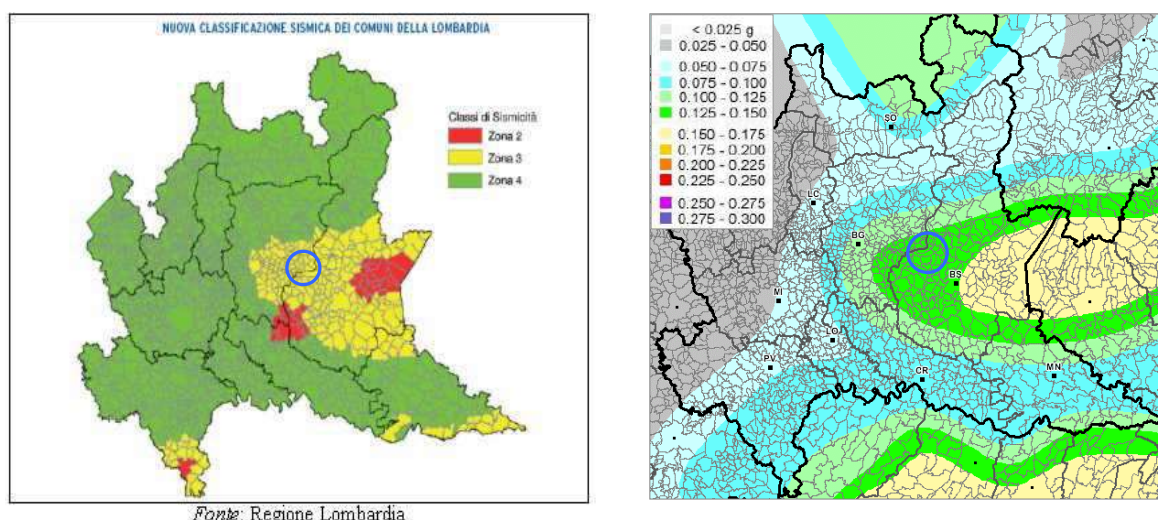
- OPCM n. 3274/2003 e successive modifiche e integrazioni
- LR 12/05 e direttive regionali ai sensi del DGR n. 8/1566 del 22/12/2005, DGR n. 8/7374 del 28/05/2008
- DGR IX/2616/2011 normativa regionale riguardante i criteri e gli indirizzi per la componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano del governo del territorio.
- DM 17-01-2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni



Con il DM 14 gennaio 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30 sono state approvate le nuove norme tecniche per le costruzioni aggiornate con il DM 17 gennaio 2018 pubblicate sulla GU n. 8 del 20 febbraio 2018 - Suppl. Ordinario n. 42.

Per quanto riguarda la normativa sismica, con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio n. 3274, emanata il 20 marzo 2003<sup>1</sup> e pubblicata sul supplemento ordinario 72 alla Gazzetta Ufficiale n. 105 del 8 maggio 2003 recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”, l'intero territorio nazionale è stato riclassificato: il **comune di Iseo** risulta pertanto classificato in **zona sismica 3**.

Di seguito si riportano a sinistra l'estratto della carta di classificazione sismica regionale approvata con D.G.R. n. 14964 del 7 novembre 2003 e a destra l'estratto della mappa di pericolosità sismica (Gruppo di Lavoro 2004) pubblicata come Allegato 1b all'OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006:



Le “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al DM 14-01-2008, nella Tabella 1 dell'allegato B, forniscono i valori di accelerazione massima orizzontale attesa su suolo rigido e pianeggiante per 9 tempi di ritorno diversi e per 10751 punti di riferimento estratti della griglia di analisi utilizzata dal GdL04 per la redazione della mappa di pericolosità (Allegato 1b all'OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006).

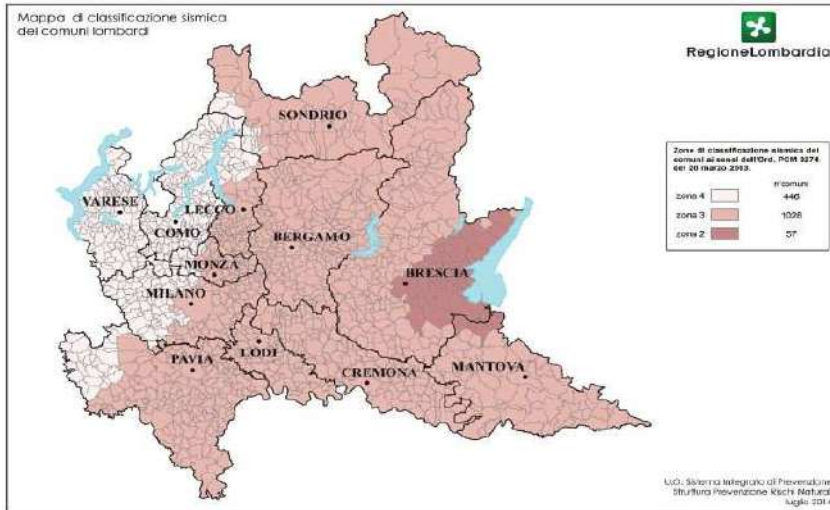
Con il D.G.R. 11 luglio 2014 - n. X/2129 “Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia (l.r. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d)” (pubblicato il 16 Luglio 2014 sul Bollettino Ufficiale-Serie ordinaria n 29) la Regione Lombardia procede alla determinazione di un livello di classificazione sismica maggiormente cautelativo rispetto a quello vigente e all'aggiornamento della classificazione del territorio lombardo, anche in funzione del riordino delle disposizioni della normativa regionale in materia di vigilanza e controllo sulle costruzioni in zona sismica.

<sup>1</sup> Modifiche ed integrazioni all'ordinanza n. 3274 sono state pubblicate con OPCM 3316/2003, OPCM 3333/2004, OPCM 3431/2005

Nell'allegato A del DGR viene fornito “l'elenco dei comuni lombardi con indicazione delle relative zone sismiche e dell'accelerazione massima (agmax) presente all'interno del territorio comunale (o.p.c.m. 3519/06 e decreto min. infrastrutture 14/01/08) “.

***Il comune di Iseo viene riclassificato in zona sismica 3 con Agmax 0,137935.***

Il presente provvedimento doveva entrare in vigore il novantesimo giorno successivo a quello della sua pubblicazione (ossia il 14/10/2014) , con l'approvazione del D.g.r. 8 ottobre 2015 - n. X/4144 l'entrata in vigore era stata prorogata al 10 Aprile 2016.



Con l'entrata in vigore della LR 33/2015 del 12 Ottobre 2015 “Disposizioni in materia di opere e di costruzioni e relativa vigilanza in zona sismica” le funzioni amministrative per le istruttorie relative alle opere e alle costruzioni nelle zone sismiche vengono trasferite ai comuni.

In data 10 aprile 2016 è stata fissata l'entrata in vigore dei due provvedimenti sopracitati e della delibera con i criteri attuativi di seguito menzionata.

Con D.G.R. 30 marzo 2016 - n. X/5001 “ Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l'esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica (artt. 3, comma 1, e 13, comma 1, della l.r. 33/2015)” viene istituito un sistema informativo integrato e vengono definite:

- le modalità con le quali i comuni devono gestire le istruttorie riguardanti la presentazione della comunicazione di deposito o dell'istanza per il rilascio dell'autorizzazione,
- i criteri con i quali presentare la documentazione per ottenere i titoli abilitativi per le costruzioni in zone sismiche,
- i termini e le modalità di svolgimento dei controlli.

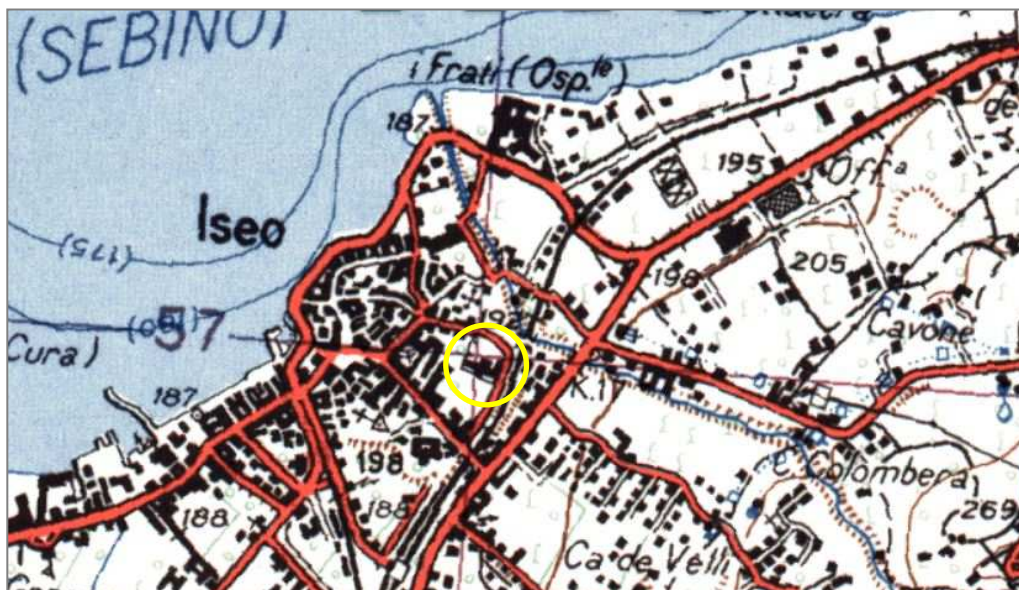


### 3. Ubicazione dell'area

L'area in oggetto è ubicata in prossimità del centro storico d'Iseo, a quota 194 m slm appena ad W della ferrovia Brescia-Edolo e 50 m a S del Torrente Curtel che sfocia nel Lago D'Iseo, ricade nella sezione **D5a3 Iseo** della Carta Tecnica Regionale a scala 1:10000:

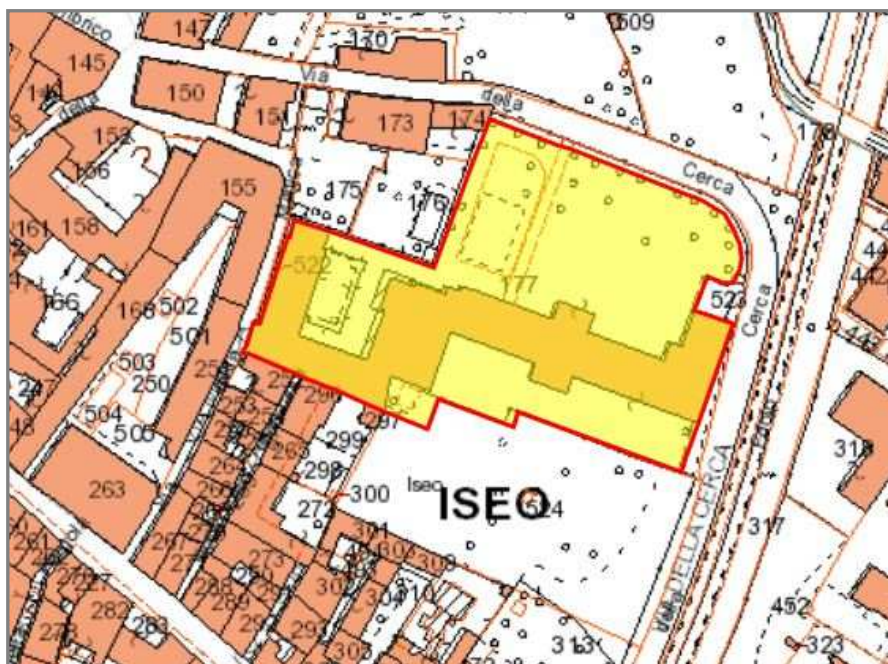


Si riporta di seguito l'inquadramento sulla tavoletta IGM 1: 25.000:





L'area oggetto di studio appartiene al Foglio 24 particella 177 del NCT del Comune di Iseo (E333).



#### 4. Riferimenti agli studi relativi al governo del territorio (PGT, PCTP, PAI, ecc.)

Il PGT del comune di Iseo comprende lo studio geologico redatto secondo i criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica in attuazione all'art. 57 della LR 11 marzo 2005 n. 12 ai sensi della DGR 22/12/05 n 8/1566 aggiornata dalla DGR n. 8/7374 del 28/05/2008.

Lo studio geologico per il PGT recepisce quanto riportato in materia di rischio idrogeologico dagli strumenti di pianificazione sovraordinata quali: Piano Stralcio delle Fasce Fluviali del fiume Po (PSFF), Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Bacino del fiume Po (PAI), Piano Straordinario per le aree a rischio idrogeologico molto elevato (PS267), Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP).

Per quanto riguarda lo studio geologico redatto nel Ottobre 2011 a cura dello Studio Geologia e Ambiente approvato con delibera n 31 del 10 e 11 settembre 2012, l'area in esame ricade nella **classe 3e, 3f di fattibilità** geologica delle azioni di piano: **fattibilità con consistenti limitazioni**, in questa classe ricadono *le aree vulnerabili dal punto di vista idraulico a bassa pericolosità (3e)* e *le aree di conoide quiescente o inattivo mai interessato da fenomeni alluvionali documentati (3f)*, classificata come area Cn (conoide non recentemente attivatosi o completamente protetto) del PAI (art. 9 comma 9 delle N.d.A del PAI).

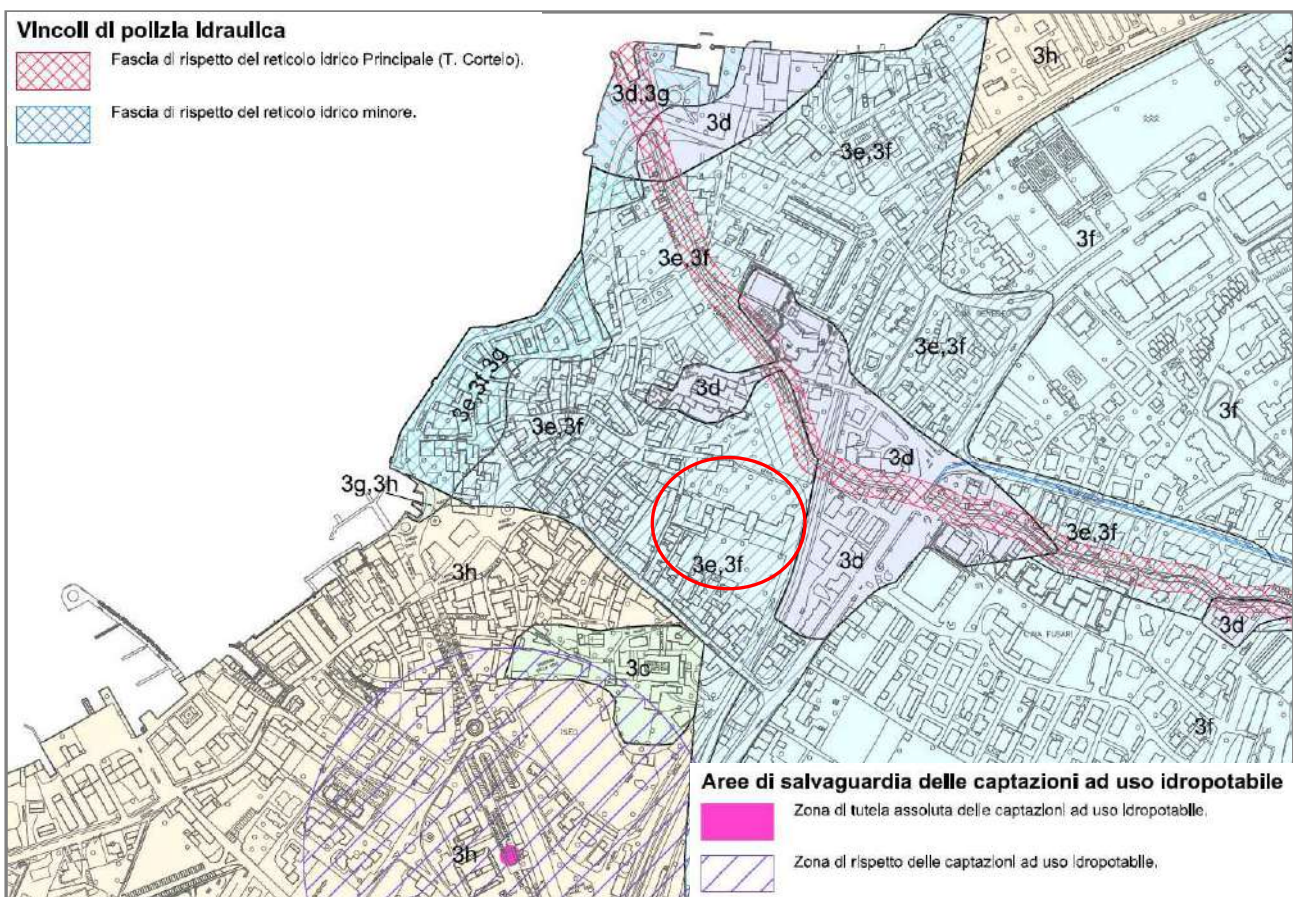
L'area in oggetto rientra nelle **aree potenzialmente allagabili a bassa pericolosità** definita tra quelle appartenenti al conoide del Torrente Cortelo che in base allo studio idraulico e geomorfologico eseguito nel 2000 sono state valutate a "bassa pericolosità".

**Caratteri distintivi PGT :**

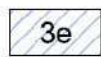
Sono state inserite in questa sottoclasse situazioni piuttosto differenti tra loro. Comunque, considerate le caratteristiche dei corsi d'acqua in grado di esondare, i danni che ci si può attendere sono soprattutto dovuti alle acque (e al materiale solido da esse trasportato) che, fuoriuscendo dall'alveo, si propagano con altezze idriche ridotte (20-30 cm) lungo vie preferenziali, spesso rappresentate dalla rete stradale, invadendo le superfici ed i manufatti che incontrano e colmando le depressioni presenti (autorimesse interraste, scantinati, aree naturalmente depresse, ecc.).

**Prescrizioni PGT:**

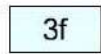
1. Gli eventuali interventi di viabilità, nuova edificazione, ricostruzione, ampliamento e rimodellamento del terreno dovranno essere preceduti da indagini geologiche e geotecniche che valutino la compatibilità dell'intervento stesso con le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche del sito.
2. Per i nuovi edifici si consiglia di prevedere alcuni accorgimenti costruttivi localizzati in corrispondenza delle potenziali vie d'accesso delle acque all'edificio (finestre a raso, bocche di lupo, porte, scivoli dei garage, etc.), al fine di evitare che eventuali acque di scorrimento superficiale possano raggiungere gli edifici stessi.
3. L'impermeabilizzazione delle superfici è sconsigliata.

**Carta di fattibilità – Estratto Studio geologico PGT**





3e - Aree vulnerabili dal punto di vista idraulico a bassa pericolosità;  
 - area potenzialmente allagabile a bassa pericolosità, classificata come area Cn del PAI (art. 9, comma 9 delle N.d.A. del PAI);  
 - area occasionalmente allagata;  
 - area interessata da scorrimento superficiale e trasporto di materiale detritico in occasione di intense precipitazioni.

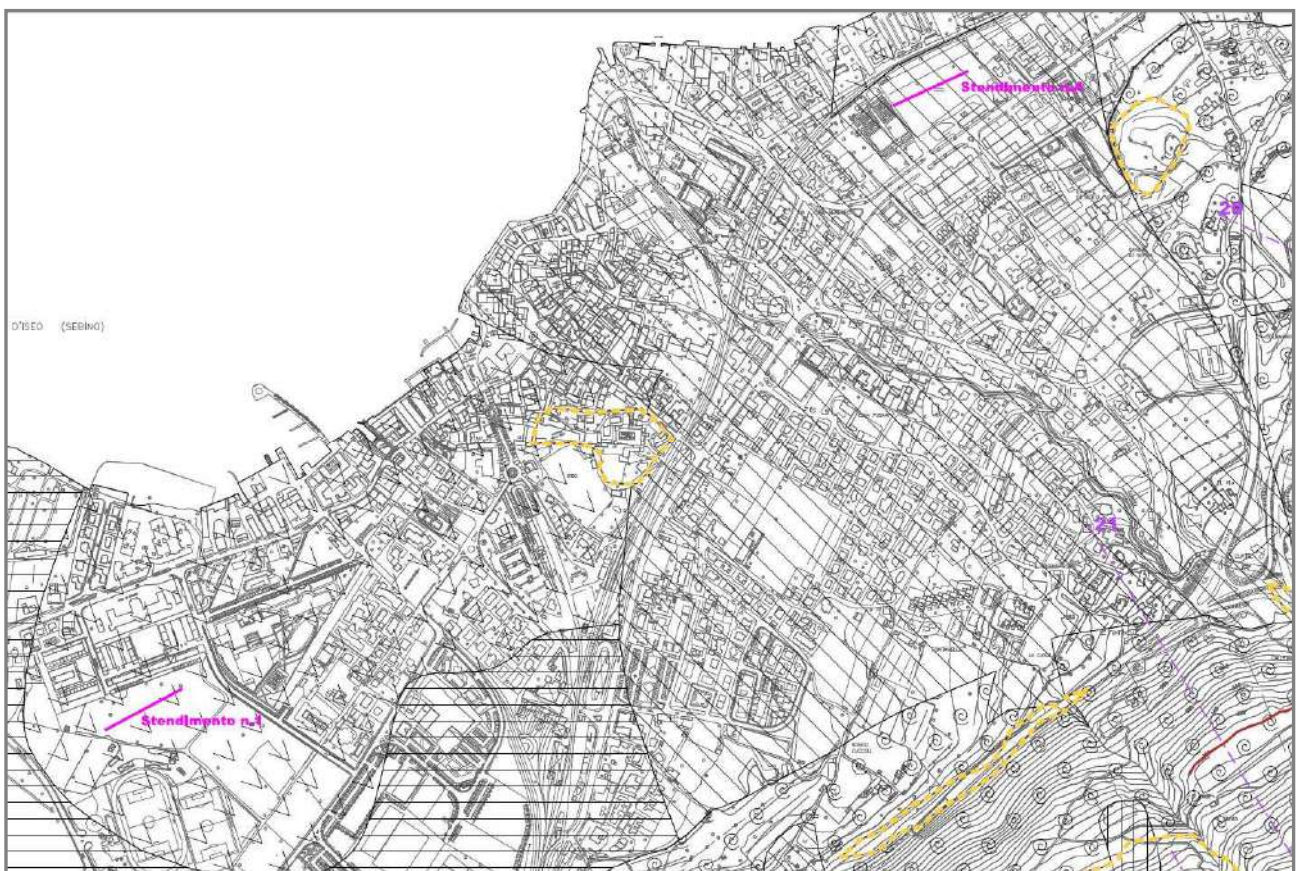


3f - Area di conoide quiescente o inattivo mai interessata da fenomeni alluvionali documentati, classificata come area Cn del PAI (art. 9, comma 9 delle N.d.A. del PAI).

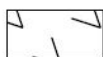
L'area non rientra nelle fasce di rispetto del reticolo idrico nè nelle aree di salvaguardia ad uso idropotabile.

Lo **scenario di pericolosità sismica locale** è rappresentato da una zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e **conoide deltizio-lacustre Z4b** che può presentare come effetti amplificazioni litologiche.

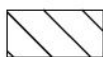
### Carta della pericolosità sismica locale -PSL



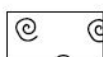
#### Amplificazioni litologiche



Z4a - Zona di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi.



Z4b - Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre.



Z4c - Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi.



Traccia di sezione utilizzata per l'analisi dell'amplificazione topografica.



Stendimento di sismica a rifrazione.

### *Sismicità del territorio*

*Scenari per i quali è prevista l'applicazione diretta del terzo livello di approfondimento per la quantificazione dei fenomeni di instabilità e dei cedimenti (D.G.R. 28-05-2008 n. 8/7374 - All. 5, § 2.3.1. e 2.3.2.).*



Z1a - Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi.



Z1b - Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti.



Z1c - Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio frana.



Z2 - Zona con terreni di fondazione particolarmente scadenti.

*Scenari per i quali per i quali risulta un Fa maggiore del valore di soglia al cui interno è prevista l'applicazione diretta del terzo livello di approfondimento o l'utilizzo dello spettro di norma caratteristico della categoria di sottosuolo superiore. (D.G.R. 28-05-2008 n. 8/7374 - All. 5, § 2.2.2. e 2.3.3.).*



Z4a - Zona di planura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi.



Z4b - Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide delizio-lacustre.

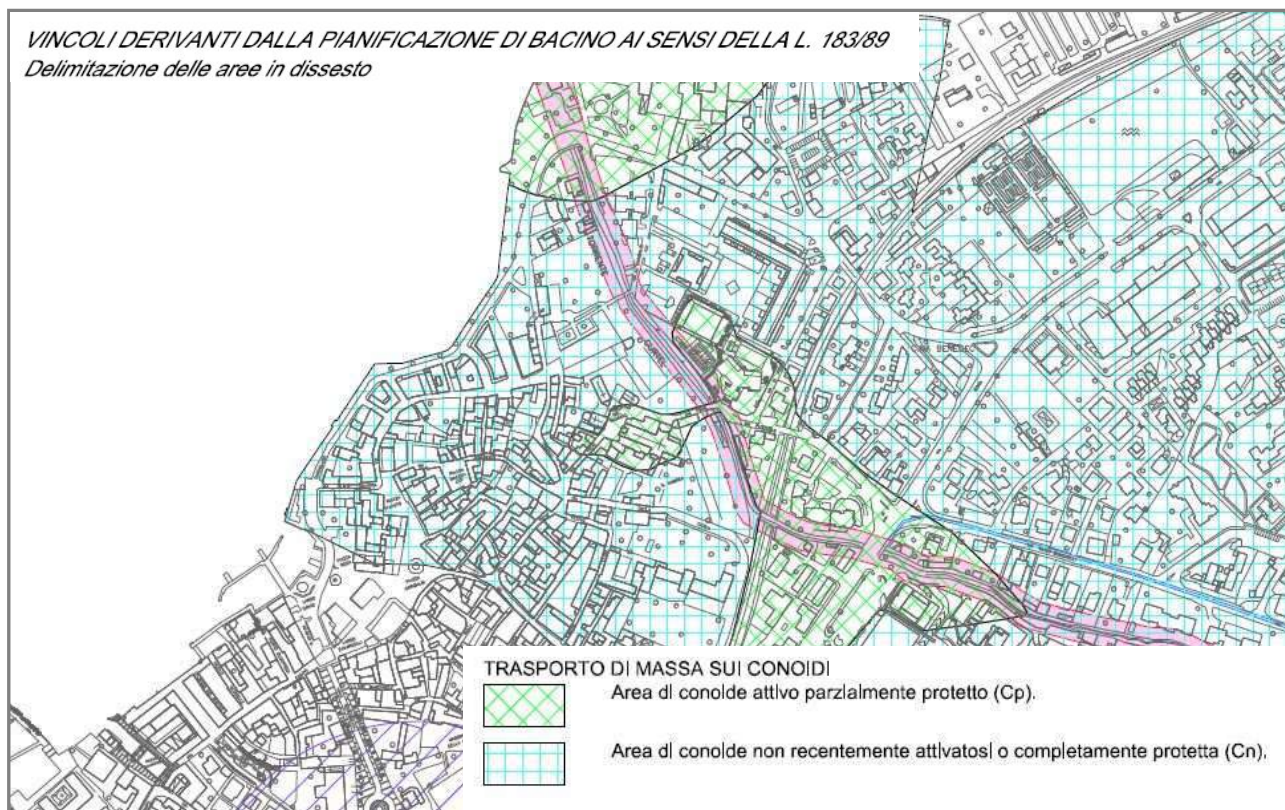
In seguito all'applicazione del secondo livello di analisi nello studio geologico per il PGT, come previsto dalla D.G.R. n. 8/1566 del 22/12/2005 e successiva D.G.R. n. 8/7374 del 28/05/2008, è stata rilevata la presenza sul territorio di aree soggette a fenomeni di amplificazione litologica superiori a quanto previsto dalla normativa tecnica nazionale (D.M. 14 gennaio 2008).

Per quanto riguarda le aree con amplificazione litologica che ricadono nello scenario in esame “Z4b – Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide delizio-lacustre” in fase di progettazione *per tipologie edilizie con periodo proprio compreso tra 0,1 - 0,5 s*, qualora l'indagine geologica-geotecnica (ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008) evidenzia la presenza di terreni riferibili alla *categoria di sottosuolo C*, si dovrà applicare lo spettro di norma riferito alla *categoria di sottosuolo D* o, in alternativa, realizzare un approfondimento applicando l'analisi di 3° livello prevista dalla D.G.R. n.8/7374 del 28 maggio 2008 (all. 5) sulla base di dati sito-specifici.

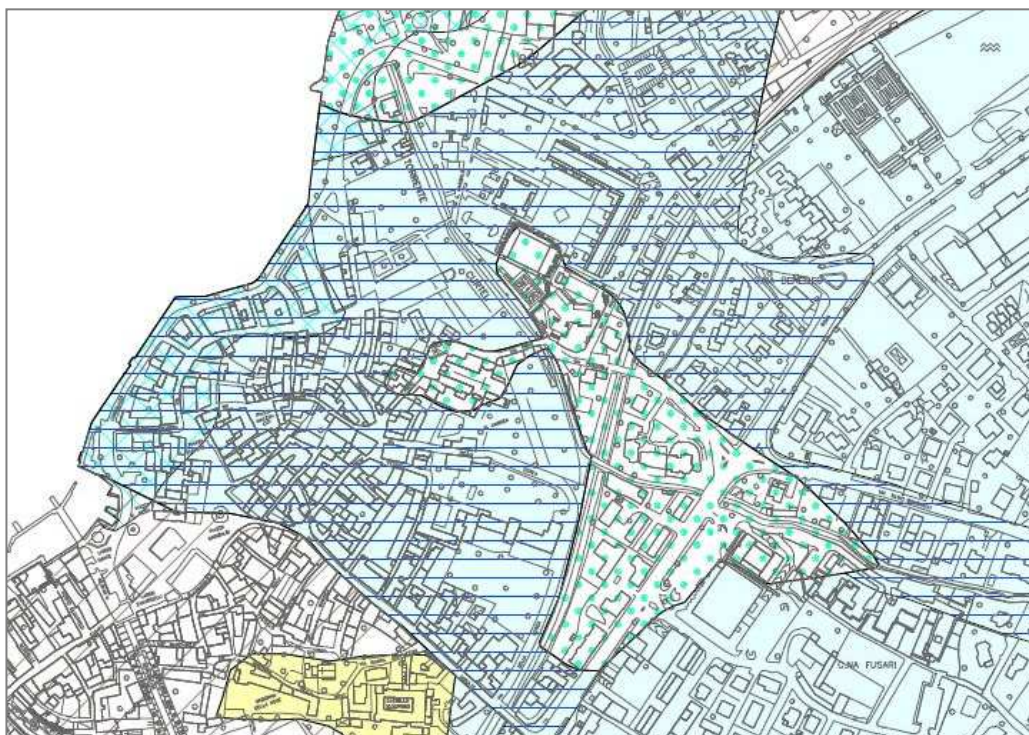
Per gli **scenari di amplificazione litologica (Z4)**, qualora in fase di progettazione le indagini geologico-geotecniche (ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008) *evidenzino dei risultati in contrasto con quanto emerso dal presente studio*, sulla base di **dati geofisici sito-specifici** sarà possibile applicare nuovamente la procedura di secondo livello prevista dall'allegato 5 della D.G.R. n.8/7374 del 28 maggio 2008 per la valutazione della reale amplificazione sismica locale.



Per quanto riguarda la **carta dei vincoli per la difesa del suolo del PGT** il sito presenta un vincolo PAI legato al trasporto di massa su conoide, l'area si trova su conoide non recentemente attivatosi o completamente protetta.







Per quanto riguarda la **carta di sintesi** che prende in considerazione la pericolosità/vulnerabilità idraulica, l'area in oggetto rientra nelle “Aree vulnerabili a bassa pericolosità idraulica”:





**AREE VULNERABILI DAL PUNTO DI VISTA IDRAULICO**



-  Area potenzialmente allagabile ad alta pericolosità.
-  Aree vulnerabili dal punto di vista idraulico a bassa pericolosità:
  - area occasionalmente allagata
  - area potenzialmente allagabile a bassa pericolosità
  - area interessata da scorrimento superficiale e trasporto di materiale detritico in occasione di intense precipitazioni
-  Area potenzialmente soggetta ad allagamenti da parte del lago.
-  Area di conoide quiescente o inattivo mai interessata da fenomeni alluvionali documentati.

Per quanto riguarda il **Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale PTCP** del 2014 (**Tav.3.1Sez B– Ambiente e rischi e Tav 3.2Sez.B – Inventario dei dissesti**) l'area rientra in una conoide definita come Cn in base al PAI. .

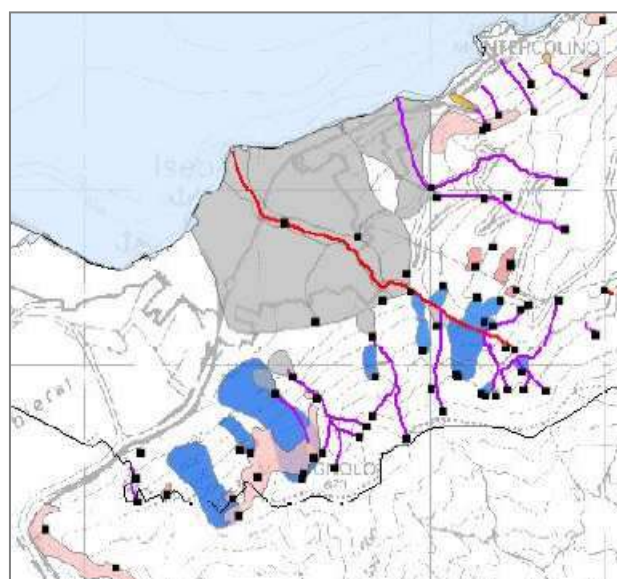
**Tav 3.1 PTCP**





**Aree di cui all'art.9 NTA P.A.I.**

-  Area di conoide non recentemente attivatosi o completamente protetta (Cm)
-  Fiumi afferenti ai laghi per un tratto di 10 km

**Tav 3.1 PTCP**

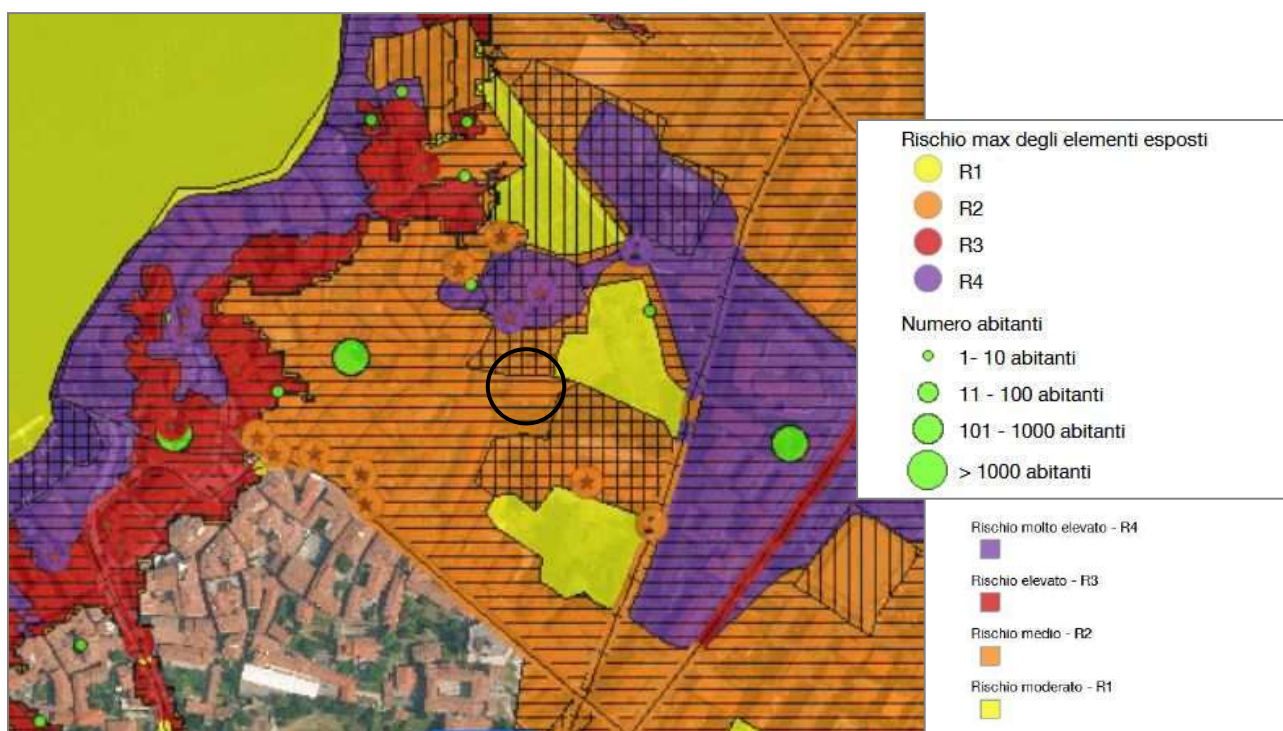
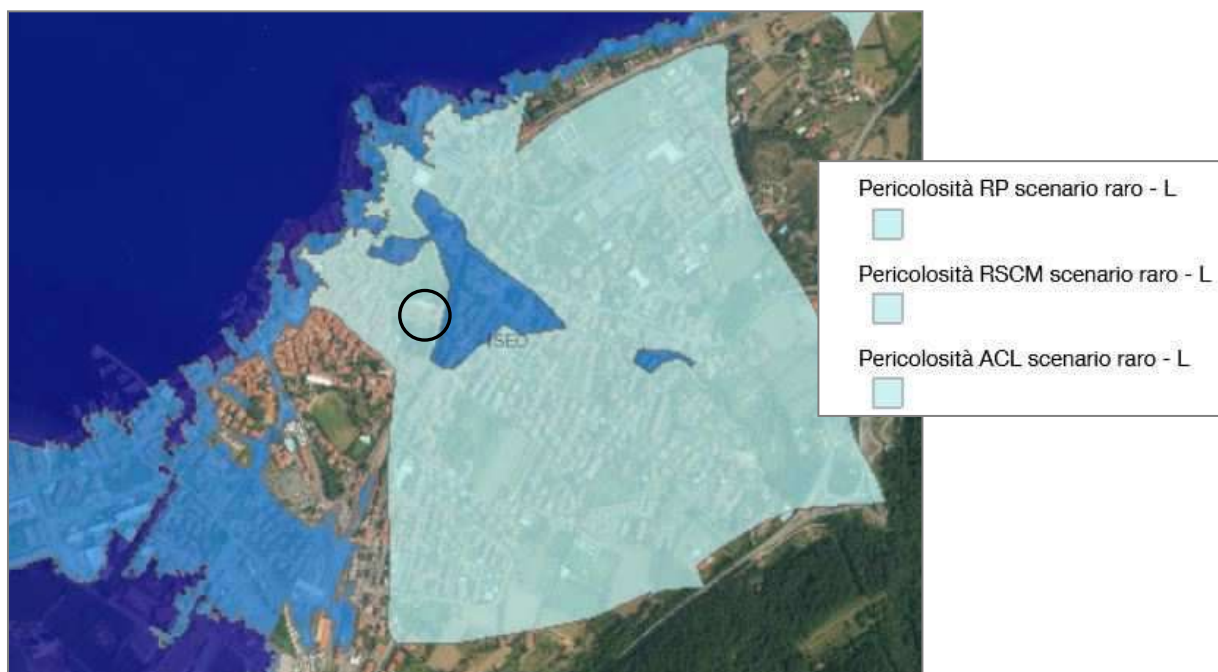


-  Conoidi
-  colamento "rapido" Attivo/riattivato/sospeso

Per quanto riguarda il **Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)**, predisposto in attuazione del d.lgs 49/2010 di recepimento della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE, adottato con delibera 17/12/2015 n 4 e approvato con DPCM 27/10/2016, secondo la recente cartografia della revisione 2015, l'area si presenta allagabile con una pericolosità legata al reticolo secondario collinare e montano (RSCM) con scenario raro (P1/L) riferito alla piena rara con Tr di 500 anni ed un rischio medio pari a R2.

In base al DGR X/6738 del 19/06/2017 ("Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del PGRA.....") le aree esondabili che sono già individuate nell'allegato 2 del PAI mantengono la normativa già vigente ai sensi dell'art. 9 comma 9 (Cn) secondo il quale compete alle regioni ed agli enti locali, attraverso gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica regolamentare le

attività consentite, i limiti e i divieti; gli interventi ammissibili devono in ogni caso essere assoggettati ad uno studio di compatibilità con le condizioni del dissesto validato dall'autorità competente.



Per quanto riguarda il regolamento regionale 23 novembre 2017 n. 7 e s.m.i. recante criteri e metodi per il rispetto del **principio dell'invarianza idraulica ed idrologica** ai sensi dell'art. delle legge regionale n.12 11/03/2005 il comune di Iseo presenta una **criticità idraulica bassa (C)**, tale normativa che ha subito delle proroghe a seconda delle diverse tipologie d'intervento è stata aggiornata ad aprile del 2019.

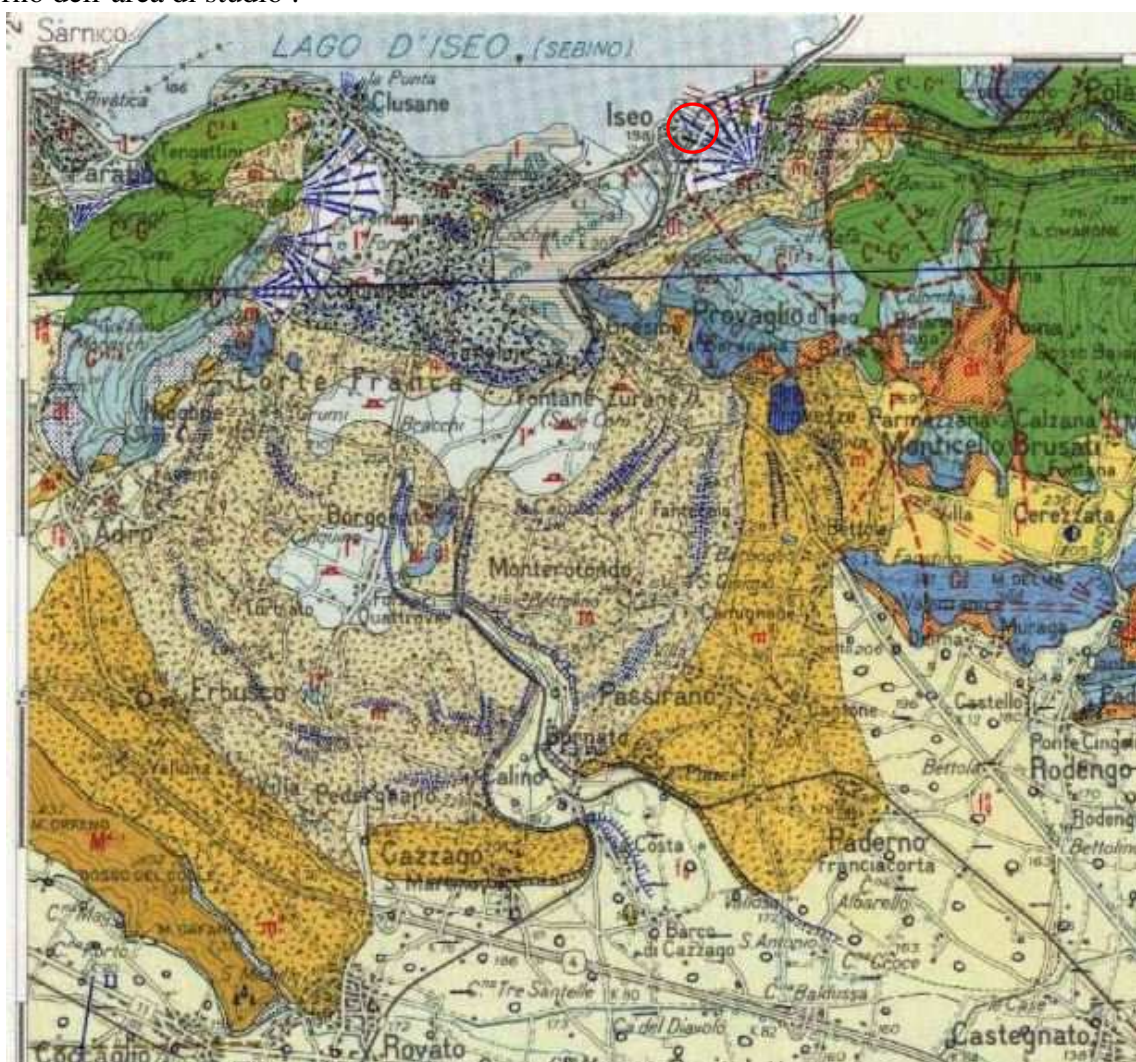


## 5. Inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico

Secondo la Carta geologica d'Italia a scala 1:100000 - Foglio 47 Brescia – l'area ricade nei depositi di conoide di deiezione alluvionale sabbioso ghiaiosi post glaciali sovrastanti alle morene ghiaiose **m<sup>w</sup>** con ciottoli calcarei prevalenti e terreno di alterazione bruno, appartenenti alle cerchie più interne wurmiane dell'anfiteatro sebino.

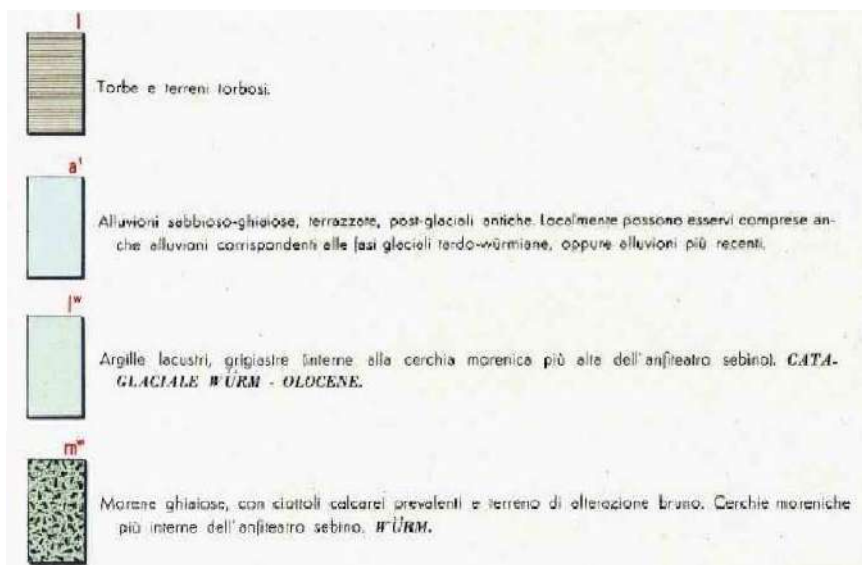
Tali morene ricoprono il substrato roccioso costituito a Monte del sito e a N dalla Formazione delle Maiolica C<sup>3</sup>-G<sup>11</sup> mentre appena a S alla base del del Castello Oldofredi affiora il Selcifero Lombardo G<sup>11-8</sup> (giacitura NNE inclinata di 25-30°). I suddetti affioramenti costituiscono il fianco diritto delle sinclinale coricata di Polaveno il cui fianco rovescio si trova al di sotto dell'accavallamento o sovrascorrimento di punta dell'Orto che ha portato formazioni più antiche quali la Corna ed il gruppo del Medolo a sovrascorrere su formazioni più recenti durante l'orogenesi alpina.

Tale complicazione tettonica determina la presenza di faglie talora di svincolo ed assi di pieghe ad andamento rispettivamente grossomodo N-S (NNE-SSW e NW-SE) ed E-W (sinclinale di Polaveno). Si riporta di seguito un estratto della carta geologica e la successione presente nell'intorno dell'area di studio :

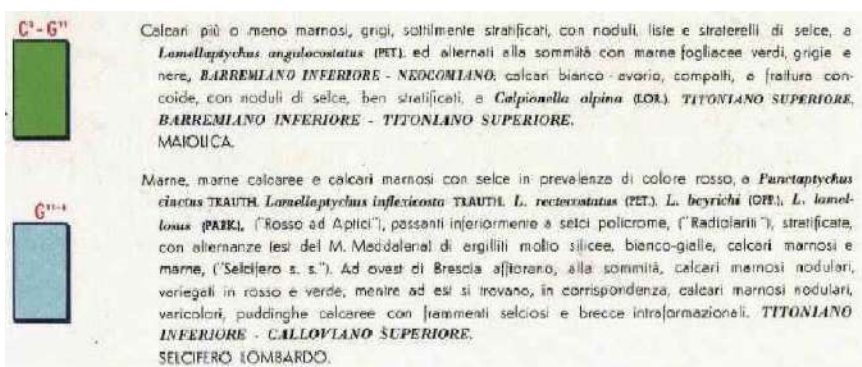




## Depositi quaternari



## Substrato roccioso



Il deposito di conoide è costituito prevalentemente da materiali grossolani provenienti da monte mentre a SW del centro storico di Iseo sussistono grandi spessori di materiali argillosi fini lacustri con presenza di torbe.

Secondo il più recente studio del PROGETTO CARG che ha redatto i nuovi fogli al 50.000 rivedendo le formazioni geologiche e le coperture quaternarie, l'area in esame è ubicata nel Foglio ISEO e si trova all'interno dei depositi quaternari appartenenti alla glaciazione di Cantù.

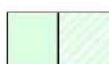
Le glaciazioni quaternarie del Sebino appartenenti all'Anfiteatro di Franciacorta sono state riclassificate secondo lo schema riportato di seguito:







## Unità ubiquitarie



Pg

**Postglaciale:** massi e ghiaie da massive a gradate, a supporto elastico o di matrice sabbiosa calcarea; clasti da spigolosi a subspigolosi; litotipi derivanti dai versanti adiacenti: depositi di versante s.l. o felda detritiche. Diamicton (\*) da massivi a gradati, a supporto di matrice limosa, calcarea, clasti da subspigolosi ad arrotondati; clasti derivanti dai depositi superficiali affioranti localmente: depositi di debris-flow e depositi colluviali. Sabbie e limi sabbiosi, calcarei; ghiaie stratificate, a supporto di matrice sabbiosa, clasti subarrotondati; petrografia a forte dominante locale: depositi alluvionali s.l. e di conoidi alluvionale. Limi e sabbie, da massivi a laminati, torbe; depositi palustri e di torbiera. Superficie limite superiore caratterizzata da: profilo di alterazione con profondità (\*) inferiore a 50 cm; colore (\*) 10 YR; litotipi non o poco alterati (solo cortex); morfologia ben conservata o ancora in evoluzione.

*Pleistocene Superiore - Olocene*

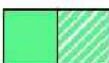


CMA

**Allogruppo della Colma del Piano (indistinta):** depositi glaciali, fluviali e di conoidi, lacustri. Superficie limite superiore poligenica e polifasica, coltre calcica non osservata, profilo di alterazione assente o con profondità massima molto variabile.

*Pliocene Superiore (?) - Pleistocene Superiore*

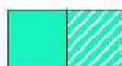
**Unità di Valzella (Cvz):** depositi glaciali (in prevalenza depositi glaciali di fondo), depositi di contatto glaciale; depositi fluvioglaciali (da ghiaie a limi). Coltre calcica non osservata. Morfologia solitamente ben conservata; matrice alterata di colore compreso tra 7,5 e 10 YR. Profilo di alterazione con spessore massimo osservato non superiore ad 1,0 m.



MAI

**Meiolica:** calcari pelagici (calclutiti) biancastri e grigio-chiaro, in strati ben definiti di spessore da centimetrico a decimetrico, a frattura conoide, attraversati da frequenti e minute stroliti. Noduli e liste di selce, prevalentemente bionda alla base e grigio-nera verso l'alto. Nella porzione superiore sono presenti interstrati di chales nere, livelli intraformazionali risedimentati e slumpings. La comparsa di quest'unità è spesso annunciata da calcari marnosi rosati e verdognoli in strati da centimetrici a decimetrici ("calcari variegati"), che segnano la transizione al sottostante Rosso ad Aptici. Il contenuto fossilifero è costituito da calpionelle, aptici, foraminiferi, radiolari, e frequenti associazioni a nannofossili calcarei. Alla base dell'unità si rinvencono talora breccie disorganizzate (MAI01), in corpi lentiformi di estensione limitata. Spessore 200-250 m

*Titoniano superiore - Aptiano inferiore*



RAP

**Rosso ad Aptici:** calcari marnosi, marne calcaree a marmo, spesso silicei, di colore prevalentemente rosso, in banchi e strati, con selce rossastra o talora verdognola per lo più disposta in listarelle. Il passaggio con la soprastante Meiolica è di norma caratterizzato dalla presenza di "calcari variegati", con tonalità di colore che variano tra il rossiccio e il verdino, e localmente da facies brecciate (riferibili presso Polavano al Valanginiano inferiore). Sono presenti aptici, balammiti e, nella microfacies, anche radiolari, rari spicole di spugna, ostracodi e lamellibranchi pelagici. Calcitorbiditi a Saccocoma sono presenti nei livelli di età Kimmeridgiano superiore. Spessore: 35-85 m

*Kimmeridgiano superiore - Titoniano inferiore*

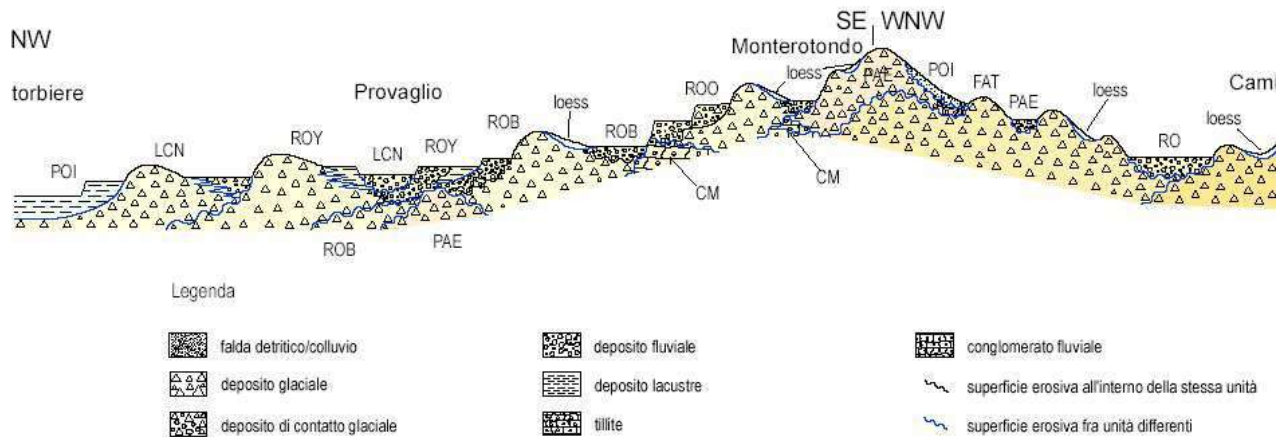


RSL

**Radiolariti del Selcifero Lombardo:** selci policrome in strati centimetrici, di colore prevalentemente verdastro nella parte inferiore e rosso nella parte superiore. Localmente si osservano intercalazioni di marmo e argilliti. Spessore: 35-65 m

*Batoniano inferiore ? - Kimmeridgiano inferiore*

# SCHEMA DEI RAPPORTI STRATIGRAFICI (area torbiere - Rodengo Saiano)

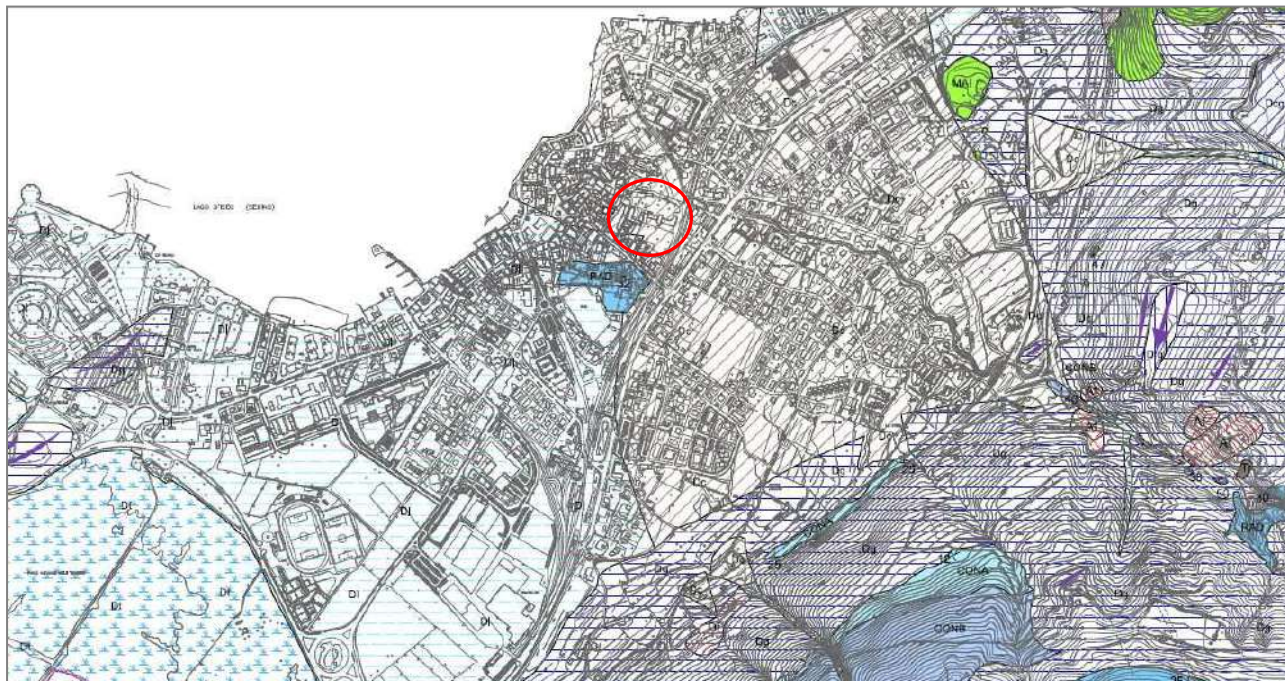


Nel dettaglio l'area ricade nel sintema di Cantu (ultima glaciazione) facies di conoide alluvionale appartenente alle unità ubiquitarie postglaciali (Pg): depositi di conoide alluvionale costituiti da sabbie e limi sabbiosi calcarei e ghiaie stratificate a supporto di matrice sabbiosa clasti subarrotondati. Si noti *l'affioramento di Radiolariti* che emerge 80m a S del parco delle rimembranze *al di sotto della torre del castello con giacitura verso N.*





Nella *carta geologica dello studio geologico del PGT* i depositi in esame sono indicati come: depositi di conoide da recenti ad antichi che possono appoggiare sui depositi morenici/substrato roccioso:



#### DEPOSITI QUATERNARI CONTINENTALI

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">Dc</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">AI</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">DI</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">Dt</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">Dg</div> | <p><b>DEPOSITI DI CONOIDE</b><br/>         Depositi di conoide da recenti ad antichi costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie in matrice limosa.<br/>         Olocene - Pleistocene superiore</p> <p><b>DEPOSITI ALLUVIONALI</b><br/>         Depositi torrentizi a granulometria grossolana.<br/>         Olocene - Pleistocene superiore</p> <p><b>DEPOSITI LACUSTRI</b><br/>         Depositi essenzialmente limoso - argillosi spesso con livelli di torba.<br/>         Pleistocene superiore (?) - Pleistocene superiore</p> <p><b>DEPOSITI DI TORBIERA</b><br/>         Depositi torbosi a matrice limoso-argillosa con elevata presenza di materiale organico.<br/>         Olocene - Pleistocene superiore</p> <p><b>DEPOSITI GLACIALI</b><br/>         Depositi caratterizzati da ghiaie e blocchi in matrice limoso - argillosa (tili di alloggiamento e in subordine tili di ablazione).<br/>         Pleistocene superiore - Pliocene superiore (?)</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

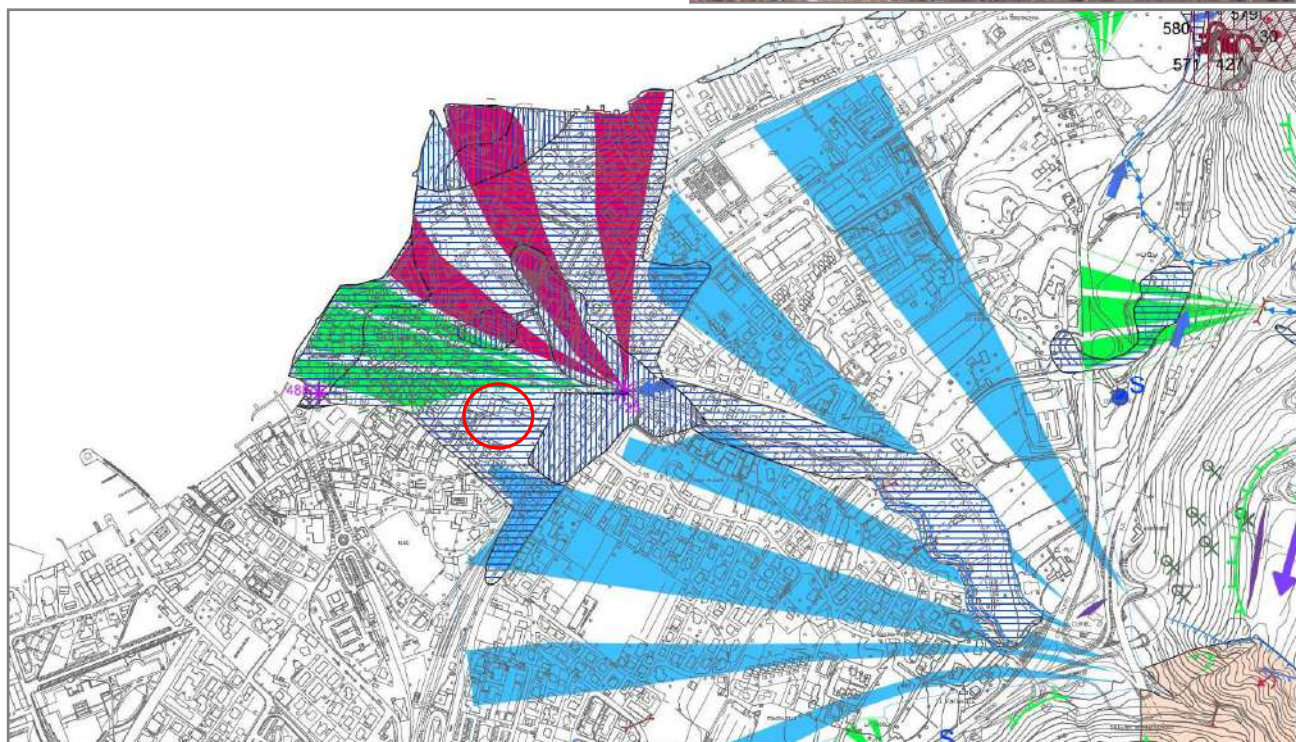
#### SUBSTRATO ROCCIOSO

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">MAI</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">RAP</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30px; height: 30px; margin-bottom: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">RAD</div> | <p><b>MAIOLICA</b><br/>         Calcarei pelagici (calcilutiti) biancastri e grigi chiari, in strati ben definiti di spessore da centimetrico a decimetrico, a frattura concolide. Presenza di noduli e liste di selce in tutta la sequenza, di colore variabile. Alla base sono spesso presenti calcari marnosi rosati e verdognoli in strati da centimetrici a decimetrici ("calcari variegati"). Spessore da 200 a 250 m.<br/>         Titoniano superiore - limite Aptiano inferiore / superiore</p> <p><b>ROSSO AD APTICI</b><br/>         Calcarei marnosi, marne calcaree e marne, spesso silicei, di colore prevalentemente rosso, in banchi a strati, con selce rossastra o talora verdognola per lo più disposta in listarelle. Spessore da 35 a 85 m.<br/>         Kimmeridgiano superiore - Titoniano superiore</p> <p><b>RADIOLARITI</b><br/>         Selci pollicrome in strati centimetrici, di colore prevalentemente verdastro nella parte inferiore e rosso nella parte superiore. Localmente si osservano intercalazioni di marne ed argilliti.<br/>         Spessore da 35 a 65 m.<br/>         Batoniano inferiore - Kimmeridgiano superiore</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

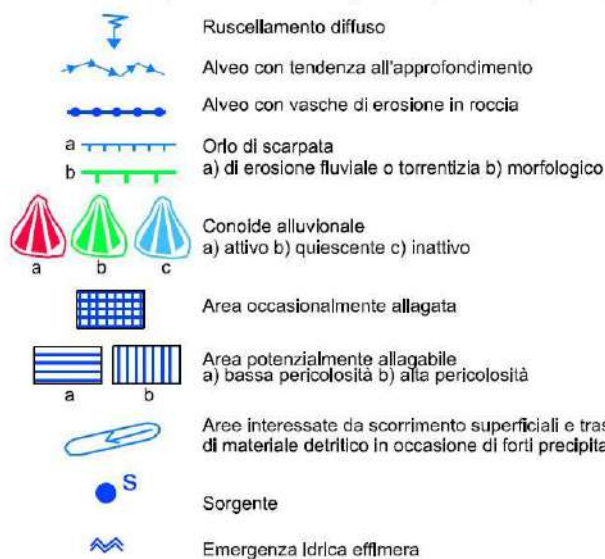
**Dal punto di vista geomorfologico** la zona in esame è ubicata su delle conoidi deltizie di diversa età. In particolare la morfologia dell'area in esame posta a quota 194 mslm, è caratterizzata attualmente da una superficie subpianeggiante che un tempo degradava verso il lago.

Nel parco delle Rimembranze il lato E è attualmente rialzato di 3-4 m e sostenuto da un muro in pietrame sul lato strada. La ferrovia è stata incisa nei depositi di conoide che contengono anche grossi blocchi arrotondati.





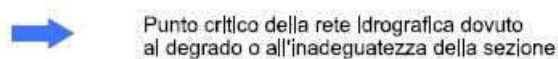
### Forme, processi e depositi per acque superficiali



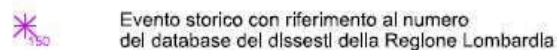
### Forme, processi e depositi glaciali



### Forme e depositi antropici



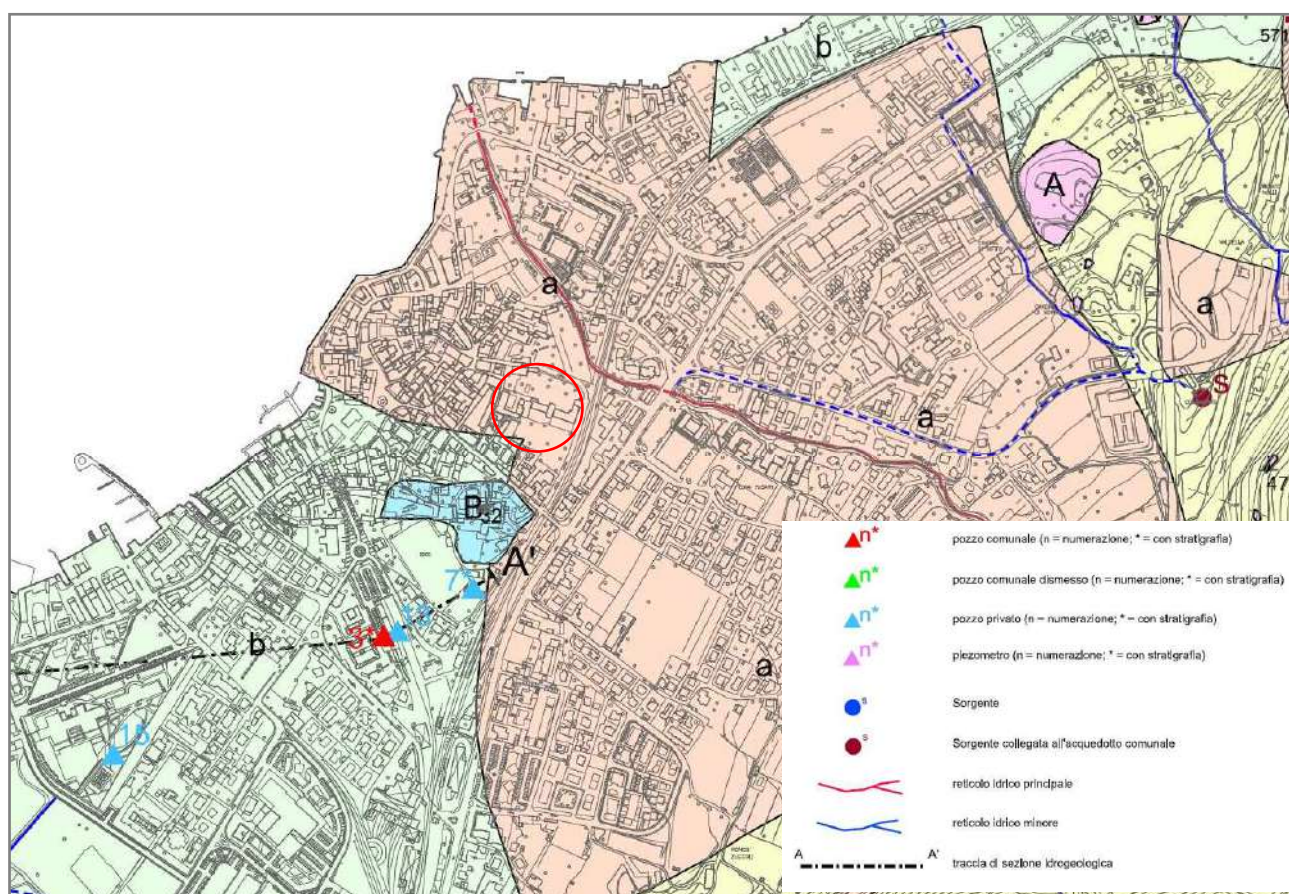
### Eventi storici



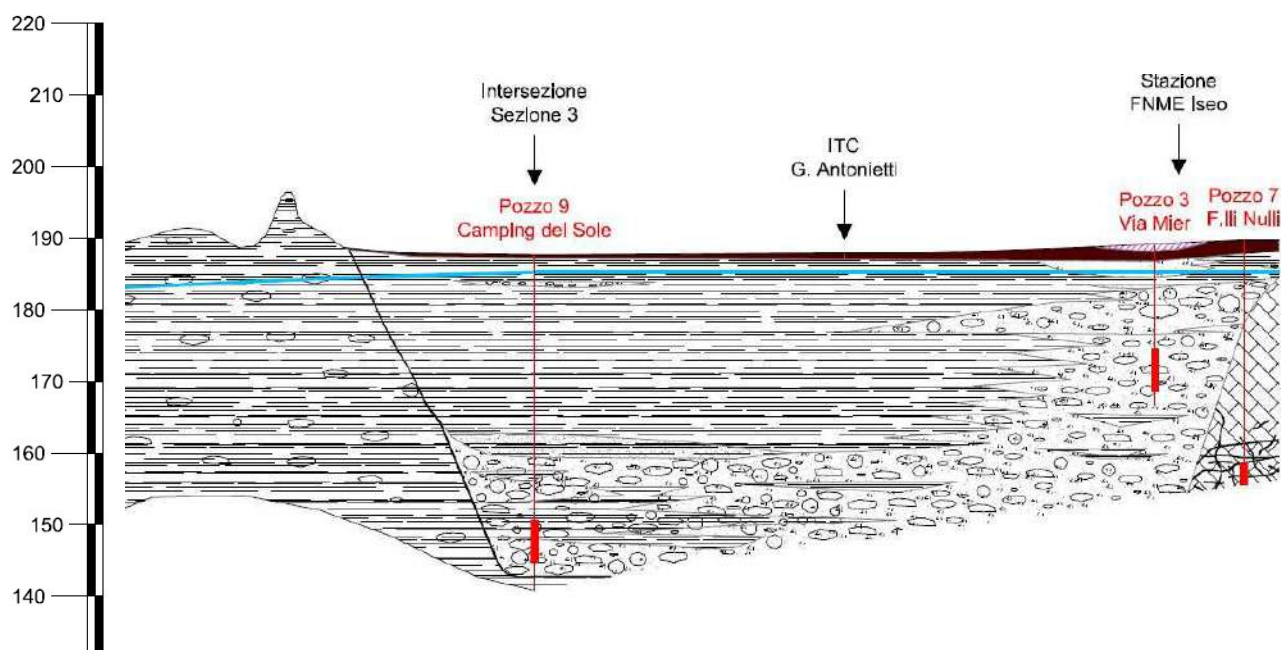


L'area come già descritto è collocata sulle aree potenzialmente allagabili a bassa pericolosità sulla quale è indicato un evento storico di allagamento con riferimento al numero 488 del database della Regione Lombardia ed è prossima ad un punto critico della rete idrografica per inadeguatezza sezione.

Per quanto riguarda **la soggiacenza della falda** utilizzata dai pozzi esistenti sul territorio comunale, in base alla sezione tracciata nella carta idrogeologica del PGT, eseguita fino ai piedi dell'affioramento alla base del castello essa risulta a circa 5-6 m dal p.c. (il livello si riferisce all'anno 2010) con deflusso diretto dal lago verso l'interno ed influenzabile dal livello di quest'ultimo ed in seguito a precipitazioni particolarmente abbondanti e prolungate il deflusso si può invertire. Si riporta di seguito la carta idrogeologica estratta dal PGT e parte della sezione AA':



DEPOSITI QUATERNARI				
a	Depositi alluvionali e di conoidi, detrito di falda, depositi fluvio-glaciali	Alta o medio alta per porosità	Contengono una falda acquifera di importanza variabile in funzione dello spessore	Alto
m	Depositi glaciali, di contatto glaciale, accumulo di frana, conglomerati e depositi travertinosi	Media o medio bassa per porosità	Circolazione idrica localizzata e di entità variabile	Da basso a medio
b	Depositi lacustri, torbosi e colluviali	Bassa per porosità	Circolazione idrica localizzata e di scarsa entità	Medio-basso



La vulnerabilità intrinseca dell'acquifero è alta.

Si allegano alcune stratigrafie di pozzi prossimi al sito oggetto di studio estratti dalla banca dati del sottosuolo della Regione Lombardia (**Allegato n.1**).

Nella zona compresa tra la stazione di Iseo e la Tangenziale sud il livello piezometrico è legato a quello del Lago di Iseo e dello specchio d'acqua delle torbiere. In particolare i rilievi piezometrici effettuati nell'ambito dello *Studio idrogeologico di fattibilità di un parcheggio interrato in viale Repubblica* (Ziliani L., 2010) evidenziano che in condizioni statiche la superficie piezometrica è molto piatta e presenta generalmente un gradiente molto basso diretto dal lago verso l'interno della piana (da nord-ovest verso sud-est). In seguito a precipitazioni particolarmente abbondanti e prolungate può verificarsi un aumento dell'alimentazione da parte del conoide del T. Cortelo in grado da determinare un'inversione del gradiente da sud-est verso nord-ovest. In condizioni intermedie la superficie piezometrica è piatta ed il livello del lago e quello della falda sono in equilibrio.

La **falda superficiale** è alimentata dalle acque meteoriche e di scorrimento superficiale, dai corsi d'acqua e dai circuiti idrici provenienti dai versanti montuosi. **L'escursione piezometrica annuale è pari a circa 1-2 m.** In occasione di precipitazioni particolarmente intense e prolungate il livello piezometrico si innalza a causa della difficoltà di drenaggio delle acque.

Vi saranno pertanto influenze dirette tra la falda principale e le opere edili nel caso della presenza di vani interrati.



## 6. Piano d'indagine

Per la caratterizzazione geologica e geotecnica di massima dei terreni che costituiscono il sottosuolo dell'area in esame e per la definizione del modello, si sono eseguite:

- indagini di tipo indiretto mediante 3 prove penetrometriche dinamiche DPSH spinte fino a profondità massima di 10-12 m di profondità.

Per la caratterizzazione geofisica del sito, al fine di definire la categoria di sottosuolo ai sensi del DM 17-01-2018, è stata eseguita :

- un'indagine di sismica a rifrazione in onde P e onde S, mediante uno stendimento con 24 geofoni e 7 punti di energizzazione, combinata con indagine MASW di tipo attivo e con un' indagine HVSr a stazione singola.

Essendo la scuola in attività si è preferito non eseguire indagini dirette tipo scavi legate al ripristino dei luoghi e le indagini sono state eseguite e distribuite compatibilmente alla presenza degli studenti in luoghi che non interferissero con le attività della scuola.

### 6.1. Prove penetrometriche dinamiche DPSH e modello geologico-geotecnico preliminare

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni si sono eseguite il 15/10/2019 3 prove penetrometriche dinamiche a punta conica (DPSH) spinta fino a rifiuto e a profondità massime di 13.3 m dal p.c.di cui due con rivestimento.

Il penetrometro dinamico utilizzato (penetrometro semovente superpesante PAGANI TG 73/200 kN) ha le seguenti caratteristiche standard: peso del maglio 73 kg, altezza di caduta 75 cm. Il numero dei colpi ottenuto per approfondire la punta di 30 cm  $N_{DP}$  è stato trasformato in  $N_{SPT}$  (numero dei colpi per approfondire il campionatore standard di 30 cm per le prove SPT o standard penetration test).

Viene riportato in allegato (diagrammi) il numero di colpi necessari per un affondamento della punta del penetrometro  $N_{DP}$  e del rivestimento con avanzamento di 30 cm secondo gli standard e i parametri ricavati tramite correlazioni empiriche quali:

- l'angolo di attrito drenato  $\phi'$ , la densità relativa  $D_r$ , il peso di volume naturale  $\gamma_{nat}$  e il modulo di deformazione elastica drenato  $E'$  per i terreni granulari;
- il peso di volume naturale  $\gamma_{nat}$  e la resistenza al taglio non drenata  $C_u$  e il modulo di deformazione confinato  $M_o$  per quelli coesivi.

In allegato sono riportati gli output di elaborazione (**Allegato n.2**), secondo vari autori, delle caratteristiche geotecniche che vengono riassunte nelle seguenti tabelle.

**Prova DPSH n. 1**

Unità	Litologia	Profondità (m)	N <sub>DP</sub>	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dr (%)	$\phi'$ (°)	E' (MPa)	Cu (kPa)	Mo (MPa)
U1	Ghiaia con sabbia ciottolosa GW-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	0.0-2.7	11-16	18-19	70-100	38-42	30-45	-	-
U2	Alternanze di <b>Sabbia limosa, limi sabbioso argillosi</b> , sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose ciottolose Moderatamente addensato SP-SM/CL-ML /GP-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	2.7-4.8 4.8-5.7 5.7-9.9 9.9-11.1	5-8 3-4 10-20	17-19 18-19 19-20	40-60	32-35 29-32 38-42	15-30 - 30-40	40-60	2-3
U3	Ghiaie sabbiose addensate GP-GM <b>Deposito di conoide deltizia antica</b>	11.1-12.3	21-24	20-21	58-62	40-41	39-41	-	-
Note	profondità falda: 5.52 m Il foro si chiude a 5.9 m di profondità								

**Prova DPSH n. 2 (+0.5m rispetto DP1)**

Unità	Litologia	Profondità (m)	N <sub>DP</sub>	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dr (%)	$\phi'$ (°)	E' (MPa)	Cu (kPa)	Mo (MPa)
U1	Ghiaia con sabbia ciottolosa GW-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	0.0-1.5	11-19	18-19	70-100	37-42	30-50	-	-
U2	Alternanze di <b>Sabbia limosa, limi sabbioso argillosi</b> , sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose ciottolose Moderatamente addensato SP-SM/CL-ML /GP-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	1.5-2.7 2.7-3.9 3.9-6.0 6.0-7.2 7.2-10.8	5-7 2-4 10-18	17-19 18-19 19-20	40-60	34-36 29-30 38-40	15-30 - 25-35	40-80	2-4
U3	Ghiaie sabbiose addensate GP-GM <b>Deposito di conoide deltizia antica</b>	10.8-12.3	20-23	20-21	55-60	39-42	33-35	-	-
Note	profondità falda: 6.04 m								

**Prova DPSH n. 3**

Unità	Litologia	Profondità (m)	N <sub>DP</sub>	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dr (%)	$\phi'$ (°)	E' (MPa)	Cu (kPa)	Mo (MPa)
U1	Ghiaia con sabbia ciottolosa GW-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	0.0-4.2	13-27	18-19	70-100	39-45	30-70	-	-
U2	Alternanze di <b>Sabbia limosa, limi sabbioso argillosi</b> , sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose ciottolose Moderatamente addensato SP-SM/CL-ML /GP-GM <b>Deposito di conoide deltizia</b>	4.5-5.4 5.4-6.3 6.3-10.2	6-8 3-4 10-30	17-19 18-19 19-20	40-70	33-34 29-32 38-41	14-29 - 25-42	60-80	2-4
Note	profondità falda: 5.75 m								

Dall'interpretazione dei risultati delle prove dinamiche si possono distinguere, a partire dal p.c.,

**3 unità geologico-tecniche principali** in tutte le prove eseguite:

1. L'unità U1 che si approfondisce verso NE presenta uno spessore di 2-3 m ed è costituita prevalentemente da materiale grossolano ossia da ghiaie con sabbie ciottolose con N<sub>DP</sub> compreso tra 10-30 colpi, non saturo, addensato;

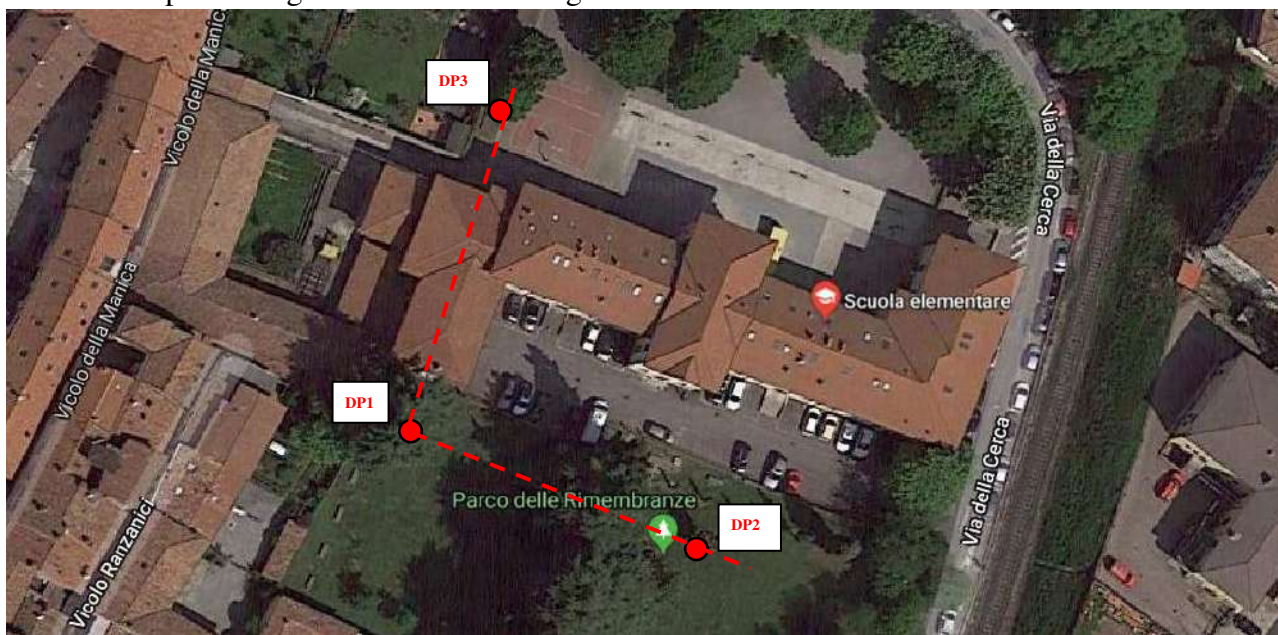
2. L'unità U2 è caratterizzata da alternanze tra orizzonti sabbioso-ghiaiosi o ghiaioso-sabbiosi moderatamente addensati con  $N_{DP}$  compresi tra 6-30 colpi e orizzonti sabbioso limosi argillosi (non si conosce la percentuale della frazione fine essendo le prove indirette, la valutazione di materiale coesivo nasce dalla resistenza all'avanzamento del rivestimento nei tratti in cui supera la resistenza alla punta) con  $N_{DP}$  compresi tra 3-6 colpi e resistenza al rivestimento laterale  $N_{riv}$  superiore alla punta tra i 3-4-m e i 6 m;
3. A partire da 5.5-6.0 m da p.c. tale unità si presenta immersa in falda U2b, i valori di resistenza alla punta risalgono a partire da 6.0 m di profondità circa con valori medi  $N_{DP}$  compresi tra 10 e 20 ;
4. L'unità U3 al di sotto degli 11 m circa si attesta su  $N_{DP}$  di 20-25 colpi per passare intorno ai 13 m ai depositi di conoide antica ben più addensati (da indagine geofisica).

Tali passaggi sono ben correlabili con i principali incrementi delle  $V_p$  e  $V_s$  dell'indagine sismica allegata (Allegato n. 4). Si rinviene la falda a partire da 5.5-6.0 m di profondità da p.c.

In allegato si riporta lo schema del modello geotecnico preliminare rappresentato da una sezione orientata E-W che collega la DP2 alla DP1 e una sezioni orientata S-N che collega la DP1 alla DP3 (Allegato n. 3).

Il modello presenta una buona omogeneità laterale per quanto riguarda i principali passaggi geologici ma una eterogeneità litologica tipica dei depositi di conoide deltizia quale la presenza di lenti/livelli di materiali fini con caratteristiche geotecniche da mediocri a scadenti a diverse profondità comprese tra i 3-4 ed i 6 m di profondità nelle prove DP1 e DP3, mentre nella DP2 tra i 2.5 e i 3.5 m e tra i 6 e i 7 m di profondità da p.c. Tali lenti possono essere responsabili dei cedimenti differenziali dovuti a cedimenti per consolidazione a lungo termine.

Si ubicano le prove eseguite nella ortofoto seguente e le relative tracce delle sezioni di correlazione:





## **7. Analisi sismica del sito**

### **7.1. Premessa**

Lo scopo dell'analisi sismica di un sito è quello di definire, all'interno di un territorio a comportamento macrosismico omogeneo (cioè un territorio dove la sismicità di base è considerata costante) le aree che possono presentare una diversa risposta all'evento sismico, in funzione di particolari condizioni locali di amplificazione sismica oppure di particolari caratteristiche del territorio che possono indurre fenomeni di deformazione plastica permanente (liquefazione, addensamento, frane in terra o in roccia).

Nella progettazione di nuovi edifici e nella verifica di sicurezza di edifici esistenti il fine di questi studi è quello di verificare l'adeguatezza del sito, esaminando in prospettiva sismica il modello geologico e geotecnico opportunamente definito attraverso il piano di indagine e il rilievo di dettaglio.

Per quanto riguarda l'adeguatezza del sito di costruzione si escludono problemi legati agli effetti derivanti dalla vicinanza di faglie e/o discontinuità geologiche importanti e problemi legati ad instabilità di versante; è invece da valutare la risposta sismica locale in superficie (free field, in assenza di manufatti), tenendo in considerazione gli effetti di amplificazione litologico-stratigrafica ed escludendo effetti di natura topografica.

Per quanto riguarda l'adeguatezza del terreno di fondazione sono possibili, seppure di modesta entità e solo in occasione di forti terremoti, cedimenti legati ai possibili fenomeni di densificazione dei materiali, difficilmente stimabili con procedure semplificate;

Poiché i terreni rinvenuti costituiti da ghiaie e sabbie limose con diverso grado di addensamento e si trovano in falda a partire da circa 5.50 m di profondità andranno valutati possibili fenomeni di liquefazione in base ad approfondimenti in fase di progetto definitivo.

Mediante una verifica preliminare in fase di fattibilità si osserva la possibilità di liquefazione dell'orizzonte litologicamente attribuito (attraverso modalità indirette quali le prove DP e non dirette quali le analisi granulometriche/sedimentometriche da eseguirsi sui terreni per la classificazione geotecnica) a sabbie limose /limi sabbiosi argillosi passanti a sabbie ghiaiose/ghiaie sabbiose limose immersi in falda presenti tra i 5.8-13.5 m di profondità identificato mediante una velocità delle onde di taglio  $V_s$  pari a 275 m/s ricavata dalle indagini sismiche effettuate in sito. In prossimità di tale orizzonte mediante un'analisi speditiva che viene illustrata nel paragrafo di verifica alla liquefazione si ottiene un fattore di sicurezza  $F_L$  prossimo o inferiore a 1 utilizzando le relazioni maggiormente cautelative non avendo a disposizione tutti i dati necessari in questa fase preliminare.

Il potenziale di liquefazione lungo la verticale (indice del potenziale di liquefazione  $P_L$ - Iwasaki, 1978) risulta essere basso con valori compresi indicativamente tra 0,5 e 2.

Si rimanda ad un approfondimento d'indagine in fase di progetto definitivo per acquisire più dati mediante prove penetrometriche dinamiche distribuite sull'area d'ingombro degli edifici di progetto e di almeno un sondaggio con SPT in foro e raccolta di campioni sui quali eseguire prove di laboratorio (curva granulometrica, peso su volume, umidità, grado di saturazione, limiti di atterberg con valutazione dell'indice di plasticità IP) per la classificazione geotecnica dei terreni di fondazione per l'utilizzo delle formule e dei parametri più appropriati ai sensi dell'NTC 2018.

Sulla base di tali indagini si potrà affinare la verifica anche in base alle future scelte fondazionali dell'edificio da demolire e ricostruire (Ex Liceo).

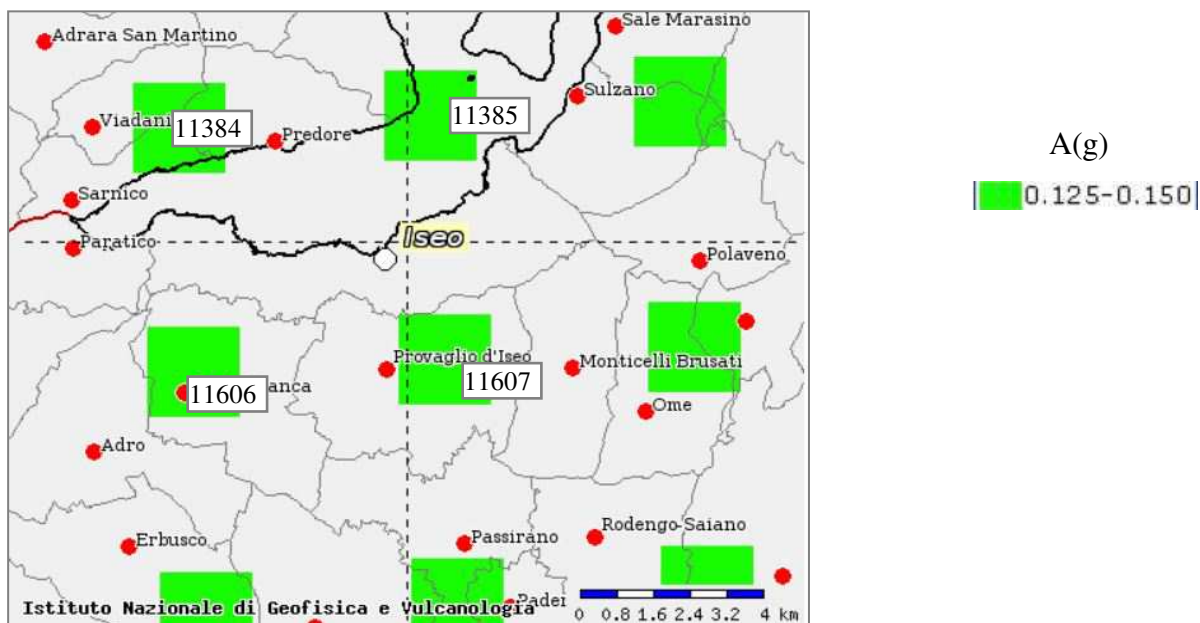
## **7.2. Definizione della pericolosità sismica di base**

Ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni la definizione delle azione sismiche secondo cui eseguire le verifiche sismiche progettuali sono calcolate sulla base dei dati di pericolosità estratti direttamente dalla mappa ufficiale di pericolosità sismica nazionale (valori di  $a_g$ ), mediante l'utilizzo di altri due parametri di significato spettrale ( $F_0$  e  $T_c^*$ ) e di relative formule empiriche per la determinazione della forma spettrale elastica di riferimento (paragrafo 3.2.3. e Tabella 1 allegato B – DM 14-01-08); pertanto la definizione delle azione sismiche è totalmente svincolata dalla zonazione sismica. Per la determinazione dell'azione sismica, da utilizzarsi nelle verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio delle opere di progetto, è necessario calcolare per il sito il valore di accelerazione orizzontale massima attesa su suolo rigido e pianeggiante con una probabilità di eccedenza rispettivamente del 10% e del 63% in 75 anni: **la vita di riferimento di 75 anni è stata scelta assegnando all'opera di progetto una vita nominale di 50 anni e una classe d'uso III.**

A tale scopo sono stati individuati i 4 punti del reticolo di riferimento che circondano il sito in oggetto. Secondo quanto riportato nell'allegato A alle norme, il valore da assegnare al sito può essere calcolato come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Di seguito si riporta la mappa di pericolosità sismica con evidenziati i quadrati dei vertici del reticolo di riferimento rispetto all'ubicazione del sito estratta dall'INGV per un parametro di scuotimento A (g) con probabilità di eccedenza in 50 anni del 10% (50 percentile) Tr 475 anni:





Di seguito si riportano i valori dei parametri spettrali ( $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ ) calcolati per il sito in esame con una probabilità di eccedenza rispettivamente del 10% e del 63% in 75 anni:

<i>Tempi di ritorno anni</i>	<i>Parametri progettuali</i>	<i>Iseo Via Cerca</i>
<i>Tr 712 SLV</i>	$a_g$ (g)	0,157
	$F_0$	2,452
	$T_c^*$	0,284
<i>Tr 75 SLD</i>	$a_g$ (g)	0,063
	$F_0$	2,410
	$T_c^*$	0,247

### 7.3. Indagine sismica eseguita in sito

Nel mese di ottobre è stata condotta sul sito oggetto di studio una campagna di indagini geofisiche di sismica superficiale da parte del Politecnico di Milano finalizzate alla caratterizzazione geofisica.

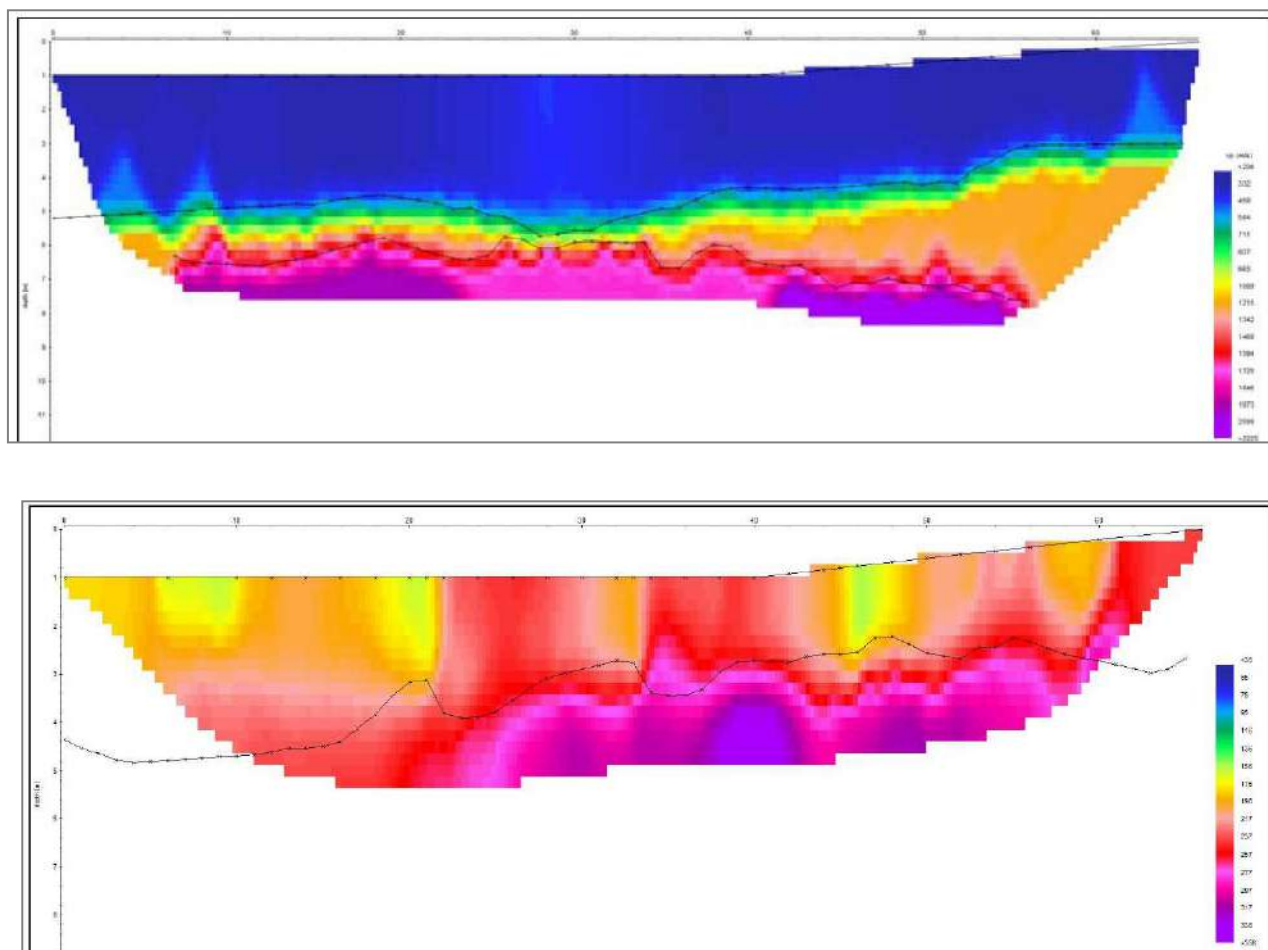
Le indagini eseguite sono state le seguenti :

1. Una indagine lineare di **sismica superficiale combinata** rappresentata da indagine di **sismica a rifrazione in onde P e SH** associata ad **indagine MASW attiva** in configurazione **ZVF, RVF e THF** finalizzate alla ricostruzione del profilo di rigidezza medio e al parametro  $V_{seq}$  ( $V_{s30}$ ) rappresentativo del sito, mediante il quale è possibile definire la categoria di sottosuolo dei terreni ai sensi del NTC 2018;
2. Una **indagine a stazione singola puntuale HVSR** con acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata all'applicazione della tecnica HVSR e alla determinazione della curva H/V del sito per l'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza del sito.

L'utilizzo di indagini sismiche combinate permette di poter migliorare la qualità del modello che si ottiene. Per la descrizione della strumentazione l'acquisizione dei dati, l'elaborazione degli stessi e i risultati delle indagini si rimanda al rapporto allegato (**Allegato n. 4**).

Si riporta di seguito un riassunto estratto da tale allegato.

Si riporta di seguito i modelli 2 D tomografici ricavati dalla sismica a rifrazione in onde P e S:

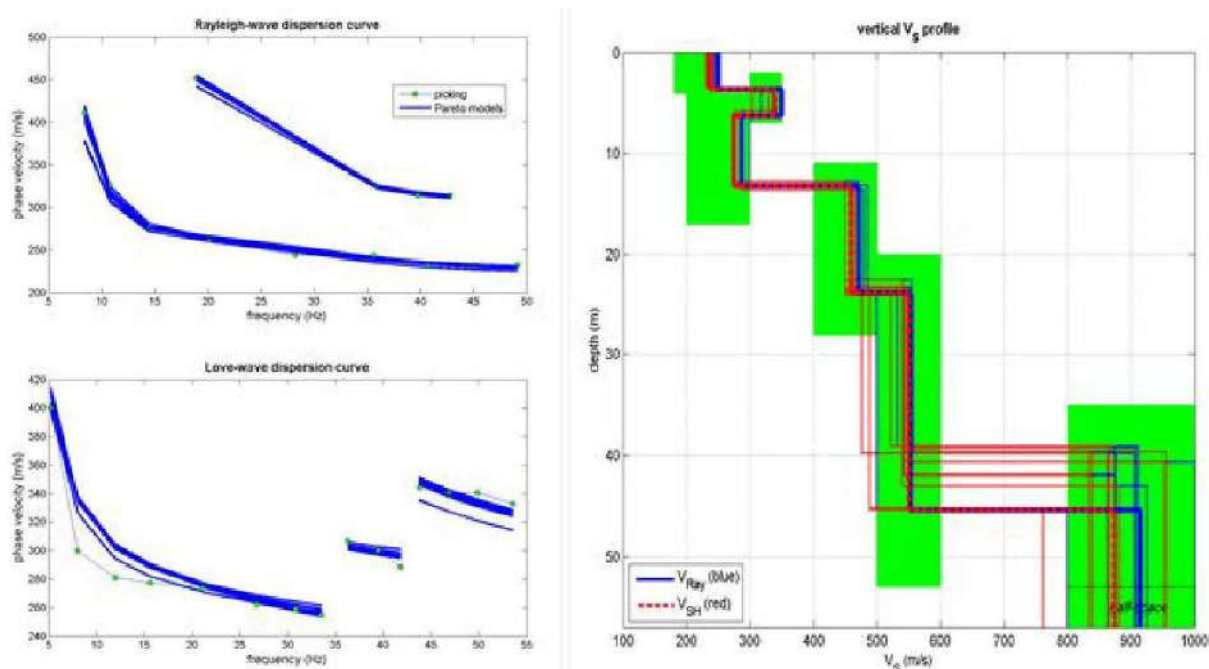


Sulla base dei risultati di sismica a rifrazione in onde P e SH e del modello geologico dell'area è stato prefissato un modello preliminare di sottosuolo, verificandone la validità tramite procedura diretta, calcolando le curve di dispersione numeriche del modo fondamentale e dei primi due modi superiori dell'Onda di Rayleigh (ZVF) e dell'Onda di Love (THF):

Unità	Modello preliminare ZVF			
	S (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	V <sub>p</sub> (m/s)	v (-)
U1	3.5	250	408	0.20
U2	2.5	300	1102	0.46
U3	8.0	300	1530	0.48
U4	10.0	450	1891	0.47
U5	20.0	550	1824	0.45
U6	-	850	2819	0.45



Di seguito si riportano gli esiti del processo di inversione automatica congiunta:

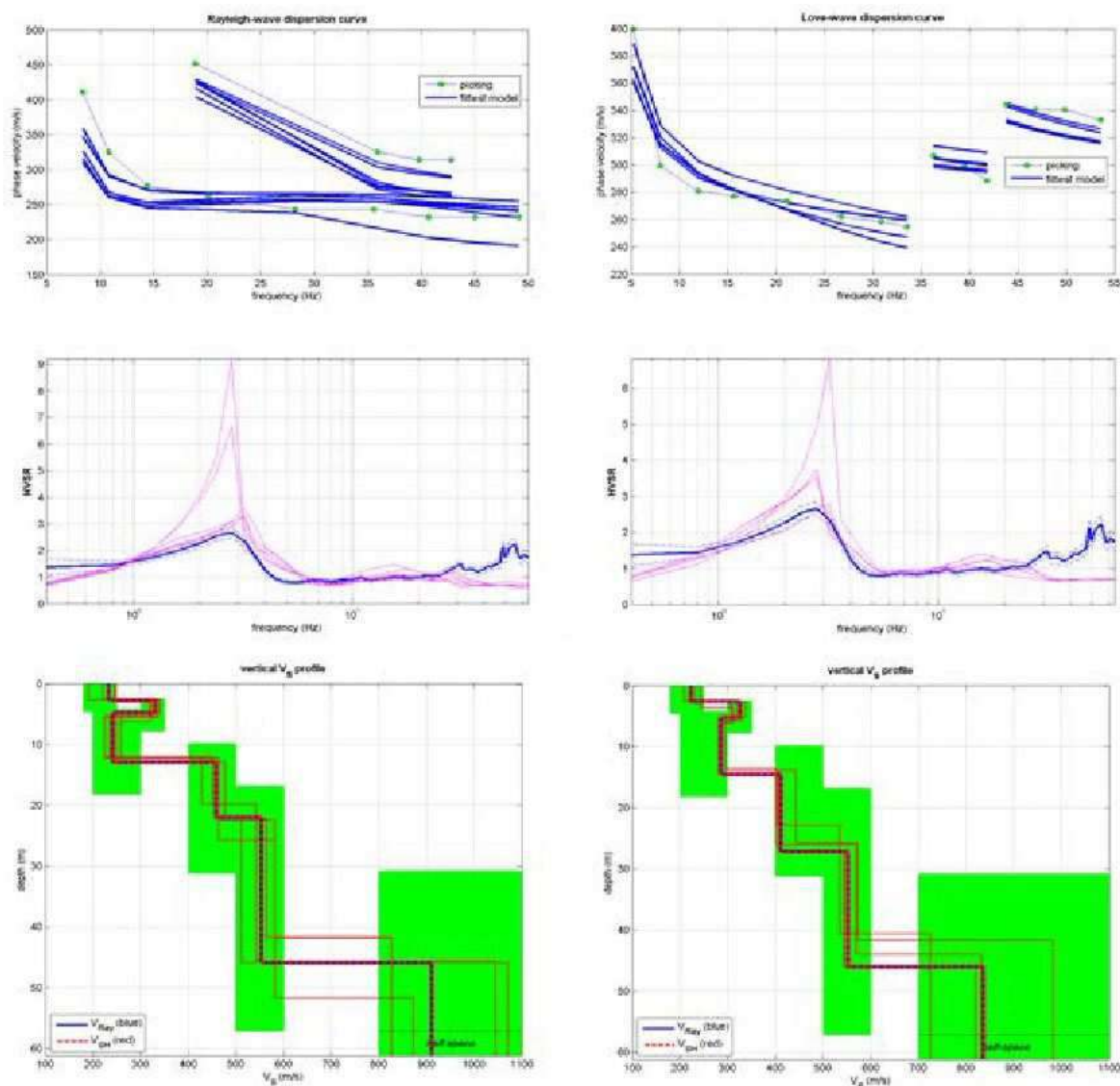


Il modello medio calcolato secondo l'operazione statistica MPPD (Dal Moro et al., 2006) e il modello migliore in termini di discrepanza tra dati sperimentali e soluzioni numeriche mono-dimensionali sono riportate nelle tabelle seguenti, ove S,  $V_{Sv}$  e  $V_{sh}$  indicano rispettivamente il valore di spessore e velocità delle onde S nel piano verticale e orizzontale di ciascun sismo-strato considerato:

Unità	Rigidezza piano verticale			
	Modello medio		Modello migliore	
	S (m)	$V_{Sv}$ (m/s)	S (m)	$V_{Sv}$ (m/s)
U1	3.5	246	3.7	250
U2	2.6	346	2.6	350
U3	7.1	287	7.0	287
U4	10.5	474	10.5	472
U5	18.0	540	21.6	553
U6	-	896	-	915

Rigidezza piano orizzontale			
Modello medio		Modello migliore	
S (m)	$V_{Sh}$ (m/s)	S (m)	$V_{Sh}$ (m/s)
3.5	235	3.7	238
2.6	340	2.6	340
7.1	275	7.0	274
10.5	455	10.5	459
18.0	529	21.6	551
-	863	-	874

Considerando separatamente due processi d'inversione automatici considerando congiuntamente la curva di dispersione dell'Onda di Rayleigh e la curva HVSR, la curva di dispersione dell'onda di Love e la curva HVSR si ottengono i seguenti risultati:



Unità	Modello medio		Modello migliore	
	S (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)	S (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)
U1	2.6	234	2.5	248
U2	2.8	330	2.9	320
U3	7.0	242	6.7	224
U4	9.6	458	7.7	450
U5	23.4	554	25.9	542
U6	-	911	-	827

Modello medio		Modello migliore	
S (m)	V <sub>Sh</sub> (m/s)	S (m)	V <sub>Sh</sub> (m/s)
2.9	223	2.8	222
2.8	325	3.1	308
8.5	286	7.6	296
11.6	413	12.6	401
17.9	553	18.0	570
-	836	-	833

L'elaborazione congiunta con la curva H/V relativa all'indagine HVSr ha permesso di verificare il profilo di rigidezza individuato dalle indagini combinate e di estendere la penetrazione fino ad oltre 30 m di profondità fornendo la possibilità di eseguire un affidabile calcolo del parametro V<sub>S30</sub>.

Il modello che segue media i modelli ottenuti dalle precedenti elaborazioni :



**PROFILO MEDIO  $V_S$  – SITO SCUOLA PRIMARIA COMUNE DI ISEO**

Unità	S (m)	Z (m)	$V_S$ (m/s)	$\nu$ (-)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (MPa)	G (MPa)	K (MPa)	Fonte del dato
U1	3.1	3.1	235	0.20	385	1.58	210	87	118	Rifrazione e MASW
U2	2.7	5.8	335	0.45	1100	1.93	627	217	2046	
U3	7.4	13.2	275	0.49	1800	2.12	477	160	6651	
U4	10.6	23.8	450	0.47	1900	2.14	1275	433	7150	MASW
U5	19.3	43.1	545	0.46	2000	2.16	1875	642	7790	
U6	-	-	875	0.43	2500	2.26	4939	1727	11793	MASW-HVSR

**SIMBOLOGIA**

S = spessore unità sismo-stratigrafica

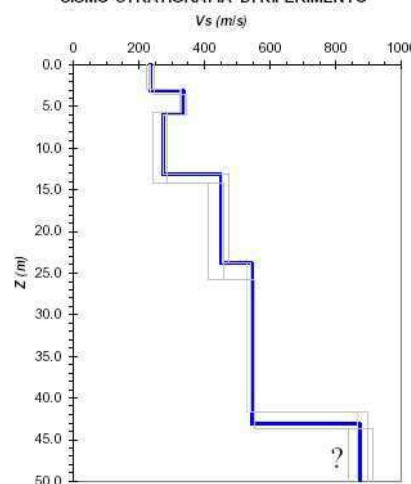
Z = profondità letto unità sismo-stratigrafica

 $V_S$  = velocità delle onde di taglio $\nu$  = coefficiente di Poisson $V_P$  = velocità delle onde longitudinali $\rho$  = densità

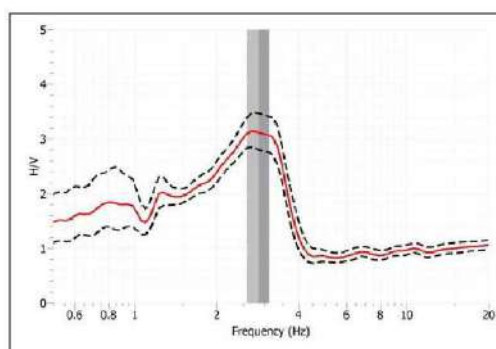
E = modulo di elasticità longitudinale di Young

G = modulo di elasticità tangenziale o di rigidità

K = modulo di compressione o compressibilità

**SISMO-STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO** **$V_{S30}$  (a p.c. Giardini Rimembranze) = 361 m/s** **$V_{S30}$  (al tetto dell'unità U2) = 397 m/s**

Dall'elaborazione della curva H/V la **frequenza caratteristica di risonanza** del sito presenta un picco di risonanza affidabile pari a **2.8 Hz  $\pm$  0.2** tale picco potrebbe essere generato da un contatto litologico profondo nell'ambito del substrato roccioso indicativamente tra 60-80 m:



Picco H/V 2.8 Hz $\pm$ 0.2			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/L_w$	2.85	$>$ 0.167	OK
$n(f_0) > 200$	17442	$>$ 200	OK
$Q_n(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz	$f_0 > 0.5$ Hz	SI	OK
$Q_n(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	$f_0 > 0.5$ Hz	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste $f^*$ in $[f_0/4, f_0/2]$   $A_{HV}(f^*) < A_0/2$			OK
Esiste $f^*$ in $[f_0/4, f_0/2]$   $A_{HV}(f^*) < A_0/2$			OK
$A_0 > 2$	3.12	$>$ 2	OK
$f_{max}(A_{HV}(f)) \pm 0.5(f) = f_0 \pm 5\%$	0.05	$<$ 0.05	OK
$\sigma_f < e(f_0)$	0.271	$<$ 0.142	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.112	$<$ 1.580	OK

Criteri Sesame, 2004 per la valutazione dell'affidabilità statistica della curva HV e della chiarezza dei picchi di risonanza individuati

Sulla base dei risultati dell'indagine è possibile definire l'azione sismica progettuale tenendo in conto i fenomeni di amplificazione stratigrafica attraverso la procedura semplificata proposta dalle NTC ai sensi del DM 17 gennaio 2018; in tal senso in riferimento al piano campagna e a condizioni di free field si definisce il sito caratterizzato da  **$V_{s30}$  pari a 361 m/s** appartenente alla **categoria di sottosuolo B** "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti (in questo caso con spessori superiori a 30 m) , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente (in questo caso equivale a  $V_{s30}$ ) compresi tra 360 m/s e 800 m/s " .

Considerando che il **piano di posa delle strutture di nuova costruzione** (Palestra- Mensa scolastica e nuove aule che sorgeranno al posto dell'attuale Ex-Liceo) da quanto definito dal progettista cadrà indicativamente intorno **ai 5.0 m dal p.c.** attuale si può calcolare la categoria di sottosuolo a partire da -5.0 m dal p.c. che fornisce una  **$V_{s30}$  di 409 m/s**.

#### **7.4. Valutazione dei fenomeni di amplificazione stratigrafica**

Ai sensi delle norme tecniche per le costruzioni (punto 7.11.3) per la valutazione dei fenomeni di amplificazione sismica del sito è possibile avvalersi della procedura semplificata proposta dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, mediante la definizione della categoria di sottosuolo e della categoria topografica.

In seguito all'applicazione del secondo livello di analisi nello studio geologico per il PGT, come previsto dalla D.G.R. n. 8/1566 del 22/12/2005 e successiva D.G.R. n. 8/7374 del 28/05/2008, è stata rilevata la presenza sul territorio di aree soggette a fenomeni di amplificazione litologica superiori a quanto previsto dalla normativa tecnica nazionale (D.M. 14 gennaio 2008).

Per quanto riguarda le aree con amplificazione litologica che ricadono nello scenario in esame "Z4b – Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre" in fase di progettazione *per tipologie edilizie con periodo proprio compreso tra 0,1 - 0,5 s*, qualora l'indagine geologica-geotecnica (ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008) evidenzia la presenza di terreni riferibili alla *categoria di sottosuolo C*, si dovrà applicare lo spettro di norma riferito alla *categoria di sottosuolo D* o, in alternativa, realizzare un approfondimento applicando l'analisi di 3° livello prevista dalla D.G.R. n.8/7374 del 28 maggio 2008 (all. 5) sulla base di dati sito-specifici.

Per gli **scenari di amplificazione litologica (Z4)**, qualora in fase di progettazione le indagini geologico-geotecniche (ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008) *evidenzino dei risultati in contrasto con quanto emerso dal presente studio*, sulla base di **dati geofisici sito-specifici** sarà possibile applicare nuovamente la procedura di secondo livello prevista dall'allegato 5 della D.G.R. n.8/7374 del 28 maggio 2008 per la valutazione della reale amplificazione sismica locale.



Nel caso specifico mediante l'indagine geofisica si è rinvenuta una **categoria di sottosuolo B** e si è applicata un'analisi di secondo livello sito specifica.

#### 7.5. *Analisi sismica di 2° livello sito specifica*

In base alla normativa regionale è stata applicata la metodologia riportata nell'allegato 5 “Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei Piani di Governo del Territorio” ai sensi del DGR 22/12/2005 n. VIII/1566 “Criteri attuativi per lo studio della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio in attuazione dell'art. 57 della L.R. 11 marzo 2005 n. 12” modificati con DGR 28 maggio 2008 n. VIII/7374 ed aggiornati con DGR 30 novembre 2011 n. IX/2616.

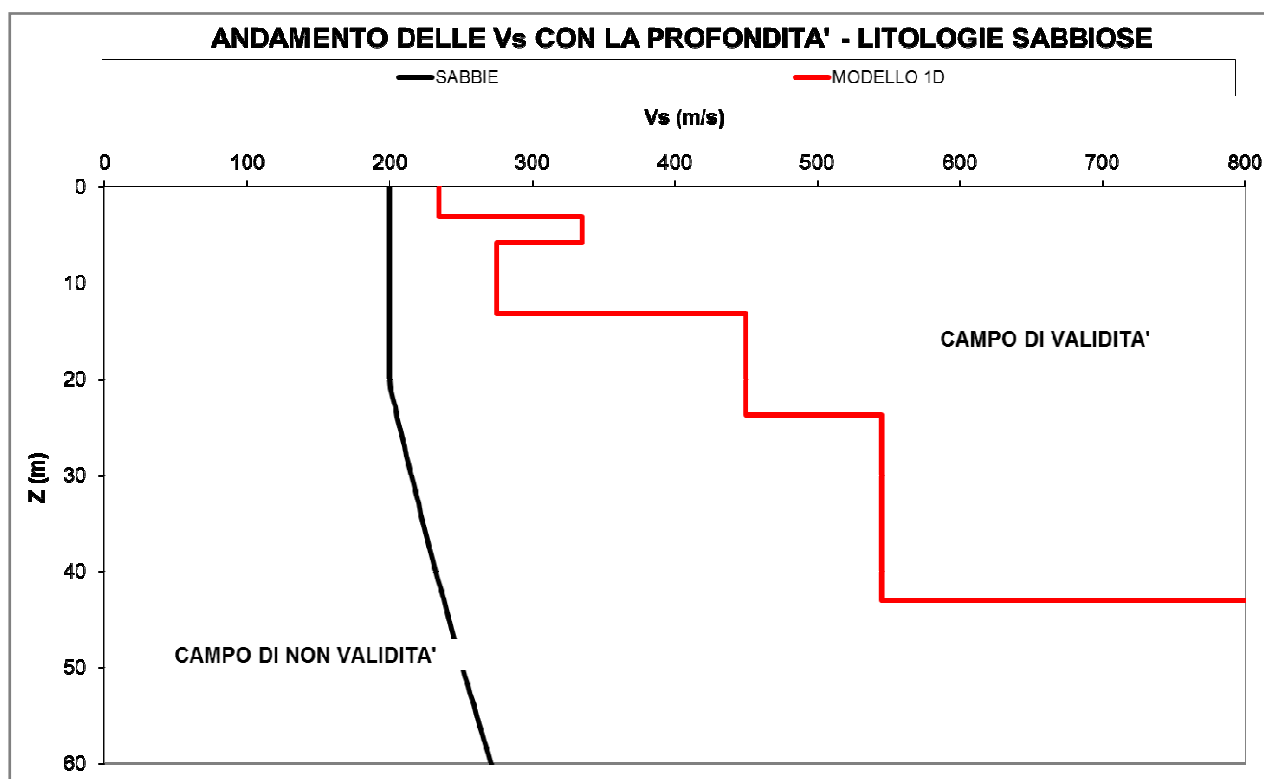
L'analisi sismica di 2° livello per la valutazione degli effetti di amplificazione sismica di tipo litologico da eseguire in ambito pianificatorio richiede la conoscenza della litologia prevalente, della stratigrafia del sito, dell'andamento del valore delle Vs con la profondità fino a valori di 800 m/s e del modello geofisico dell'area.

I dati richiesti dall'analisi sismica di 2° livello possono essere acquisiti con grado di attendibilità diversa come riportato nella Tabella 2 dell'allegato 5, di seguito esposta, ove è evidenziato in grassetto, per ciascuna tipologia di dato, il relativo grado di attendibilità:

<i>Dati</i>	<i>Attendibilità</i>	<i>Tipologia</i>
Litologici	<b>Bassa</b>	<b>Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe</b>
	Alta	Da prove di laboratorio su campioni e da prove in sito
Stratigrafici (spessori)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	<b>Media</b>	<b>Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche)</b>
	Alta	Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo)
Geofisici (Vs)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette e relazioni empiriche
	<b>Alta</b>	<b>Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale)</b>

Sulla base di quanto riportato in tabella è possibile assegnare ai risultati ottenuti dall'analisi sismica di 2° livello **un grado di affidabilità Medio-Alta**.

Di seguito si riporta l'andamento delle Vs con la profondità del modello 1D sperimentale ottenuto dall'indagine MASW, confrontato con il limite di validità delle Vs per la **litologia sabbiosa** (banca dati regionale), scheda ritenuta valida per quanto riguarda l'andamento della Vs con la profondità.



Il calcolo del periodo proprio del sito e del parametro  $V_{s30}$  è stato eseguito *a piano campagna*.

Il parametro  $V_{s30}$  risulta essere **361 m/s**. Il substrato rigido (bedrock sismico), viene rinvenuto nell'indagine geofisica ad una profondità di circa 43 m.

Di seguito si riportano i valori del Fattore di Amplificazione calcolato tra 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s legato agli effetti litologici e responsabili della modifica dell'evento atteso nell'area per un tempo di ritorno di 475 anni; sono riportati anche i valori del periodo proprio  $T$  (s) e della frequenza fondamentale  $f$  (Hz) del sottosuolo e lo spessore e la velocità  $V_s$  dello strato superficiale equivalente, necessari per la scelta della curva di correlazione  $T/Fa$  (**Curva 2 verde**):

MODELLO $V_s$	$T$ (s)	$f$ (Hz)	Strato sup. equivalente		$Fa$ (0.1-0.5 s)	$Fa$ (0.5-1.5 s)	$F_s$ comunale (0.1-0.5 s)	$F_s$ comunale (0.5-1.5 s)
			Spessore (m)	$V_s$ (m/s)			Categoria B	Categoria B
A piano campagna 0.0 m	0.39	2.6	5.8	282	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.7</b>

Il valori di  $Fa$  pari a **1.6** calcolato tra 0.1-0.5 s con la procedura di 2° livello risulta **uguale**, considerando il  $\pm 1$  di accettabilità del metodo, al valore di soglia comunale valido ai sensi delle Norme per le Costruzioni (NTC/18) previsto per la categoria di sottosuolo B (ovvero **1.5**).

Lo spettro previsto per la **categoria di sottosuolo B**, a cui viene attribuito il sito, sarebbe da ritenersi **appena sufficiente**, in termini energetici, a tenere in conto i fenomeni di amplificazione



locale attesi **per intervalli di periodo** delle tipologie edilizie compresi **tra 0.1 e 0.5 s** (strutture relativamente basse) si prescrive pertanto di scalare alla **categoria di sottosuolo C** (essendo anche le  $V_{s30}$  prossime al limite di soglia), mentre risulta **sufficiente per intervalli di periodo** delle tipologia edilizie compresi tra **0.5 e 1.5 s** (strutture relativamente alte).

Considerando **il piano di posa della fondazione di massima posto a circa 5 m di profondità dal p.c.** il calcolo del periodo proprio del sito e del parametro  $V_{s30}$  è stato eseguito a partire da 5 m di profondità dal piano campagna (ossia a partire dall'unità geofisica U2). Il parametro  $V_{s30}$  risulta essere **409 m/s**.

Di seguito si riportano i valori del Fattore di Amplificazione calcolato tra 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s legato agli effetti litologici e responsabili della modifica dell'evento atteso nell'area per un tempo di ritorno di 475 anni; sono riportati anche i valori del periodo proprio  $T$  (s) e della frequenza fondamentale del sottosuolo  $f$  (Hz) e lo spessore e la velocità  $V_s$  dello strato superficiale equivalente, necessari per la scelta della curva di correlazione  $T/F_a$  (**Curva 2 verde**):

MODELLO $V_s$	$T$ (s)	$f$ (Hz)	Strato sup. equivalente		$F_a$ (0.1-0.5 s)	$F_a$ (0.5-1.5 s)	$F_s$ comunale (0.1-0.5 s)	$F_s$ comunale (0.5-1.5 s)
			Spessore (m)	$V_s$ (m/s)			Categoria B	Categoria B
Da 5 m di profondità da p.c.	0.33	3.0	8.2	281	<b>1.7</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.7</b>

Il valore di  **$F_a$**  pari a **1.7** calcolato tra 0.1-0.5 s con la procedura di 2° livello risulta superiore al valore di soglia comunale valido ai sensi delle Norme per le Costruzioni (NTC/18) previsto per la categoria di sottosuolo B (ovvero **1.5**); mentre il valori di  **$F_a$**  pari a **1.5** calcolato tra 0.5-1.5 s risulta inferiore al valore di soglia comunale (ovvero **1.7**).

Considerando il piano di posa di massima di progetto lo spettro previsto per la **categoria di sottosuolo B**, a cui appartiene il sito, è da ritenersi **insufficiente**, in termini energetici, a tenere in conto i fenomeni di amplificazione locale attesi per **intervalli di periodo delle tipologie edilizie tra 0.1 e 0.5 s** (strutture relativamente basse) e **sufficiente per intervalli di periodo delle tipologia edilizie tra 0.5 e 1.5 s** (strutture relativamente alte).

**Nel caso specifico pertanto la categoria di sottosuolo da utilizzarsi nel caso di tipologie edilizie con periodi compresi tra 0.1-0.5 s è la categoria di sottosuolo C il cui fattore di soglia comunale risulta essere pari a 1.9.**

La **categoria di sottosuolo C** è definita come “Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti (in questo caso con spessori superiori a 30 m) , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente (in questo caso equivale a  $V_{s30}$ ) compresi tra 360 m/s e 800 m/s ”.

### 7.6. *Verifica alla liquefazione*

La verifica a liquefazione è stata effettuata applicando la metodologia semplificata (in questa fase con modalità speditiva), che prevede il calcolo del fattore di sicurezza alla liquefazione come rapporto tra resistenza disponibile e sollecitazione indotta dall’azione sismica. Entrambi i parametri tensionali sono normalizzati rispetto alla tensione verticale efficace agente a diversa profondità in modo da definire un rapporto di resistenza ciclica CRR e un rapporto di tensione ciclica CSR.

Il termine CSR è stato calcolato tramite l’espressione proposta da Seed e Idriss, 1971, considerando come accelerazione di picco in superficie quella definita dal terremoto di progetto atteso con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_g S = 0,231$ ); per il calcolo del CSR è stato preferito scegliere, in via cautelativa, un coefficiente riduttivo  $r_d$  dell’azione sismica derivato da modello empirico che tiene in considerazione la deformabilità del sottosuolo mediante due possibili andamenti, uno proposto da Seed e Idriss 1971 e l’altro proposto Idriss e Boulanger, 2004 validi fino a 20 m di profondità e si è utilizzato infine quest’ultimo.

Per ricondurre il carico sismico calcolato a quello equivalente di un terremoto di magnitudo 7.5, per il quale sono state elaborate le procedure semplificate utilizzate, è stata impiegata sia la relazione proposta da Seed e Idriss 1982 sia la relazione NCEER (1997), utilizzando per il risultato finale quest’ultima.

Siccome tutte le relazioni per il calcolo del fattore di scala per la magnitudo richiedono una valutazione della magnitudo momento attesa al sito  $M_w$  si è scelto di utilizzare cautelativamente un il

valore di 6.14 assegnato alla zona sismogenetica 907 (GdL 2004) nella quale rientra l’area in oggetto.

Il termine CRR è stato calcolato dai risultati delle prove sismiche utilizzando il profilo delle  $V_s$  delle unità geofisiche riscontrate attraverso le relazioni e la procedura proposta negli abachi di Andus & Stokoe , 1997 valide per sabbie e ghiaie con matrice limoso argillosa a diverse percentuali (si è utilizzata la percentuale più cautelativa in quanto non la si conosce).

La sicurezza nei confronti della liquefazione è calcolata, al variare della profondità, come rapporto tra il termine CRR e il termine CSR opportunamente scalato alla magnitudo 7.5: dall’andamento del



valore del fattore di sicurezza  $F_L$  con la profondità è possibile quantificare il numero e lo spessore degli orizzonti liquefacibili (che presentano un fattore  $F_L$  inferiore al limite di rottura, cioè 1.00) .

Essendo il fenomeno della liquefazione particolarmente complesso ed influenzato da numerosi fattori, quando la verifica a liquefazione non è soddisfatta per alcuni orizzonti del sottosuolo, prima di progettare interventi di miglioramento dei terreni o di riduzione della vulnerabilità della struttura di progetto, è opportuno eseguire una stima, anche speditiva, dei suoi effetti.

Un metodo speditivo che fornisce una valutazione integrale degli effetti della liquefazione è il calcolo del potenziale di liquefazione  $I_L$  come proposto, entro i primi 20 m di profondità, da Iwasaki et al., 1982; nel caso in oggetto il valore del potenziale di liquefazione  $I_L$  è calcolato entro i primi 20 m sulla base dei dati reperiti dalle Vs delle diverse unità.

Gli orizzonti con le diverse unità geofisiche evidenziano fattori di sicurezza alla liquefazione  $F_L$  inferiori o prossimi a 1 compresi tra 0.8 e 1.0 (che possono dar luogo a fenomeni di liquefazione) in prossimità della Unità geofisica U3 caratterizzata da Vs medie di 275 m/s posta indicativamente tra i 6 e i 13 m di profondità : la probabilità che si verifichi rottura del sottosuolo, a causa di fenomeni di liquefazione, presenta un indice del potenziale di liquefazione  $I_L$  lungo la verticale compreso tra 0.5-2 che definisce un rischio basso.

## 8. Prescrizioni in fase di progetto definitivo, approfondimenti d'indagine, consigli al progettista

Per la definizione della tipologia fondazionale e del piano di posa in fase di progetto definitivo andrà operato un approfondimento d'indagine mediante l'esecuzione di prove penetrometriche dinamiche distribuite sull'intera area d'ingombro degli edifici di progetto (a completamento delle preliminari eseguite) e di un sondaggio esplorativo con l'esecuzione di prove SPT in foro con raccolta di campioni da sottoporre ad analisi (per la taratura diretta della litologia sia per una interpretazione più affinata delle DPSH che per una migliore definizione della scelta dei parametri per la verifica e/o l'esclusione alla liquefazione degli strati coesivi o granulometricamente non liquefacibili : indice plastico IP dei limiti di Atterberg  $>12$  e/o distribuzione granulometrica all'esterno del fuso liquefacibile,).

Grazie a tali indagini si potrà presentare il **modello geologico e geotecnico** lungo delle **sezioni longitudinali e trasversali ai nuovi corpi di fabbrica mediante correlazione** delle sopracitate prove, che permetteranno il calcolo della capacità portante, dei cedimenti differenziali al di sotto delle fondazioni di progetto e permettano di verificare con maggiore precisione la verifica alla liquefazione dei terreni immersi in falda che si trova in prossimità del piano di posa delle fondazioni.

Essendo previsti dei piani interrati con piano di calpestio a circa -4.5 m (Palestra e aule nuove) e piani di posa delle fondazioni intorno ai 5.0-5.5 m di profondità indicativamente dall'attuale p.c. (piazzale antistante la scuola) le prove penetrometriche DPSH andranno approfondite fino a 15 m o fino a rifiuto (tali prove vanno eseguite prevalentemente con rivestimento) e il sondaggio fino a 20-25 m di profondità.

Nel foro di sondaggio andranno eseguite prove SPT in foro lungo la verticale sui diversi orizzonti rinvenuti (almeno 4-5) , andranno raccolti dei campioni disturbati/indisturbati sui quali eseguire prove di laboratorio per la classificazione geotecnica dei terreni (granulometrie/sedimentometrie, limiti di Atterberg, umidità naturale, peso di volume, caratteristiche fisiche), eseguite delle prove di permeabilità Lefranc a carico costante/variabile per valutare la conducibilità idraulica degli orizzonti in falda.



Tali indagini andranno integrate con qualche scavo esplorativo che possa visualizzare la stratigrafia superficiale spazialmente (variazioni laterali) e non solo puntualmente e definirne la litologia mediante la raccolta di campioni rimaneggiati sui quali eseguire prove di identificazione e classificazione geotecnica oltre ad assaggi in fondazione per definirne l'attuale piano di posa.

Va verificata anche la presenza di terreni di riporto dal punto di vista ambientale (DPR 120/2017), da campionarsi e destinarsi ad analisi chimiche di laboratorio per la gestione delle terre e rocce da scavo legata allo sbancamento generale.

La verifica alla liquefazione potrà in tal modo essere affinata anche in base alle future scelte progettuali.

Andrà predisposto un modello geologico e geotecnico ai sensi delle NTC 2018 e andranno forniti i parametri caratteristici delle varie unità geotecniche non drenati e drenati ossia a breve e a lungo termine.

Poiché le fondazioni dell'area ex-Liceo da demolire e ricostruire sono ubicate a circa -5.0-5.5 m di profondità e cadono sull'unità geotecnica U2b immersa in falda e con caratteristiche iniziali mediocri (nei primi 1-2m di profondità da mediocri a scadenti) andrà valutato sulla base degli esiti delle nuove indagini ed in base ai carichi di progetto se utilizzare fondazioni dirette di tipo continuo o a platea per contrastare l'eventuale sotto spinta idraulica e poter impermeabilizzare i vani interrati profondi. Andrà ben valutato il livello da tenere per il cortile interno ribassato di progetto (attualmente con uso del suolo a verde ubicato a -2.78 m da 0.0) a seconda se si voglia mantenerlo filtrante o lo si voglia impermeabilizzare, in quanto prossimo al livello di falda.

Trovandosi il nuovo fabbricato di progetto in aderenza o a breve distanza da edifici esistenti andrà posto in opera un presostegno prima di procedere allo scavo generale (tipo berlinese) a protezione degli edifici adiacenti o contigui circostanti e a protezione dello sbancamento generale per permettere la demolizione dei vani interrati esistenti e la posa in opera delle fondazioni degli interventi di progetto. Andranno ben definite in fase di progetto definitivo le fasi operative per la posa in opera della palificazione.

Essendo inoltre prossimi al livello statico della falda si consiglia di strumentare il foro di sondaggio con un piezometro per tenere monitorata l'oscillazione del livello dell'acqua, di cui non si hanno notizie approfondite sul livello minimo e massimo, almeno fino al progetto esecutivo.

Andrà scelta una tipologia fondazionale che possa permettere l'impermeabilizzazione dei vani interrati più profondi.

Si ricorda che l'area in oggetto rientra nelle **aree potenzialmente allagabili a bassa pericolosità** definita tra quelle appartenenti al conoide del Torrente Cortelo che in base allo studio idraulico e geomorfologico eseguito nel 2.000 sono state valutate a “bassa pericolosità”.

***Caratteri distintivi PGT :***

Sono state inserite in questa sottoclasse situazioni piuttosto differenti tra loro. Comunque, considerate le caratteristiche dei corsi d'acqua in grado di esondare, i danni che ci si può attendere sono soprattutto dovuti alle acque (e al materiale solido da esse trasportato) che, fuoriuscite dall'alveo, si propagano con altezze idriche ridotte (20-30 cm) lungo vie preferenziali, spesso rappresentate dalla rete stradale, invadendo le superfici ed i manufatti che incontrano e colmando le depressioni presenti (autorimesse interrante, scantinati, aree naturalmente depresse, ecc.).

***Prescrizioni PGT:***

1. Gli eventuali interventi di viabilità, nuova edificazione, ricostruzione, ampliamento e rimodellamento del terreno dovranno essere preceduti da indagini geologiche e geotecniche che valutino la compatibilità dell'intervento stesso con le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche del sito.
2. Per i nuovi edifici si consiglia di prevedere alcuni accorgimenti costruttivi localizzati in corrispondenza delle potenziali vie d'accesso delle acque all'edificio (finestre a raso, bocche di lupo, porte, scivoli dei garage, etc.), al fine di evitare che eventuali acque di scorrimento superficiale possano raggiungere gli edifici stessi.
3. L'impermeabilizzazione delle superfici è sconsigliata.

Dott. Geol. Daniela Chiarini



**ALLEGATI**

1. Stratigrafia pozzi (Banca dati del sottosuolo-Regione Lombardia)
2. Elaborazione prove penetrometriche dinamiche DPSH
3. Schema modello geologico geotecnico preliminare
4. Report indagini sismiche





### Indagini Dirette

COMUNE	ISEO
IDENTIFICATIVO	D5A317326463
TIPOLOGIA	su pozzo per acqua
QUOTA (m)	189
SPESSORE SERIE (m)	23,00
AFFIDABILITA' POSIZIONAMENTO	affidabile
STRATIGRAFIA	<a href="#">Altre informazioni</a>
LEGENDA STRATIGRAFIA	<a href="#">Altre informazioni</a>

[Zoom a](#)





Regione Lombardia

## BANCA DATI GEOLOGICA DI SOTTOSUOLO

### INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO IDE: D5A317326463

QUOTA (m s.l.m.): 189 PROFONDITA'(m): 23 NUMERO STRATI: 7

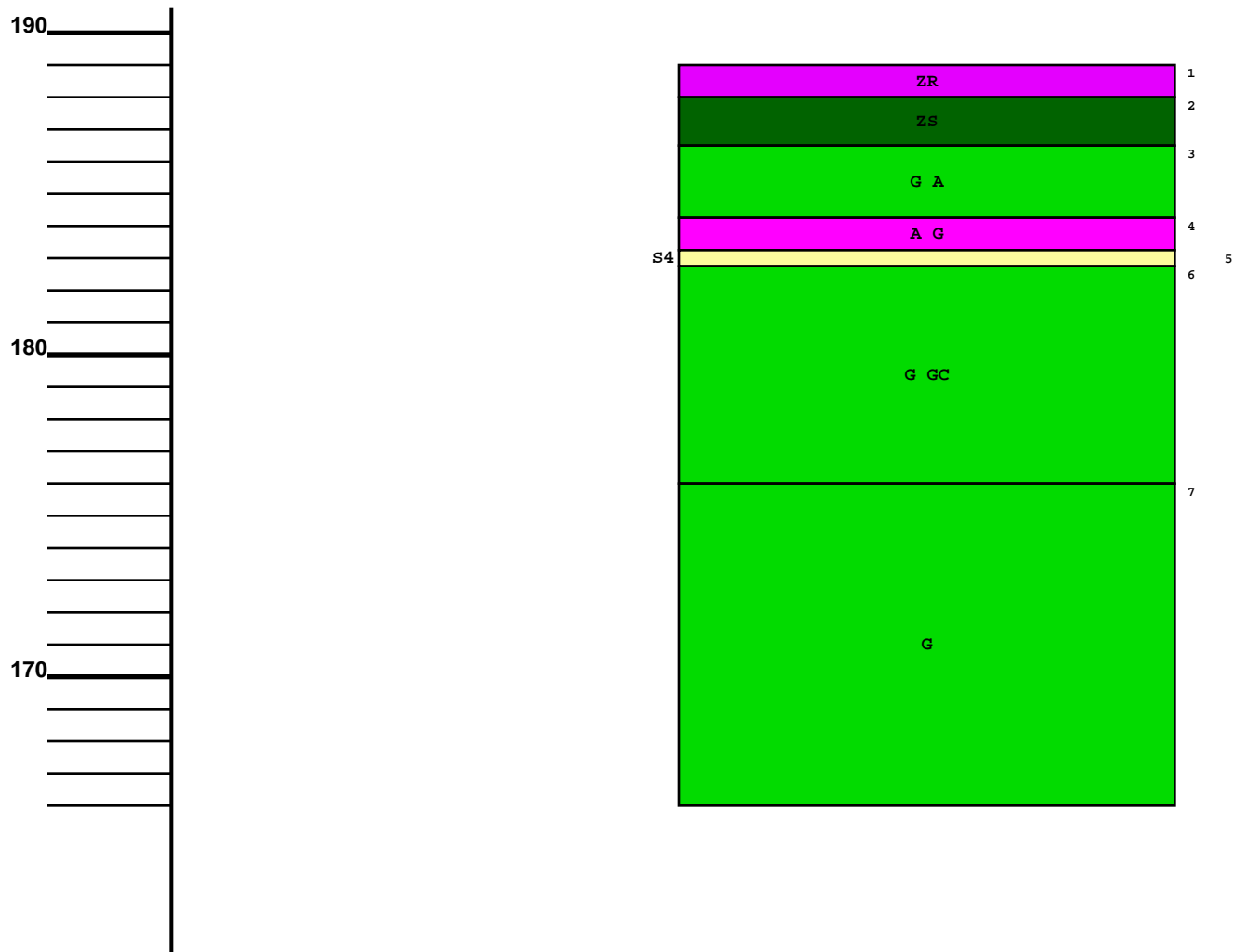
Strato	Da	A	Spessore	descrizione	sigla
1	0	1	1	Terreno di riporto	ZR
2	1	2,5	1,5	Coltura	ZS
3	2,5	4,75	2,25	Ghiaia con argilla	G A
4	4,75	5,75	1	Argilla con ghiaia	A G
5	5,75	6,25	0,5	Sabbia fine	S4
6	6,25	13	6,75	Ghiaia acquifera con ciottoli	G GC
7	13	23	10	Ghiaia acquifera	G



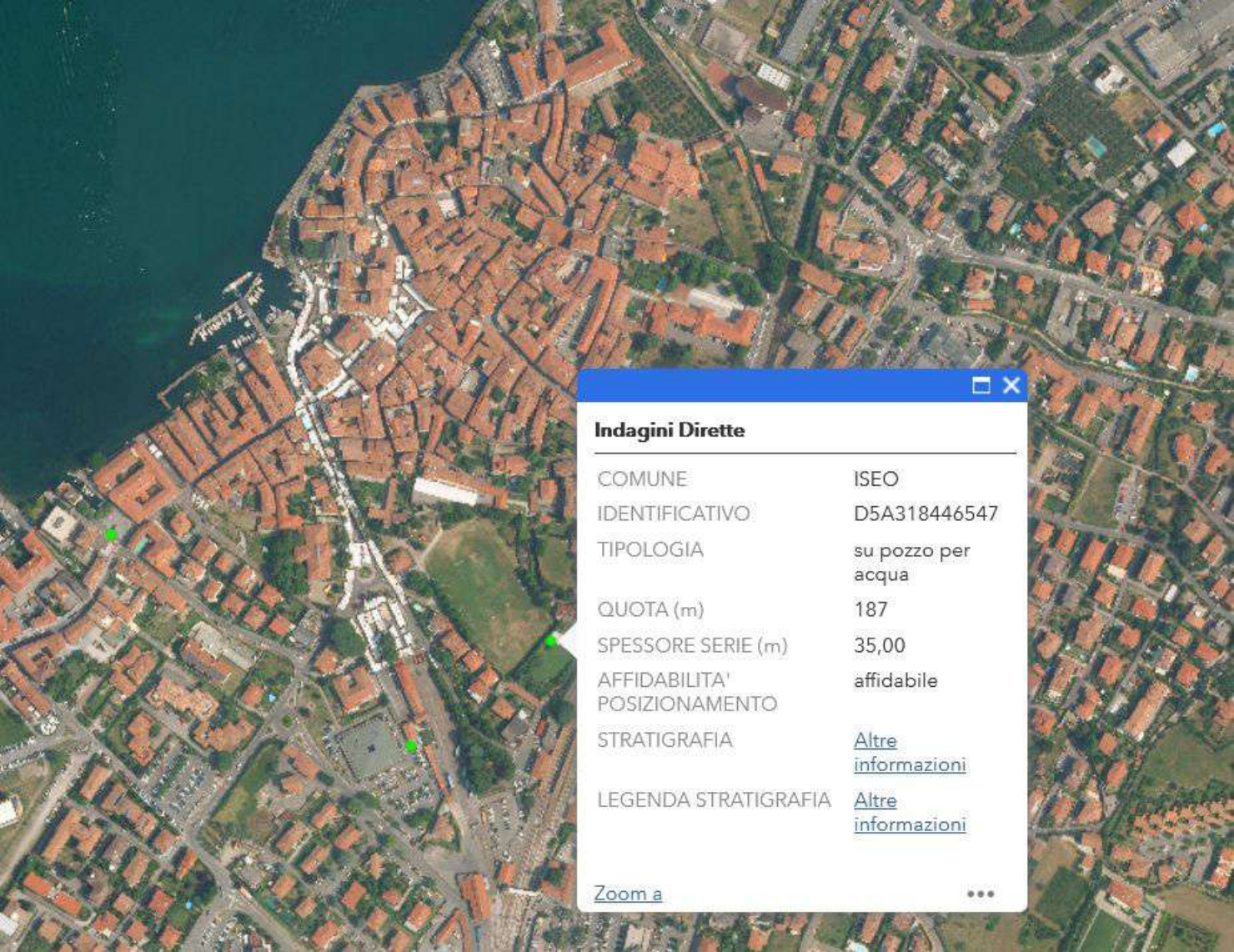
## INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO IDE: D5A317326463

QUOTA (m s.l.m.): 189 PROFONDITA'(m): 23 NUMERO STRATI: 7







☐ ✕

### Indagini Dirette

COMUNE	ISEO
IDENTIFICATIVO	D5A318446547
TIPOLOGIA	su pozzo per acqua
QUOTA (m)	187
SPESSORE SERIE (m)	35,00
AFFIDABILITA' POSIZIONAMENTO	affidabile
STRATIGRAFIA	<a href="#">Altre informazioni</a>
LEGENDA STRATIGRAFIA	<a href="#">Altre informazioni</a>

[Zoom a](#) ⋮



Regione Lombardia

## BANCA DATI GEOLOGICA DI SOTTOSUOLO

### INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO IDE: D5A318446547

QUOTA (m s.l.m.): 186,5 PROFONDITA'(m): 35 NUMERO STRATI: 5

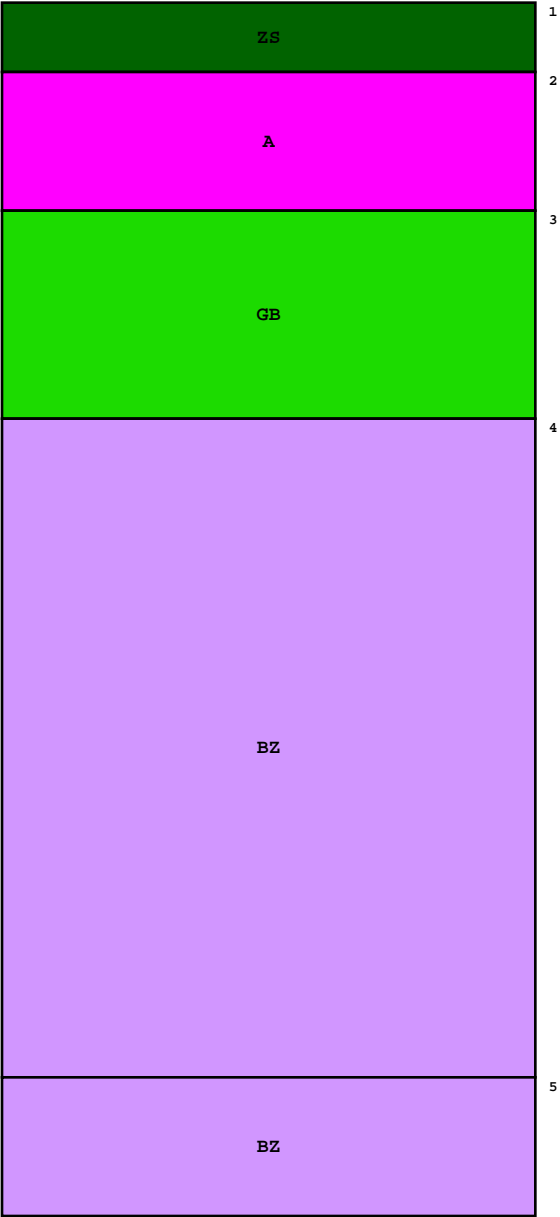
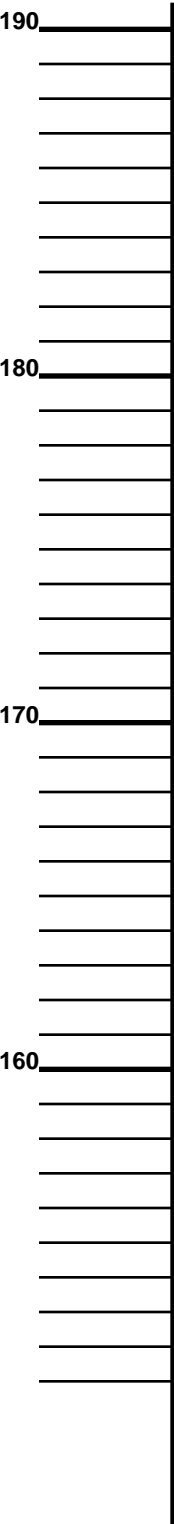
Strato	Da	A	Spessore	descrizione	sigla
1	0	2	2	Terreno vegetale	ZS
2	2	6	4	Argilla	A
3	6	12	6	Trovanti	GB
4	12	31	19	Roccia	BZ
5	31	35	4	Roccia friabile con piccole fessure	BZ



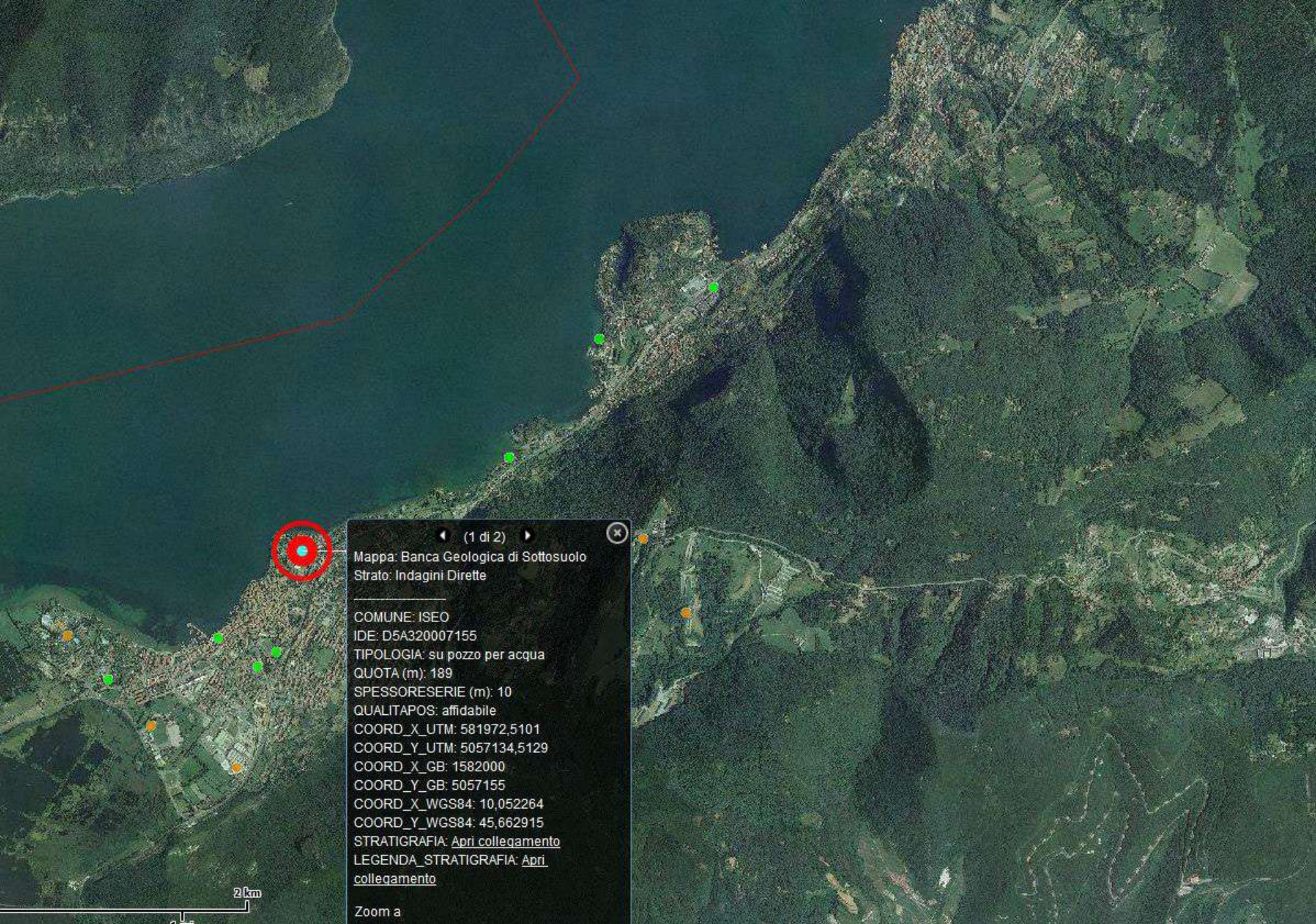
INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO    IDE: D5A318446547

QUOTA (m s.l.m.): 186,5    PROFONDITA'(m): 35    NUMERO STRATI: 5







◀ (1 di 2) ▶



Mappa: Banca Geologica di Sottosuolo  
Strato: Indagini Dirette

COMUNE: ISEO

IDE: D5A320007155

TIPOLOGIA: su pozzo per acqua

QUOTA (m): 189

SPESSORESERIE (m): 10

QUALITAPOS: affidabile

COORD\_X\_UTM: 581972,5101

COORD\_Y\_UTM: 5057134,5129

COORD\_X\_GB: 1582000

COORD\_Y\_GB: 5057155

COORD\_X\_WGS84: 10,052264

COORD\_Y\_WGS84: 45,662915

STRATIGRAFIA: [Apri collegamento](#)

LEGENDA\_STRATIGRAFIA: [Apri collegamento](#)

Zoom a

2 km





Regione Lombardia

## BANCA DATI GEOLOGICA DI SOTTOSUOLO

### INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO IDE: D5A320007155

QUOTA (m s.l.m.): 189 PROFONDITA'(m): 10 NUMERO STRATI: 5

Strato	Da	A	Spessore	descrizione	sigla
1	0	1	1	Materiale di riporto	ZR
2	1	2	1	Ghiaione	G1
3	2	3	1	Argilla	A
4	3	4	1	Ghiaione	G1
5	4	10	6	Ghiaia	G



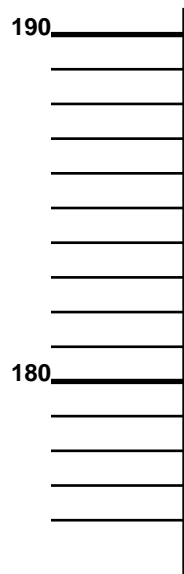
Regione Lombardia

## BANCA DATI GEOLOGICA DI SOTTOSUOLO

### INFORMAZIONI INDAGINE

COMUNE: ISEO IDE: D5A320007155

QUOTA (m s.l.m.): 189 PROFONDITA'(m): 10 NUMERO STRATI: 5





PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente: Progetto B20 srl  
Commessa: Interventi di messa in sicurezza  
Località: Iseo - Scuola primaria

Prova: DP1  
Data: 15/10/2019  
Prof. Falda: 5,52 m

Z	N <sub>DP</sub>	N <sub>riv</sub>	N <sub>spt</sub>	N <sub>spt</sub> *	γ	σ <sub>v</sub> '	terreni granulari (1-8)						terreni coesivi (9-13)						
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
							Dr*	Dr	φ'g	φ's	φ's	φ's	E	E	Cu	Cu	Cu	Mo	Mo
m	c/p	c/p	c/p	c/p	kN/mc	kPa	da N*	da N	da Dr	da Dr	da N	da N	da N*	da N	da N	da N	da N	da N	da N
0,0																			
0,3	11	1	14	68	19,0	5,7	100	79	42	39	31	29	29	43	50	92	172	6	8
0,6	16	2	20	67	19,0	11,4	100	90	44	41	33	32	34	42	73	134	250	9	12
0,9	12	5	15	40	19,0	17,1	82	75	42	38	32	30	30	28	55	101	188	7	9
1,2	16	5	20	46	19,0	22,8	87	83	43	40	33	32	53	31	73	134	250	9	12
1,5	13	5	16	33	19,0	28,5	74	72	42	38	32	31	44	24	-	-	-	-	-
1,8	15	6	19	34	19,0	34,2	75	75	42	38	33	32	45	25	-	-	-	-	-
2,1	31	11	39	65	19,0	39,9	100	100	45	42	39	39	68	41	-	-	-	-	-
2,4	17	8	21	33	19,0	45,6	74	75	42	38	33	33	44	25	-	-	-	-	-
2,7	11	8	14	20	19,0	51,3	58	58	40	36	31	29	34	18	-	-	-	-	-
3,0	5	9	8	11	19,0	57,0	44	44	39	34	30	26	25	12	31	56	104	4	5
3,3	6	8	10	13	19,0	62,7	47	47	39	35	30	27	26	13	37	67	125	5	6
3,6	5	9	8	10	19,0	68,4	41	42	39	34	30	26	25	12	31	56	104	4	5
3,9	4	11	7	8	19,0	74,1	36	30	38	32	29	25	24	11	24	45	83	3	4
4,2	6	13	10	11	19,0	79,8	43	37	38	33	30	27	26	13	-	-	-	-	-
4,5	7	11	12	13	19,0	85,5	46	40	38	34	31	28	28	13	-	-	-	-	-
4,8	6	12	10	11	19,0	91,2	42	37	38	33	30	27	26	13	-	-	-	-	-
5,1	3	12	5	5	19,0	96,9	29	26	37	32	29	24	10	10	18	34	63	2	3
5,4	3	13	5	5	19,0	102,6	29	26	37	32	29	24	10	10	18	34	63	2	3
5,7	3	13	5	5	19,0	105,3	28	26	37	32	29	24	10	10	18	34	63	2	3
6,0	12	16	15	14	19,0	108,0	49	44	39	34	32	30	30	15	-	-	-	-	-
6,3	11	10	14	13	19,0	110,7	47	43	39	34	31	29	29	15	-	-	-	-	-
6,6	3	12	4	3	19,0	113,4	24	22	37	31	28	23	9	9	14	25	47	2	2
6,9	14	14	18	16	19,0	116,1	52	48	39	35	32	31	32	17	-	-	-	-	-
7,2	16	13	20	18	19,0	118,8	55	51	40	35	33	32	34	18	-	-	-	-	-
7,5	18		23	20	19,0	121,5	58	54	40	36	34	33	36	19	-	-	-	-	-
7,8	17		21	19	19,0	124,2	56	52	40	35	33	33	35	18	-	-	-	-	-
8,1	19		24	21	19,0	126,9	59	55	40	36	34	34	37	20	-	-	-	-	-
8,4	22		28	24	19,0	129,6	63	59	40	36	35	35	40	22	-	-	-	-	-
8,7	31		39	33	19,0	132,3	74	70	42	38	39	39	48	27	-	-	-	-	-
9,0	15		19	16	19,0	135,0	51	49	39	35	33	32	33	17	-	-	-	-	-
9,3	10		13	10	19,0	137,7	42	40	38	34	31	29	28	14	-	-	-	-	-
9,6	12		15	12	19,0	140,4	45	44	39	34	32	30	30	15	-	-	-	-	-
9,9	9		11	9	19,0	143,1	39	38	38	33	30	28	27	13	-	-	-	-	-
10,2	6		10	8	19,0	145,8	37	35	38	33	30	27	26	13	-	-	-	-	-
10,5	8		13	11	19,0	148,5	42	41	39	34	31	29	29	14	-	-	-	-	-
10,8	9		15	12	19,0	151,2	45	43	39	34	32	30	30	15	-	-	-	-	-
11,1	6		10	8	19,0	153,9	36	35	38	33	30	27	26	13	-	-	-	-	-
11,4	24		30	23	19,0	156,6	62	61	41	37	36	36	41	23	-	-	-	-	-
11,7	23		29	22	19,0	159,3	61	60	40	36	36	36	40	22	-	-	-	-	-
12,0	21		26	20	19,0	162,0	58	57	40	36	35	35	39	21	-	-	-	-	-
12,3	23		29	22	19,0	164,7	60	59	40	36	36	36	40	22	-	-	-	-	-
12,6																			
12,9																			
13,2																			
13,5																			
13,8																			
14,1																			
14,4																			
14,7																			
15,0																			
15,3																			
15,6																			

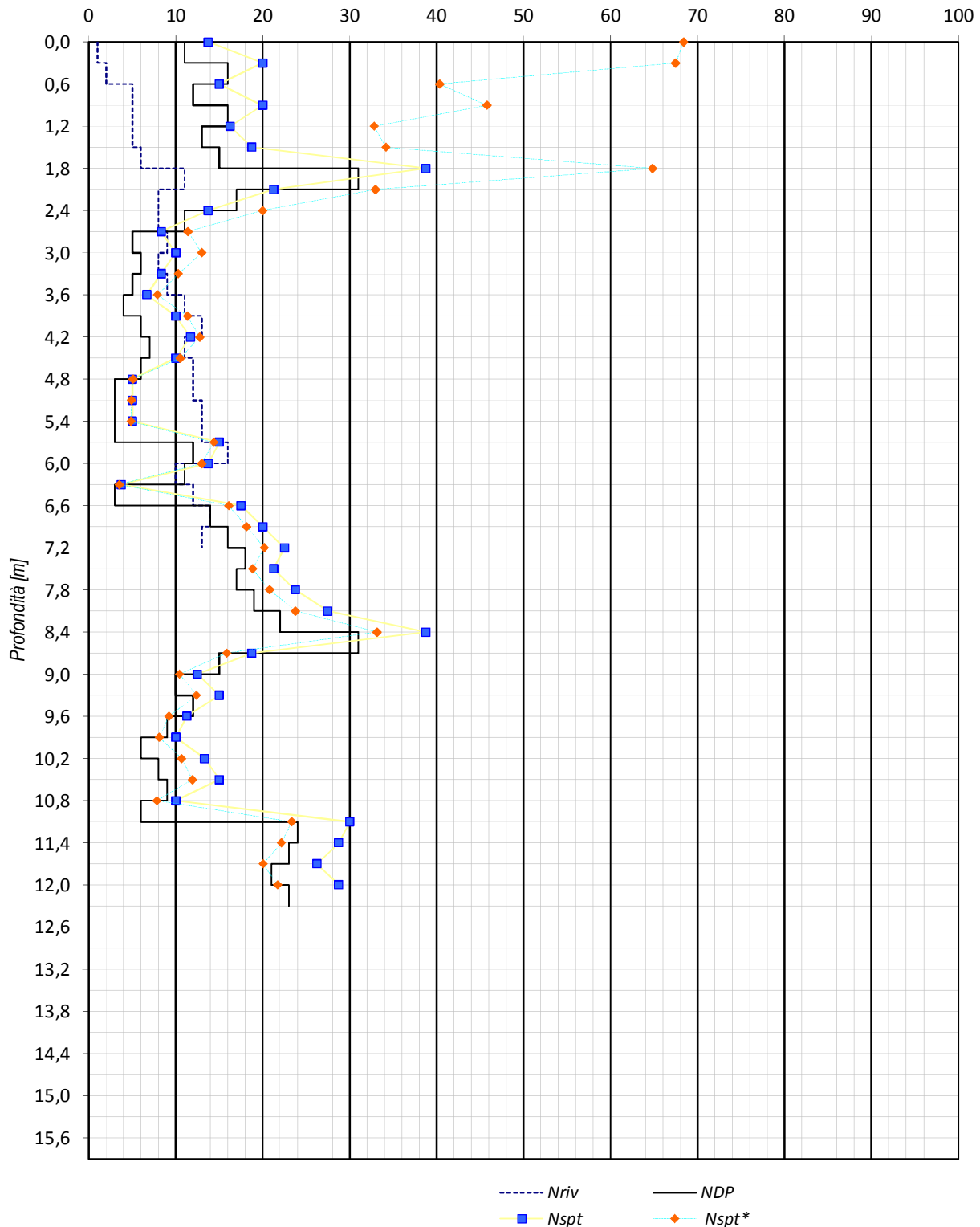
1 - Terzaghi e Peck, 1948  
2 - Bazaara e Peck 1967

3 / 4 - Shmertmann 1977  
5 / 6 - Shioi e Fukuni 1982

7 / 8 - D'Appolonia / Shultze 1970  
9 / 11 - Sowers

10 - Terzaghi e Peck 1948  
12 / 13 - Stroud e Butler 1975

# DIAGRAMMA PROVA DP 1



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente: Progetto B20 srl  
Commessa: Interventi di messa in sicurezza  
Località: Iseo - Scuola primaria

Prova: DP2  
Data: 15/10/2019  
Prof. Falda: 6,04 m

Z	N <sub>DP</sub>	N <sub>riv</sub>	N <sub>spt</sub>	N <sub>spt</sub> *	γ	σ <sub>v</sub> '	terreni granulari (1-8)								terreni coesivi (9-13)							
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
							Dr*	Dr	φ'g	φ's	φ's	φ's	E	E	Cu	Cu	Cu	Mo	Mo			
m	c/p	c/p	c/p	c/p	kN/mc	kPa	da N*	da N	da Dr	da Dr	da N	da N	da N*	da N	da N	da N	da N	da N	da N			
0,0																						
0,3	11		14	68	19,0	5,7	100	79	42	39	31	29	29	43	-	-	-	-	-			
0,6	19		24	80	19,0	11,4	100	98	44	42	34	34	37	49	-	-	-	-	-			
0,9	18		23	60	19,0	17,1	100	92	44	41	34	33	36	39	-	-	-	-	-			
1,2	16		20	46	19,0	22,8	87	83	43	40	33	32	53	31	-	-	-	-	-			
1,5	11		14	28	19,0	28,5	68	66	41	37	31	29	40	15	-	-	-	-	-			
1,8	7		12	21	19,0	34,2	60	59	40	36	31	28	35	13	-	-	-	-	-			
2,1	7		12	20	19,0	39,9	57	57	40	36	31	28	34	13	-	-	-	-	-			
2,4	6		10	16	19,0	45,6	51	51	40	35	30	27	30	13	-	-	-	-	-			
2,7	5		8	12	19,0	51,3	45	45	39	34	30	26	28	12	-	-	-	-	-			
3,0	3		5	7	19,0	57,0	34	34	38	33	29	24	10	10	18	34	63	2	3			
3,3	2		3	4	19,0	62,7	27	27	37	32	28	22	9	9	12	22	42	2	2			
3,6	3		5	6	19,0	68,4	32	32	38	33	29	24	10	10	18	34	63	2	3			
3,9	5		8	10	19,0	74,1	41	34	38	33	30	26	12	12	31	56	104	4	5			
4,2	16		20	23	19,0	79,8	62	52	40	35	33	32	36	18	-	-	-	-	-			
4,5	40		50	55	19,0	85,5	95	82	43	40	42	42	60	33	-	-	-	-	-			
4,8	6		8	8	19,0	91,2	36	32	38	32	29	26	25	11	-	-	-	-	-			
5,1	5		6	6	19,0	96,9	33	29	37	32	29	25	24	11	-	-	-	-	-			
5,4	14		18	17	19,0	102,6	54	48	39	35	32	31	32	17	-	-	-	-	-			
5,7	21		26	25	19,0	108,3	65	59	40	36	35	35	38	21	-	-	-	-	-			
6,0	19		24	22	19,0	114,0	61	56	40	36	34	34	35	20	-	-	-	-	-			
6,3	4		7	6	19,0	116,7	32	29	37	32	29	25	10	11	24	45	83	3	4			
6,6	3		5	5	19,0	119,4	27	25	37	32	29	24	9	10	18	34	63	2	3			
6,9	4		7	6	19,0	122,1	32	29	37	32	29	25	10	11	24	45	83	3	4			
7,2	5		8	7	19,0	124,8	35	33	38	33	30	26	11	12	31	56	104	4	5			
7,5	18		23	20	19,0	127,5	57	54	40	36	34	33	34	19	-	-	-	-	-			
7,8	20		25	22	19,0	130,2	60	57	40	36	35	34	35	20	-	-	-	-	-			
8,1	12		15	13	19,0	132,9	46	44	39	34	32	30	28	15	-	-	-	-	-			
8,4	13		16	14	19,0	135,6	48	45	39	34	32	31	29	16	-	-	-	-	-			
8,7	16		20	17	19,0	138,3	53	50	40	35	33	32	31	18	-	-	-	-	-			
9,0	12		15	12	19,0	141,0	45	44	39	34	32	30	28	15	-	-	-	-	-			
9,3	8		10	8	19,0	143,7	37	35	38	33	30	27	11	13	-	-	-	-	-			
9,6	9		11	9	19,0	146,4	39	38	38	33	30	28	12	13	-	-	-	-	-			
9,9	11		14	11	19,0	149,1	43	41	39	34	31	29	27	15	-	-	-	-	-			
10,2	8		10	8	19,0	151,8	36	35	38	33	30	27	25	13	-	-	-	-	-			
10,5	12		15	12	19,0	154,5	44	43	39	34	32	30	28	15	-	-	-	-	-			
10,8	12		15	12	19,0	157,2	44	43	39	34	32	30	28	15	-	-	-	-	-			
11,1	20		25	19	19,0	159,9	57	56	40	36	35	34	33	20	-	-	-	-	-			
11,4	23		29	22	19,0	162,6	60	59	40	36	36	36	35	22	-	-	-	-	-			
11,7	41		51	39	19,0	165,3	80	79	42	39	42	43	48	34	-	-	-	-	-			
12,0	20		25	19	19,0	168,0	56	55	40	36	35	34	33	20	-	-	-	-	-			
12,3	16		20	15	19,0	170,7	50	49	39	35	33	32	30	18	-	-	-	-	-			
12,6																						
12,9																						
13,2																						
13,5																						
13,8																						
14,1																						
14,4																						
14,7																						
15,0																						
15,3																						
15,6																						

1 - Terzaghi e Peck, 1948  
2 - Bazaara e Peck 1967

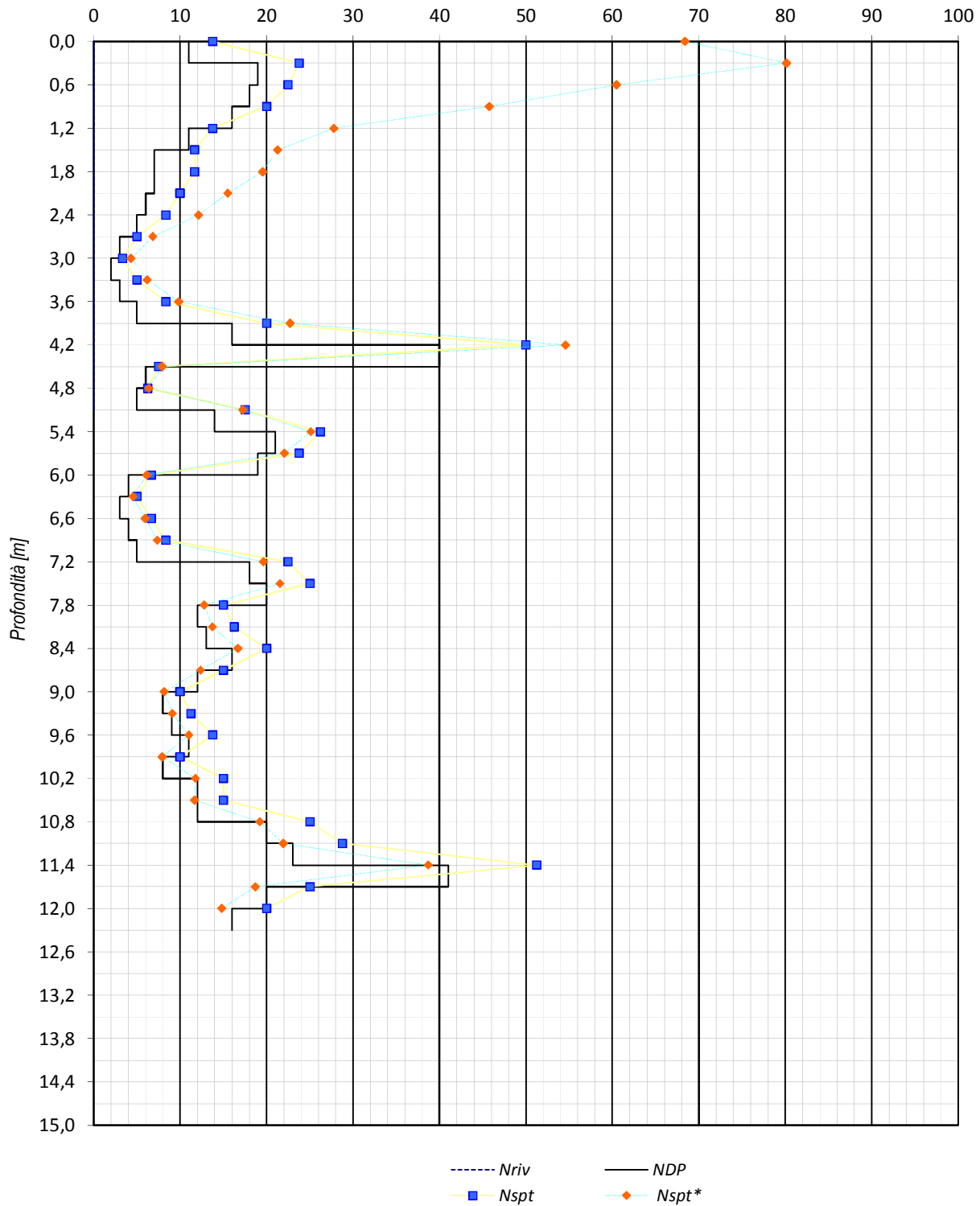
3 / 4 - Shmertmann 1977  
5 / 6 - Shioi e Fukuni 1982

7 / 8 - D'Appolonia / Shultze 1970  
9 / 11 - Sowers

10 - Terzaghi e Peck 1948  
12 / 13 - Stroud e Butler 1975



## DIAGRAMMA PROVA DP 2



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente: Progetto B20 srl  
Commessa: Interventi di messa in sicurezza  
Località: Iseo - Scuola primaria

Prova: DP3  
Data: 15/10/2019  
Prof. Falda: 5,75 m

Z	N <sub>DP</sub>	N <sub>riv</sub>	N <sub>spt</sub>	N <sub>spt</sub> *	γ	σ <sub>v</sub> '	terreni granulari (1-8)								terreni coesivi (9-13)				
							1	2	3	4	5	6	7	8	Cu	10	11	12	13
m	c/p	c/p	c/p	c/p	kN/mc	kPa	Dr*	Dr	φ'g	φ's	φ's	φ's	E	E	da N	da N	da N	da N	da N
							da N*	da N	da Dr	da Dr	da N	da N	da N*	da N	da N	da N	da N	da N	da N
							%	%	deg	deg	deg	deg	MPa	MPa	kPa	kPa	kPa	MPa	MPa
0,0																			
0,3	6	2	8	37	19,0	5,7	79	58	40	36	29	26	24	27	-	-	-	-	-
0,6	13	6	16	55	19,0	11,4	96	81	43	39	32	31	31	36	-	-	-	-	-
0,9	19	7	24	64	19,0	17,1	100	94	44	41	34	34	67	40	-	-	-	-	-
1,2	24	10	30	69	19,0	22,8	100	100	45	42	36	36	71	43	-	-	-	-	-
1,5	22	7	28	56	19,0	28,5	96	94	44	41	35	35	61	36	-	-	-	-	-
1,8	19	17	24	43	19,0	34,2	85	84	43	40	34	34	51	30	-	-	-	-	-
2,1	23	16	29	48	19,0	39,9	90	89	43	41	36	36	55	32	-	-	-	-	-
2,4	38	10	48	74	19,0	45,6	100	100	45	42	41	42	74	46	-	-	-	-	-
2,7	27	15	34	49	19,0	51,3	90	91	44	41	37	38	56	25	-	-	-	-	-
3,0	39	23	49	67	19,0	57,0	100	100	45	42	42	42	69	33	-	-	-	-	-
3,3	44	27	55	71	19,0	62,7	100	100	45	42	44	44	73	36	-	-	-	-	-
3,6	20	16	25	31	19,0	68,4	72	73	42	38	35	34	42	20	-	-	-	-	-
3,9	12	13	15	18	19,0	74,1	54	46	39	34	32	30	32	15	-	-	-	-	-
4,2	21	20	26	30	19,0	79,8	70	60	40	36	35	35	41	21	-	-	-	-	-
4,5	6	16	10	11	19,0	85,5	43	37	38	33	30	27	27	13	-	-	-	-	-
4,8	8	10	13	14	19,0	91,2	48	42	39	34	31	29	29	14	-	-	-	-	-
5,1	7	13	12	12	19,0	96,9	44	40	38	34	31	28	28	13	-	-	-	-	-
5,4	6	16	10	10	19,0	102,6	41	36	38	33	30	27	26	13	-	-	-	-	-
5,7	3	17	5	5	19,0	108,3	28	26	37	32	29	24	9	10	18	34	63	2	3
6,0	4	9	7	6	19,0	111,0	32	30	37	32	29	25	10	11	24	45	83	3	4
6,3	3		5	5	19,0	113,7	28	26	37	32	29	24	9	10	18	34	63	2	3
6,6	11		14	13	19,0	116,4	46	42	39	34	31	29	28	15	-	-	-	-	-
6,9	10		13	11	19,0	119,1	43	40	39	34	31	29	27	14	-	-	-	-	-
7,2	9		11	10	19,0	121,8	41	38	38	33	30	28	26	13	-	-	-	-	-
7,5	7		9	8	19,0	124,5	36	34	38	33	30	26	25	12	-	-	-	-	-
7,8	20		25	22	19,0	127,2	60	57	40	36	35	34	35	20	-	-	-	-	-
8,1	17		21	18	19,0	129,9	55	52	40	35	33	33	33	18	-	-	-	-	-
8,4	16		20	17	19,0	132,6	53	51	40	35	33	32	32	18	-	-	-	-	-
8,7	30		38	32	19,0	135,3	73	69	41	38	38	39	43	27	-	-	-	-	-
9,0	30		38	31	19,0	138,0	72	69	41	38	38	39	42	27	-	-	-	-	-
9,3	31		39	32	19,0	140,7	73	70	42	38	39	39	43	27	-	-	-	-	-
9,6	18		23	18	19,0	143,4	55	53	40	35	34	33	33	19	-	-	-	-	-
9,9	14		18	14	19,0	146,1	49	47	39	35	32	31	29	17	-	-	-	-	-
10,2	13		16	13	19,0	148,8	47	45	39	34	32	31	29	16	-	-	-	-	-
10,5																			
10,8																			
11,1																			
11,4																			
11,7																			
12,0																			
12,3																			
12,6																			
12,9																			
13,2																			
13,5																			
13,8																			
14,1																			
14,4																			
14,7																			
15,0																			
15,3																			
15,6																			

1 - Ter: 100

2 - Bazaara e Peck 1967

3 / 4 - Shmertmann 1977

5 / 6 - Shioi e Fukuni 1982

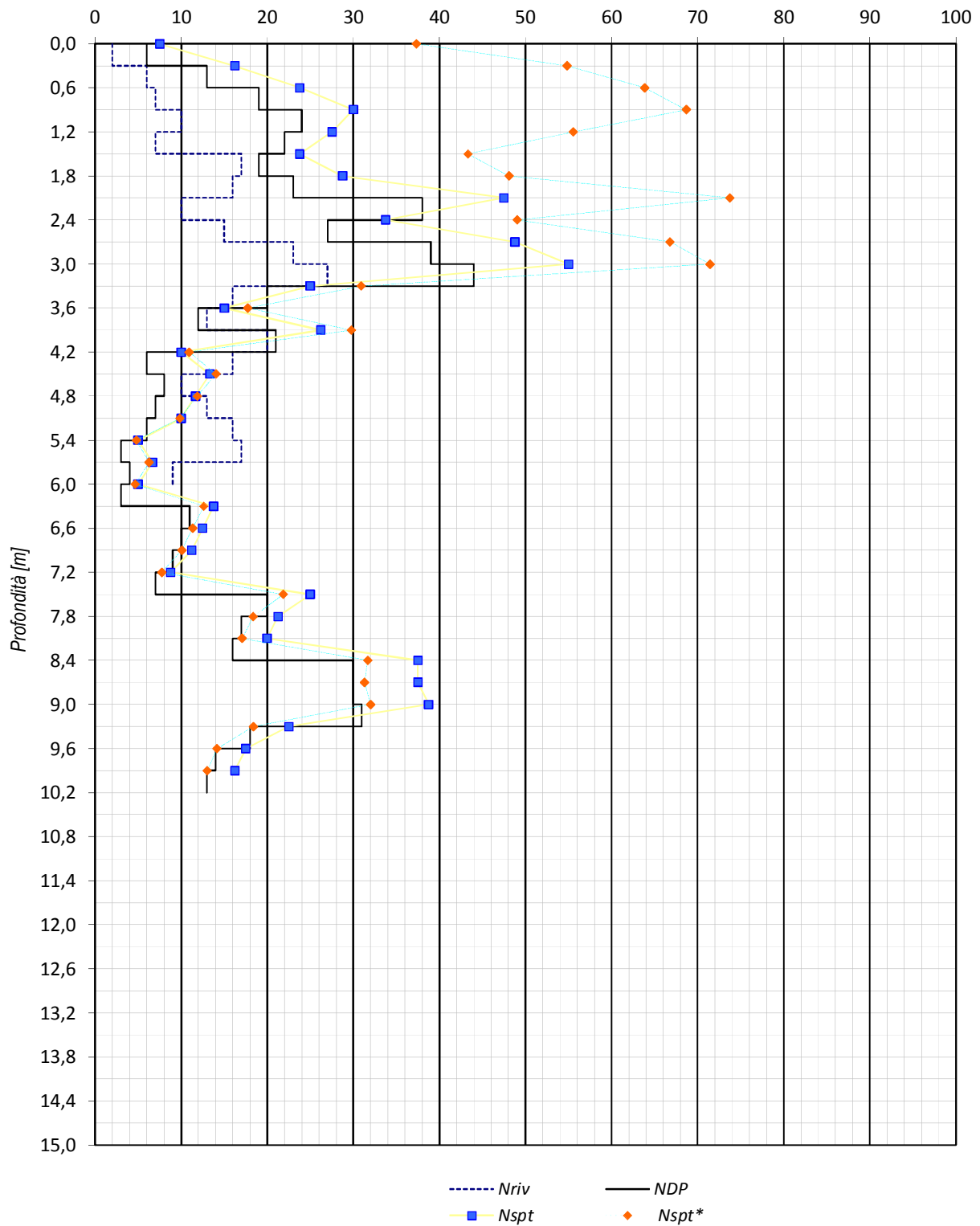
7 / 8 - D'Appolonia / Shultze 1970

9 / 11 - Sowers

10 - Terzaghi e Peck 1948

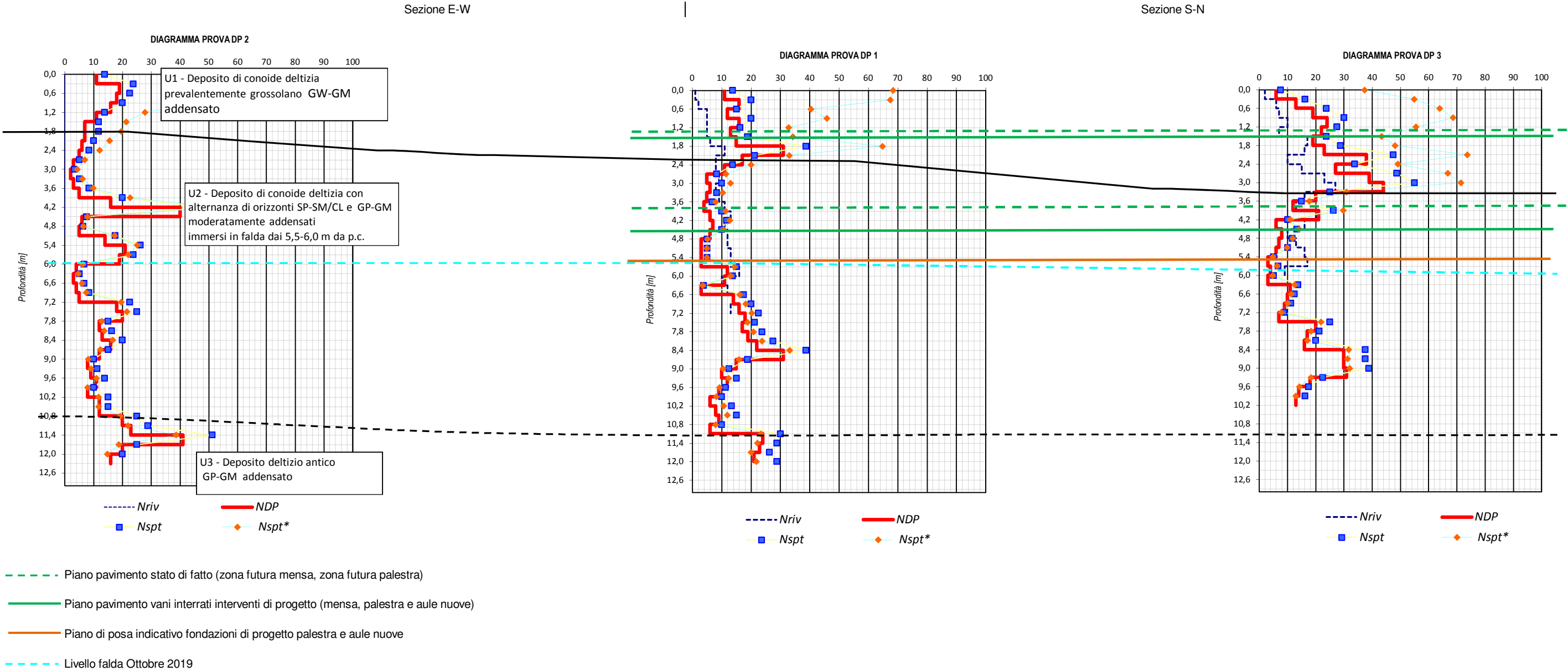
12 / 13 - Stroud e Butler 1975

### DIAGRAMMA PROVA DP 3



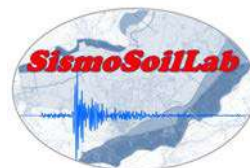


Schema del modello geologico- geotecnico preliminare  
Scuola Primaria Iseo





**Politecnico di Milano**  
**Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale**  
*Piazza Leonardo Da Vinci, 32 - 20133 Milano*



**Incarico di consulenza  
tra  
PROGETTO B20 S.r.l.  
e  
Politecnico di Milano  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale**

**INDAGINI DI SISMICA SUPERFICIALE COMBINATA**

**Sito Scuola Primaria in via della Cerca, 10**

**COMUNE DI ISEO (BS)**

**RELAZIONE TECNICA**

**Massimo Compagnoni**

**Stefano Munda**

**Floriana Pergalani**

Milano, 30 Ottobre 2019

## **SOMMARIO**

1. Obiettivi.....	- 3 -
2. Indagine e strumentazione utilizzata.....	- 3 -
3. Cenni teorici .....	- 5 -
4. Metodo di acquisizione.....	- 7 -
5. Metodo di elaborazione.....	- 8 -
6. Risultati .....	- 12 -
6.1 RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE P .....	- 12 -
6.2 RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE SH.....	- 16 -
6.3 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE ZVF.....	- 20 -
6.4 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE RVF .....	- 22 -
6.5 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE THF .....	- 24 -
6.6 RISULTATI INDAGINE PUNTUALE HVSR.....	- 26 -
7. Interpretazione .....	- 29 -
8. Considerazioni finali.....	- 34 -
9. Bibliografia .....	- 36 -
10. Documentazione fotografica .....	- 37 -



## 1. Obiettivi

Su incarico della PROGETTO B20 S.r.l. (offerta n. 171250/III/19 del 14 ottobre 2019) è stata eseguita una campagna di indagine geofisica di sismica superficiale combinata nell'area adiacente alla Scuola Primaria in via della Cerca, 10 nel Comune di Iseo, in particolare nel Parco delle Rimembranze (vedi inquadramento al cap. 2).

La campagna d'indagine si colloca nell'ambito dello studio geologico e geotecnico di caratterizzazione del sito oggetto di verifica.

## 2. Indagine e strumentazione utilizzata

La campagna di indagine è stata così organizzata:

- n. 1 indagine lineare di sismica superficiale, rappresentata dalla combinazione di indagine di sismica a rifrazione in fase P e SH e indagine MASW in configurazione ZVF, RVF e THF, finalizzate all'individuazione del profilo di rigidezza medio e al parametro  $V_{S30}$  rappresentativo del sito, dal quale è possibile definire la categoria di sottosuolo di appartenenza ai sensi delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* - DM 17 gennaio 2018, Gazzetta Ufficiale, n. 42 del 20 febbraio 2018, Serie Generale, paragrafo 3.2.2. Tabella 3.2.II;
- n. 1 indagine puntuale con acquisizione di rumore sismico ambientale a stazione singola, finalizzate all'applicazione della tecnica HVSr e alla determinazione della relativa curva HV del sito.

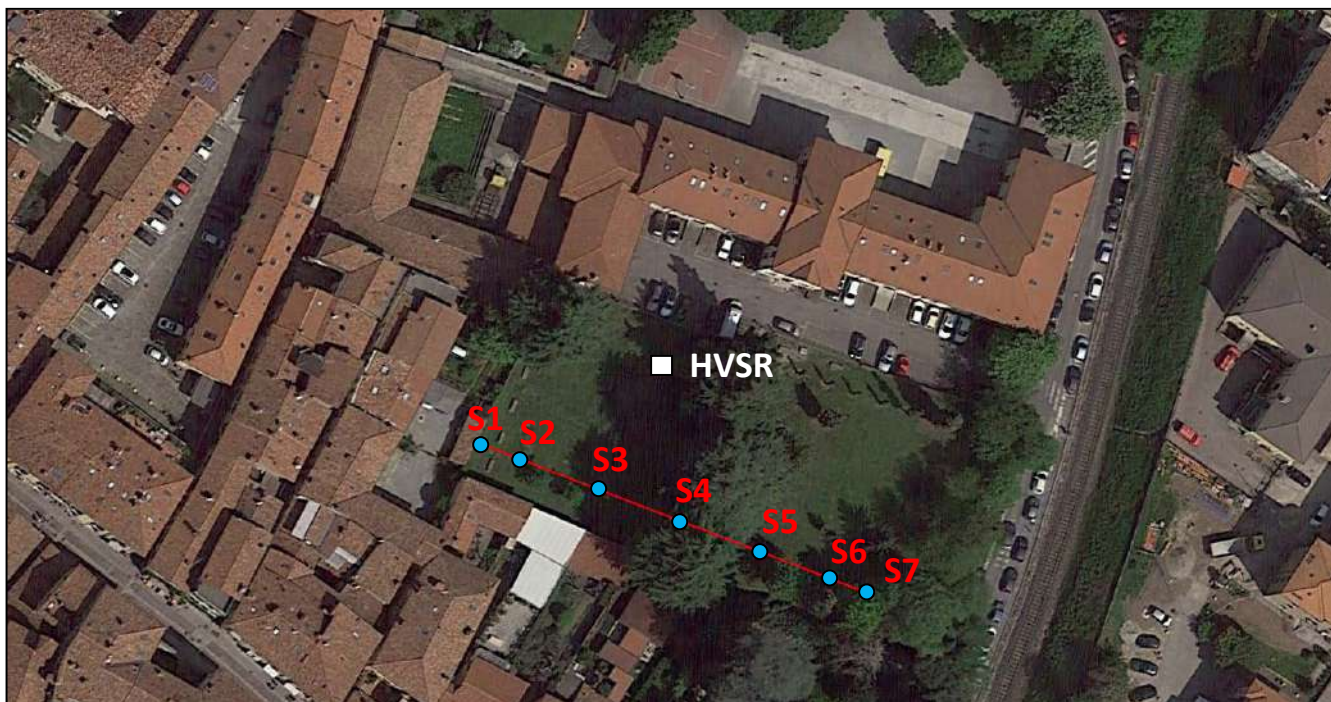
L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P;
- un sistema di energizzazione per le onde SH: la sorgente è costituita da un pendolo con massa battente del peso di 10 kg battente su una piastra nelle due direzioni orizzontali per la generazione prevalentemente di onde SH;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria 4.5 Hz, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali prodotte da una specifica sorgente;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni orizzontali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria 8.0 Hz, ovvero dei

trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche trasversali prodotte da una specifica sorgente;

- un sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da sismografo a 24 canali della Geometrics, con range dinamico di sistema di 144 dB, intervallo di campionamento compreso tra 0.02 e 16 ms, fino a 16000 campioni per traccia; il sismografo è alimentato con batteria al Pb a 12 V ed è collegato al notebook PC per il salvataggio delle acquisizioni e la gestione dei parametri di configurazione spaziali e temporali; i geofoni sono collegati al sismografo tramite cavo sismico;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso (attraverso sensore di movimento applicato alla mazza) nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione;
- un velocimetro tridirezionale del tipo Trillium compact 20 s della Nanometrics, collegati ad acquirente Centaur, fornito di antenna GPS per la rilevazione del tempo universale UTC.

Di seguito si riporta il sito e la configurazione dell'indagine:



### 3. Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. 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 coniche o 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  $90^\circ$  propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.

I contrasti di proprietà elastiche responsabili della generazione di onde birifratte possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali e/o idrogeologiche.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) (Park et al., 1999) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo medio di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , 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 rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione delle onde di *Rayleigh* è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda. In un mezzo verticalmente eterogeneo, ovvero stratificato, le onde di *Rayleigh* sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), 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 di *Rayleigh* è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

La propagazione delle onde di *Rayleigh* in un mezzo stratificato è un fenomeno multi-modale, ovvero in corrispondenza di una certa frequenza, per un determinato sito caratterizzato da una



specifica stratigrafia, possono esistere diverse velocità di propagazione, a cui corrisponde un determinato modo di vibrazione del sito.

Il metodo di indagine MASW attivo consiste nella generazione artificiale di onde superficiali in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente all'array) e nell'acquisizione della perturbazione generata lungo uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale apparente nel *range* di frequenze compreso tra 10-15Hz e 70-100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente. Lungo lo stendimento di sensori così predisposto è possibile acquisire anche rumore ambientale.

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.

In analogia a quanto sopra citato relativo all'utilizzo di geofoni verticali e di sorgente verticale (configurazione ZVF) è possibile eseguire l'indagine MASW sia in configurazione RVF, utilizzando geofoni orizzontali disposti longitudinalmente rispetto allo stendimento di geofoni e sorgente verticale, sia in configurazione THF, utilizzando geofoni orizzontali disposti trasversalmente rispetto allo stendimento di geofoni e sorgente trasversale: in quest'ultimo caso l'analisi sarà condotta sulle onde superficiali di Love in modo analogo a quanto descritto per la componente verticale e radiale delle onde di Rayleigh con il vantaggio di disporre di due tipologie di curve di dispersione e vincolare in modo più robusto il successivo processo d'inversione.

Il metodo HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è finalizzato all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di un sito, le quali risultano correlabili a contatti litologici presenti nel sottosuolo e caratterizzati da un sufficiente contrasto di impedenza sismica in termini di rigidità. Il rumore sismico ambientale o microtemore è caratterizzato da vibrazioni ambientali di bassa energia con ampiezze dell'ordine dei  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  mm, non percepibili dall'uomo, e originate da una molteplicità di sorgenti agenti a diverse frequenze: le onde marine e le perturbazioni atmosferiche contribuiscono al campo d'onda prevalentemente con frequenze inferiori a 0.5 Hz, mentre il vento, il traffico veicolare e le attività antropiche contribuiscono prevalentemente a frequenze superiori a 0.5 Hz. La tecnica a stazione singola analizza, in termini di ampiezza, il campo

delle vibrazioni ambientali, sfruttando la sua irregolarità temporale, in quanto questa è legata all'indipendenza dinamica delle sorgenti e alla molteplicità dei percorsi delle onde da esse generate; questa irregolarità permette di definire la struttura media del segnale costituente il campo delle vibrazioni ambientali come statisticamente indipendente dalla natura e posizione delle sorgenti e di considerare quindi il segnale acquisito condizionato esclusivamente dalla struttura del sottosuolo. L'ipotesi di base è pertanto la presenza di sorgenti distribuite in modo statisticamente omogeneo attorno al sito di misura, che si attivano in modo non coordinato tra loro. In particolare la tecnica HVSR permette di determinare la curva sperimentale che rappresenta il rapporto tra le ampiezze spettrali medie delle componenti orizzontali e quelle della componente verticale delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza (Nogoshi e Igarashi, 1970; Nakamura, 1989).

#### **4. Metodo di acquisizione**

Nell'ambito dell'indagine lineare è di fondamentale importanza eseguire più energizzazioni a distanze diverse dai sensori e in corrispondenza di ciascun estremità dell'array sismico, in modo da disporre di una sufficiente ridondanza di informazioni che permette di gestire al meglio eventuali disomogeneità presenti nel sottosuolo.

La tipologia d'indagine necessita di una certa attenzione nella scelta dei parametri configurazionali di acquisizione, sia in termini temporali sia in termini spaziale: il campionamento temporale deve essere tale da permettere l'acquisizione completa della perturbazione in tutti i sensori disponibili, la frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio di quella massima che si intende registrare, la lunghezza dello stendimento non deve essere inferiore alla metà della massima lunghezza d'onda che si intende acquisire e la distanza intergeofonica deve essere la metà della minima lunghezza d'onda di interesse.

Sulla base di queste valutazioni e compatibilmente con la logistica del sito è stato allestito uno stendimento sismico lineare, lungo il quale sono stati disposti e collegati in serie i 24 geofoni verticali e orizzontali con distanza intergeofonica di 2 m; sono stati eseguiti n. 7 punti di energizzazione, organizzati simmetricamente con 3 shots interni ugualmente spaziati e 2 shots esterni per ciascun estremo dello stendimento; è stato utilizzato un sistema di riferimento relativo, la cui origine è posta in corrispondenza dello shot S1 esterno al 1° geofono, come mostrato nella figura d'inquadramento del capitolo 2.

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) dell'acquisizione lineare:

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA LINEARE</b>	
Dislivello altimetrico tra gli <i>shots</i> esterni	1 m
Lunghezza stendimento compresi <i>shots</i> esterni	66 m
Lunghezza stendimento ricevitori	46 m
Numero Geofoni	24
Distanza intergeofonica	2 m
Numero punti di energizzazione ( <i>shots</i> )	7
1° <i>Shot</i> esterno	4 m
2° <i>Shot</i> esterno	10 m
Durata acquisizione	1 s
Pre-triggering delay	50 ms
Intervallo di campionamento	1 ms
Numero di campioni per traccia	1000
Massima frequenza campionabile	500 Hz

Per quanto riguarda l'indagine puntuale (acquisizione del rumore ambientale) il sensore è stato posizionato all'interno dell'area mediante infissione nel terreno di appositi puntali, garantendo l'orizzontalità dello strumento mediante bolla sferica.

Nel limite del possibile sono da evitare acquisizioni in prossimità di edifici, alberi e strutture verticali in grado di trasmettere al suolo frequenze proprie di risonanza e da sorgenti impulsive o monocromatiche; una serie di accorgimenti sono contenuti nel Progetto Sesame, 2004.

La durata dell'acquisizione è stata di 3h 30' con frequenza di campionamento di 200 Hz.

## 5. Metodo di elaborazione

L'analisi dell'acquisizione lineare ha permesso di individuare il tempo di primo arrivo in corrispondenza di ciascun ricevitore verticale ed orizzontale per ciascun punto di energizzazione, attraverso la procedura di *picking* manuale; tali valori sono stati riportati in un grafico distanza-tempo, opportunamente corretti in funzione della topografia, per ottenere l'andamento delle dromocrone, dal quale è possibile ottenere l'andamento delle velocità delle onde analizzate con la profondità (longitudinali  $V_p$  e trasversali  $V_{SH}$ ); la profondità totale investigata è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

La ricostruzione del modello sismostratigrafico può avvenire attraverso l'utilizzo di molteplici metodi di interpretazione; tra i metodi disponibili in letteratura si è scelto di utilizzare:



- il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D, attraverso la combinazione dei tempi di percorso in direzione “avanti” (*forward shot*) e in direzione “indietro” (*reverse shot*); la ricostruzione dei rifrattori avviene nei punti in cui la somma dei tempi di percorso verso il basso è uguale ai tempi di percorso reciproco; la velocità del rifrattore è determinata dalla media delle pendenze dei fronti d'onda *forward* e *reverse*; la condizione preliminare per l'applicazione del metodo è l'esistenza di un completo *traveltime* nelle due direzioni dello stendimento; il metodo richiede la costruzione preliminare di una griglia di calcolo equispaziata, che per tutti gli stendimenti eseguiti è stata fissata a passo 1 m;
- il metodo di tomografia sismica, il quale, partendo dal modello iniziale 1D di velocità desunto con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D e dai dati di *traveltime* ottenuti dal *picking* manuale, modella il percorso bidimensionale di un fascio di raggi curvilinei per ogni arrivo (Hermann, 1980; Worthington, 1984; Nolet, 1987), mediante l'algoritmo tomografico basato sull'adattamento iterativo SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*).

L'interpretazione è stata eseguita mediante il *software Reflexw versione 7.5* della Sandmeier software (2014).

Dall'osservazione del modello interpretativo ottenuto in termini di onde di volume longitudinali e trasversali è stato ricostruito il modello sismostratigrafico del sito fino alla massima profondità di indagine, variabile in funzione della lunghezza dello stendimento sismico e della sismo-stratigrafia del sottosuolo.

I dati acquisiti in configurazione MASW ZVF, RVF e THF sono stati eseguiti con diversa distanza della sorgente dal geofono esterno ai due estremi dello stendimento sismico, al fine di verificare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) e di valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente delle Onde di Rayleigh e delle Onde di Love, operazione fondamentale prima di elaborare un modello di rigidità 1D rappresentativo della risposta del sito.

I dati di campagna acquisiti sono stati trasformati nel dominio f-k (frequenza – numero d'onda): i massimi di energia individuati sono associabili rispettivamente alle onde di Rayleigh e Love; per ogni frequenza il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k, da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh e Love.

Per ciascuna acquisizione in configurazione ZVF, RVF e THF è stata determinata la curva di dispersione sperimentale e da queste sono stati riconosciuti gli eventi coerenti in ampi intervalli di frequenza, in modo da individuare gli eventi associabili ai diversi modi di propagazione.

Dall'osservazione delle diverse curve di dispersione sperimentale è stata individuata l'acquisizione che fornisce una curva di dispersione sperimentale apparente meglio definita per quanto riguarda il modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e dell'onda di Love e dei relativi modi superiori; le acquisizioni selezionate non sono state sottoposte a operazioni di filtraggio, in quanto non ritenute necessarie.

Sulla base del modello geologico di riferimento è stato stimato un modello 1D preliminare in termini di  $V_p$  e  $V_s$  e, tramite procedura diretta, sono state calcolate le relative curve di dispersione numeriche dell'onda di Rayleigh e dell'onda di Love, utilizzando il *software winMASW5.2* (2013) della EliaSoft; la procedura adottata prevede la modifica controllata, sulla base del modello geologico del sito, dei valori di densità di massa  $\rho$ , spessore  $h$ , velocità delle onde di taglio  $V_s$  e del coefficiente di Poisson  $\nu$  di ciascun strato che costituisce il modello preliminare del sottosuolo, nel rispetto del modello 1D in onde P e SH determinato dalla sismica a rifrazione.

L'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio rappresentativo del sito avviene pertanto integrando tra loro i risultati ottenuti dalla modellazione diretta e dall'inversione automatica.

L'analisi dell'acquisizione puntuale è stata eseguita selezionando l'intervallo di registrazione centrale di durata 3h, eliminando la prima parte poco rappresentativa legata alla fase di stabilizzazione del sensore e la parte finale, disturbata dalle operazioni di spegnimento dell'acquisitore; sono stati inoltre rimossi eventuali transienti presenti nella registrazione, sia manualmente sia attraverso la procedura che si basa sul confronto tra la media dell'ampiezza del segnale calcolata su un periodo breve di tempo "STA" (Short Time Average, fissato pari a 1 s) e quella calcolata su una finestra di tempo più lunga dell'ordine delle decine di secondi "LTA" (Long Time Average, fissato pari a 30 s).

Il segnale ottenuto è stato segmentato in finestre di campionamento, il cui numero e lunghezza minima sono funzione della frequenza principale di risonanza  $f_0$ ; per ciascuna finestra di elaborazione (fissata pari a 60 s) sono calcolati gli spettri di Fourier di ciascuna componente, prevedendo una procedura di lisciamento con un'opportuna funzione di smoothing (Konno & Ohmachi costante 40); per ciascuna finestra vengono combinati gli spettri delle componenti orizzontali con una media quadratica e calcolato, frequenza per frequenza, il rapporto tra la componente orizzontale così ottenuta e quella verticale; il rapporto HVSR è dato dalla media del

valore spettrale delle componenti orizzontali (NS e EW) e il valore spettrale della componente verticale (Z), secondo la formula:

$$HVS\!R = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{Z}$$

I risultati ottenuti da ciascuna finestra di elaborazione sono stati elaborati statisticamente, definendo la curva HV media con la relativa deviazione standard e, per le stesse finestre di elaborazione, è stata analizzata la direzionalità del campo d'onda acquisito.

L'elaborazione dei segnali è stata eseguita tramite il software *Geopsy 2.9* (*Geopsy team, SESAME European Project, 2005*).

Tramite l'applicazione dei criteri del progetto SESAME (2004) sono state valutate le caratteristiche dei picchi di risonanza della curva HV, ove presenti, in termini di affidabilità statistica e chiarezza: la prima parte dei criteri è dedicata alla valutazione dell'attendibilità statistica della curva HVS\!R, ovvero viene valutato se la registrazione sia stata effettuata per un periodo sufficientemente lungo ed analizzata per un numero sufficiente di finestre temporali; la seconda parte dei criteri è dedicata alla valutazione della chiarezza del picco H/V attraverso un'analisi morfologica.

Di seguito si riportano, estratti dal progetto *SESAME WP12 – Deliverable D23.12, dicembre 2004* i criteri per la valutazione dell'affidabilità statistica e della chiarezza del picco, come sopra descritto:

Criteria for a reliable H/V curve
i)
f0 > 10 / lw
and
ii)
nc (f0) > 200
and
iii)
σA(f)<2 for 0.5f0<f<2f0 if f0>0.5Hz
or
σA(f)<3 for 0.5f0<f<2f0 if f0<0.5Hz

Criteria for a clear H/V peak
(at least 5 out of 6 criteria fulfilled)
i)
∃ f ∈ [f0/4, f0] | AH/V(f) < A0/2
ii)
∃ f\* ∈ [f0, 4f0] | AH/V(f\*) < A0/2
iii)
A0 > 2
iv)
fpeak[AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%
v)
σf < ε(f0)
vi)
σA(f0) < θ(f0)

lw = window length
nw = number of windows selected for the average H/V curve
nc = lw · nw, f0 = number of significant cycles
f = current frequency
fsensor = sensor cut-off frequency
f0 = H/V peak frequency
σf = standard deviation of H/V peak frequency (f0 ± σf)
ε (f0) = threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0 = H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V (f) = H/V curve amplitude at frequency f
f = frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f) < A0/2
f\* = frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f\*) < A0/2
σA (f) = "standard deviation" of AH/V (f), σA (f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V (f) = standard deviation of the logAH/V(f) curve, σlogH/V (f) is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean logAH/V(f) curve
θ (f0) = threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)
Vs,av = average S-wave velocity of the total deposits
Vs,surf = S-wave velocity of the surface layer
h = depth to bedrock
hmin = lower-bound estimate of h

Threshold Values for σf and σA(f0)

Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
ε (f0) [Hz]	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ (f0) for σA (f0)	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
log θ (f0) for σlogH/V (f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

## 6. Risultati

Di seguito vengono riportati le elaborazioni e i risultati ottenuti.

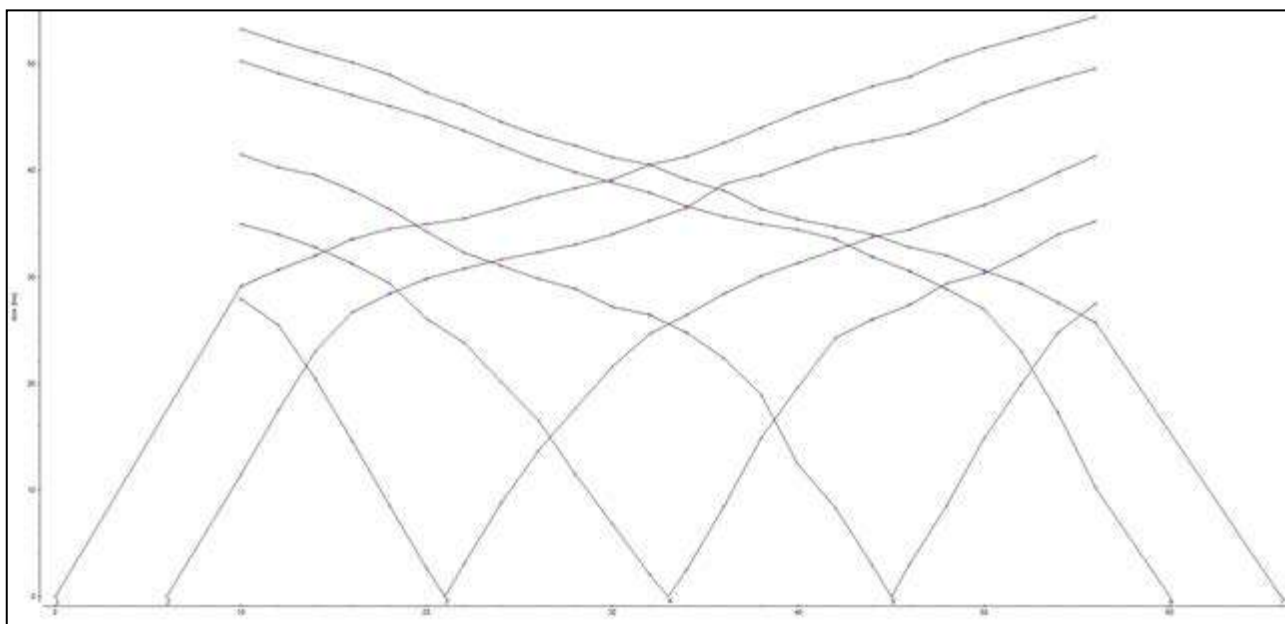
Per le elaborazioni in termini di indagine di sismica a rifrazione in fase P e SH sono riportati i tempi di primo arrivo e le relative dromocrone, le assegnazioni dei tratti di dromocrona ai vari strati del modello interpretativo, i risultati delle interpretazioni condotte con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D, i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo tomografico e il relativo confronto tra dromocrone sintetiche e dromocrone sperimentali.

Per le elaborazioni in termini di indagine MASW in configurazione ZVF, RVF e THF sono riportati gli spettri  $f-V_f$  (frequenza-velocità di fase) di ciascuna acquisizione coniugata, i relativi spettri  $f-k$  (frequenza-numero d'onda), le curve di dispersione apparente sperimentali scelte come caratteristiche del sito (picking) e le curve di dispersione numeriche che meglio approssimano quelle sperimentali con il relativo profilo 1D di rigidezza con la profondità (modello preliminare).

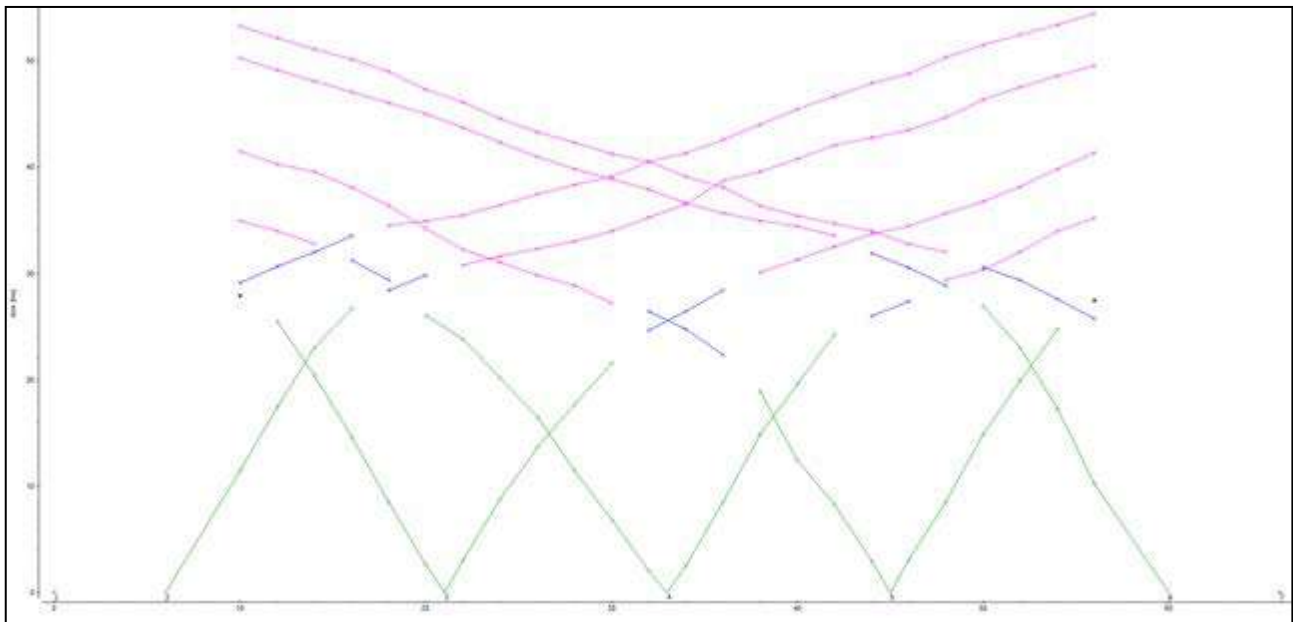
Per le elaborazioni in termini di indagine HVSr sono riportati gli spettri di Fourier medi di ciascuna componente, la curva HV calcolata per ciascuna finestra di elaborazione, la curva HV media e relativa deviazione standard e il grafico della direzionalità della curva HV.

### 6.1 RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE P

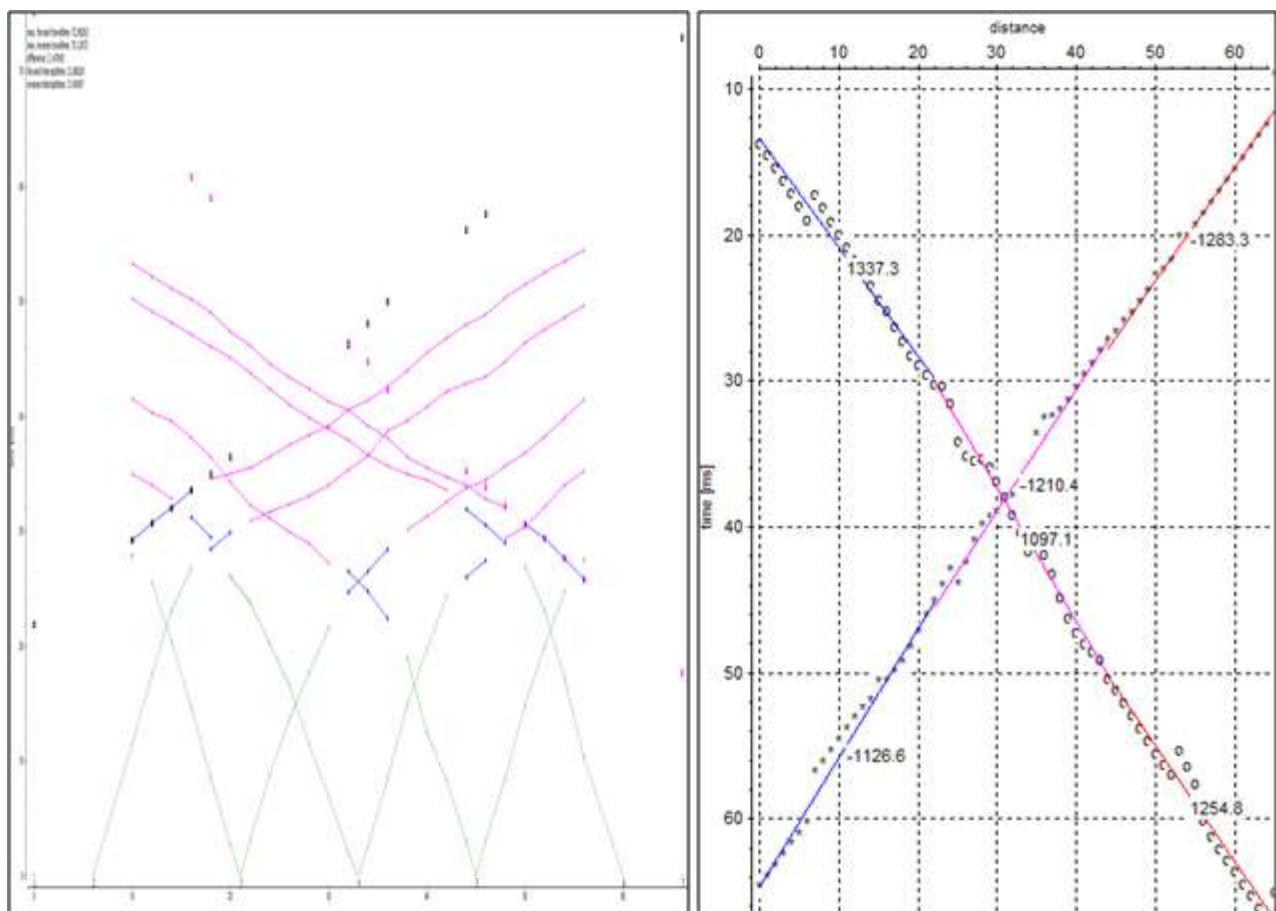
Di seguito sono riportate le dromocrone e le relative assegnazioni:

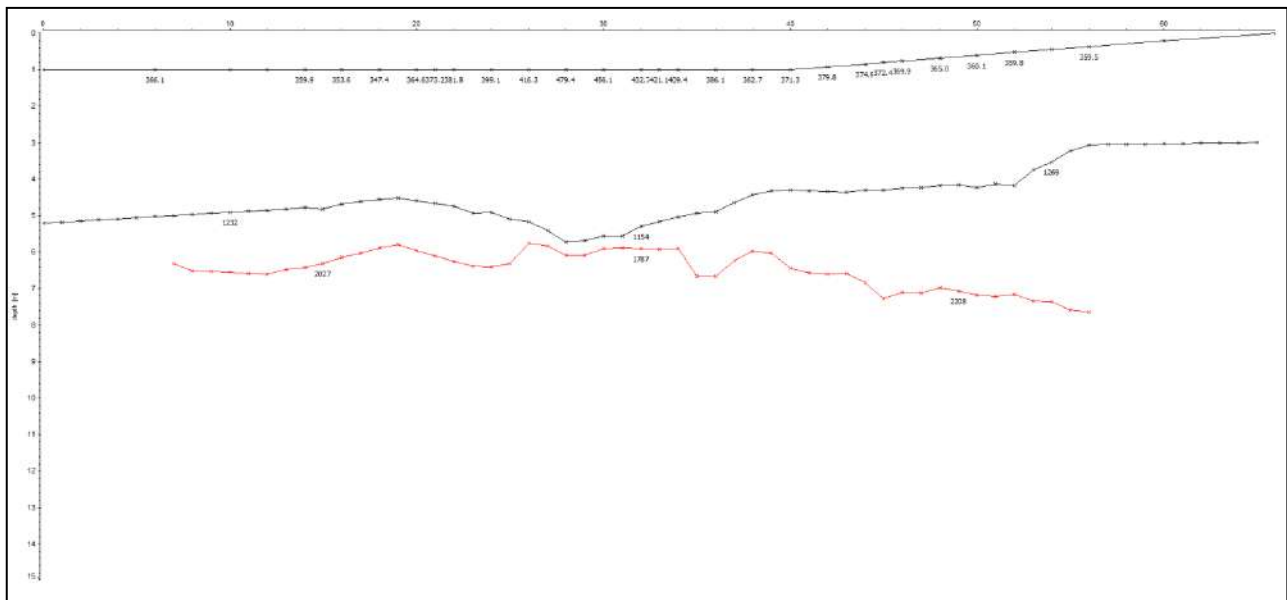
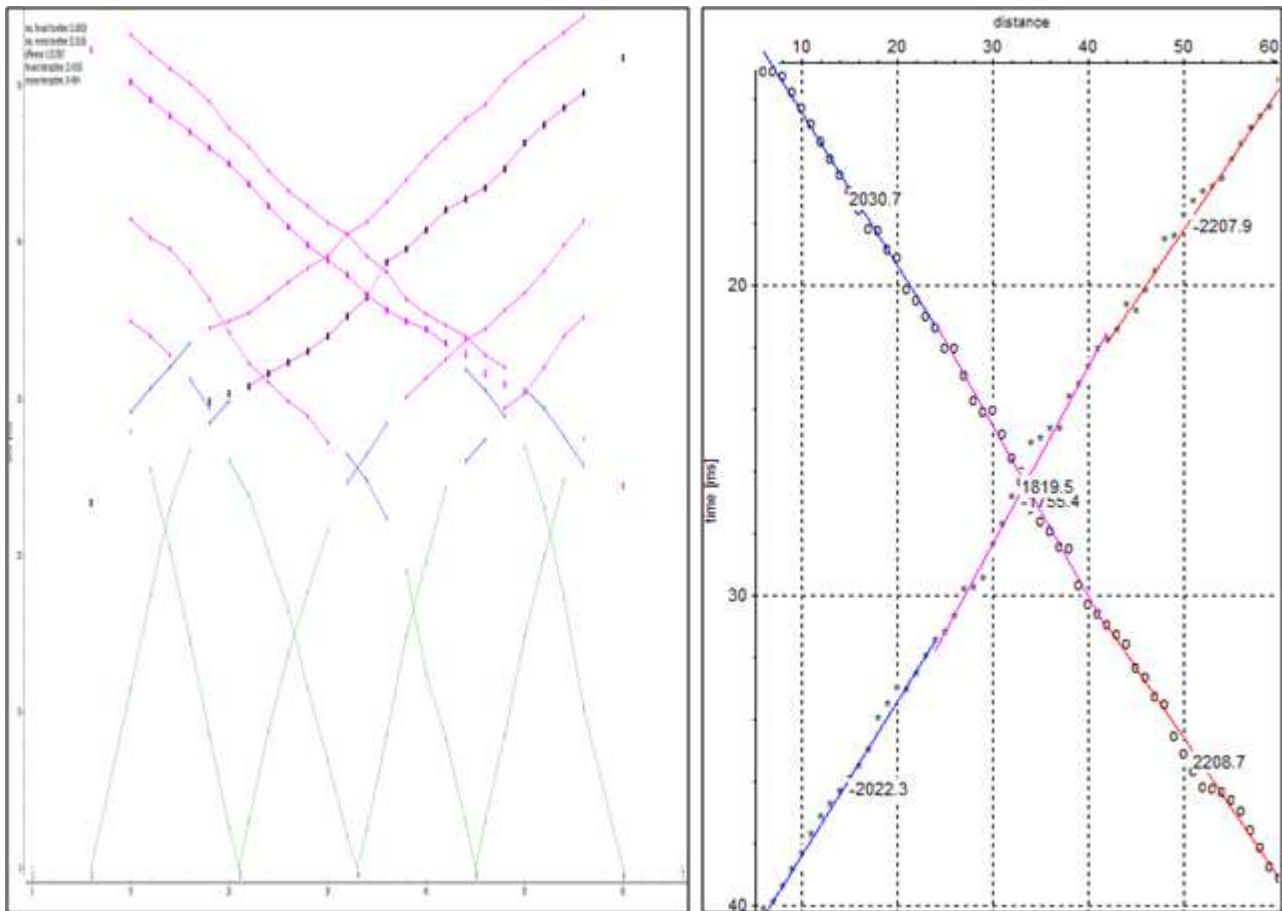




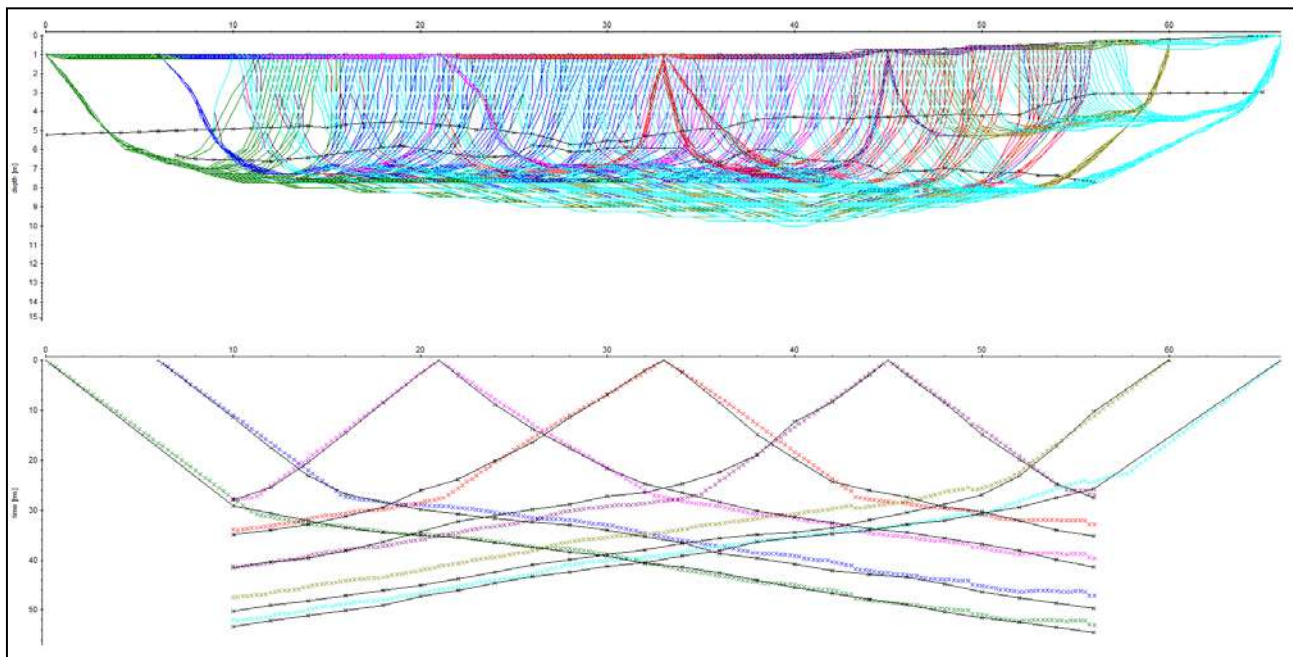
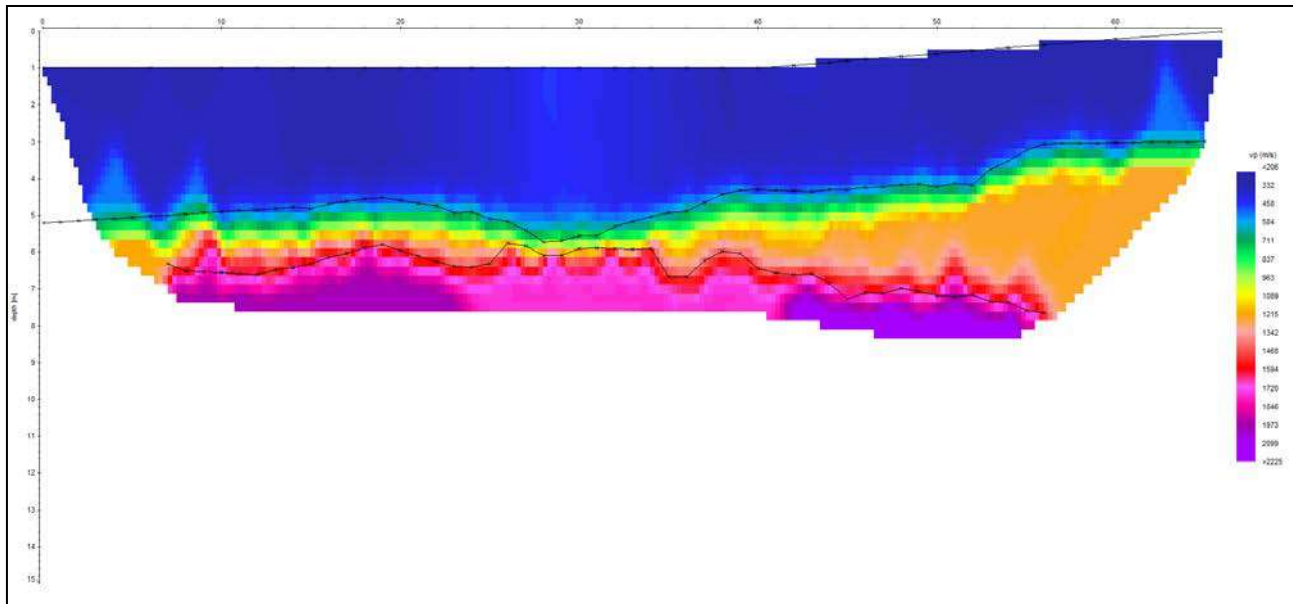


Di seguito si riportano le elaborazioni condotte con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D:



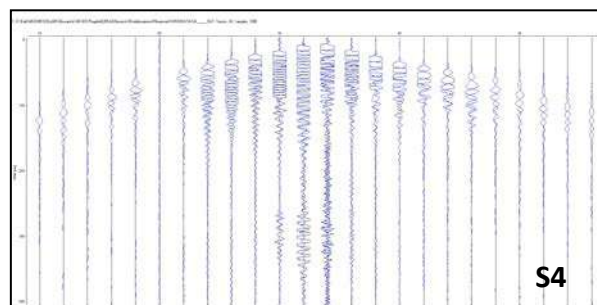
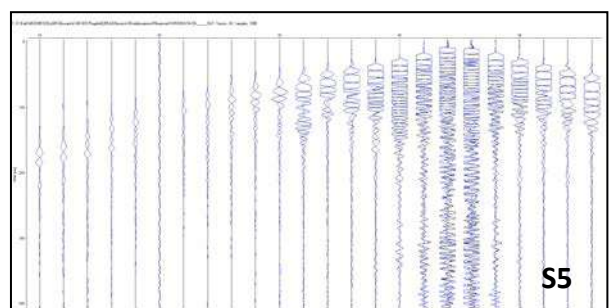
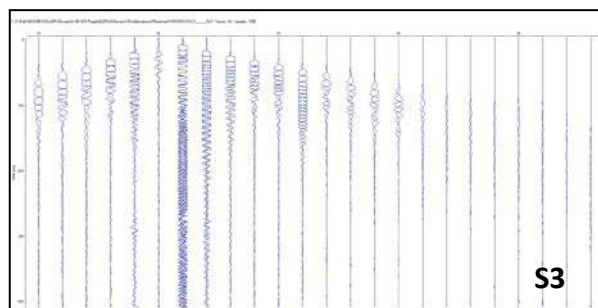
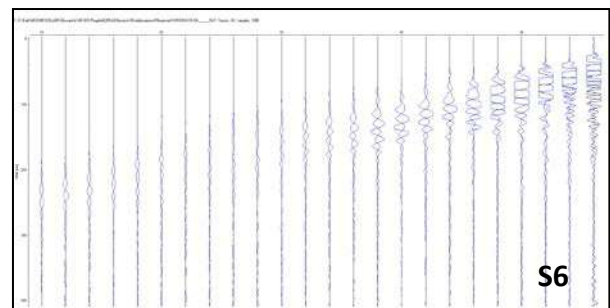
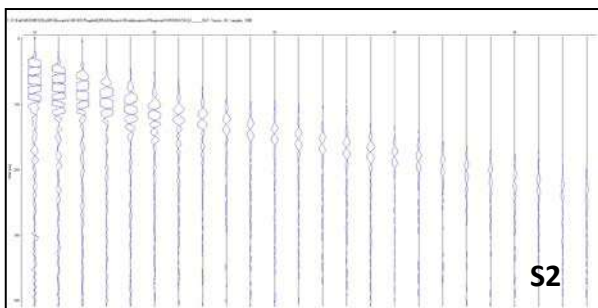
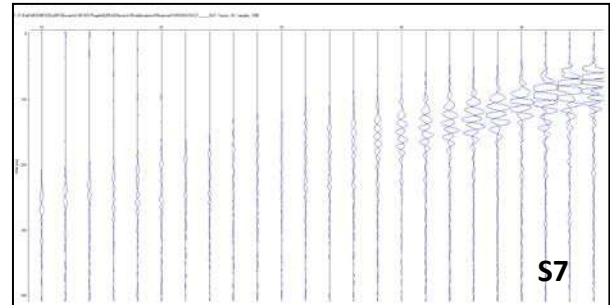
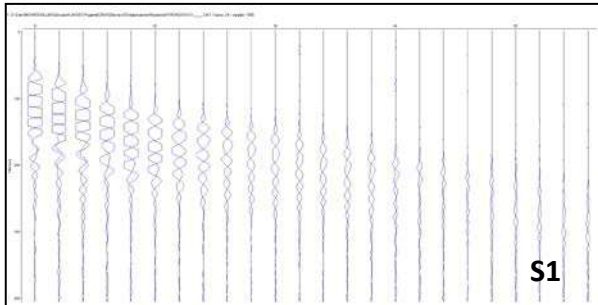


Di seguito si riportano le elaborazioni con il metodo tomografico, gli andamenti dei raggi e i punti delle dromocrone sintetiche confrontati con le dromocrone sperimentali:



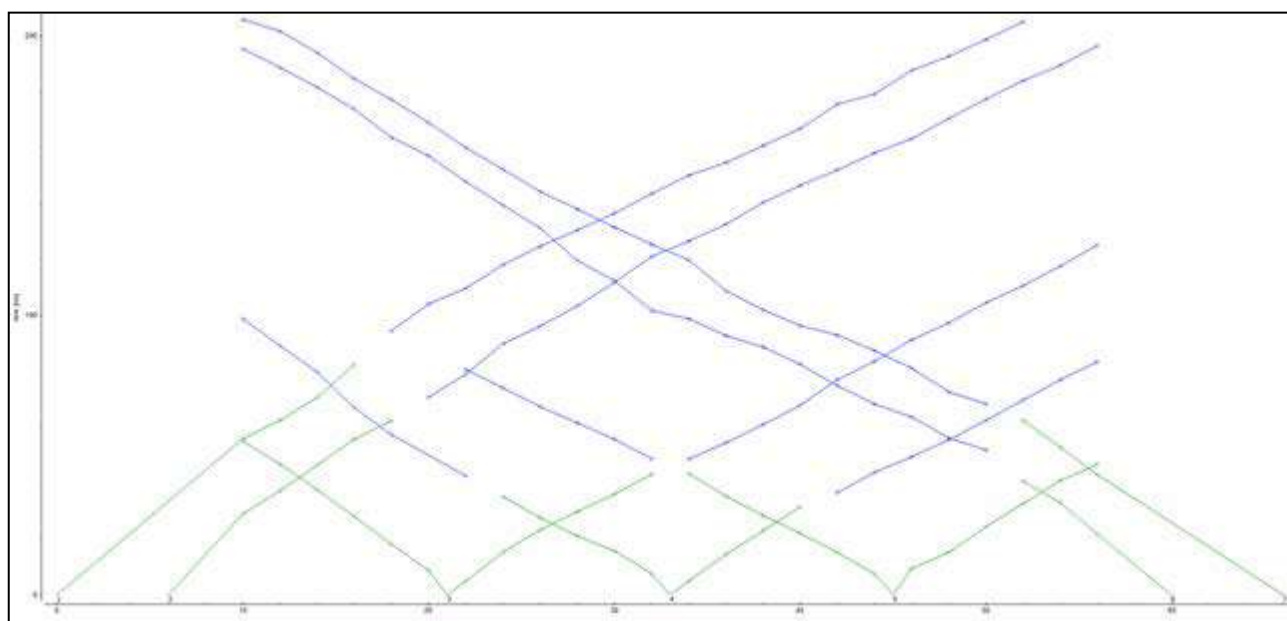
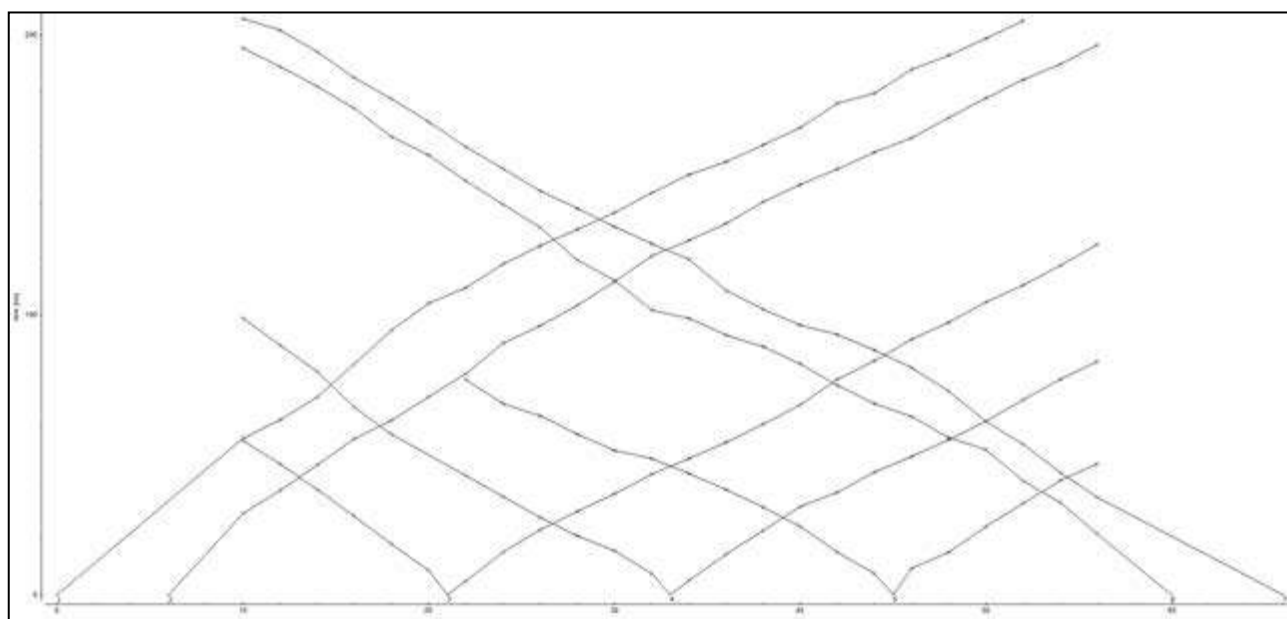
## 6.2 RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE SH

Di seguito si riporta, per ciascun punto di energizzazione, l'assemblaggio delle acquisizioni a polarità diretta e inversa:

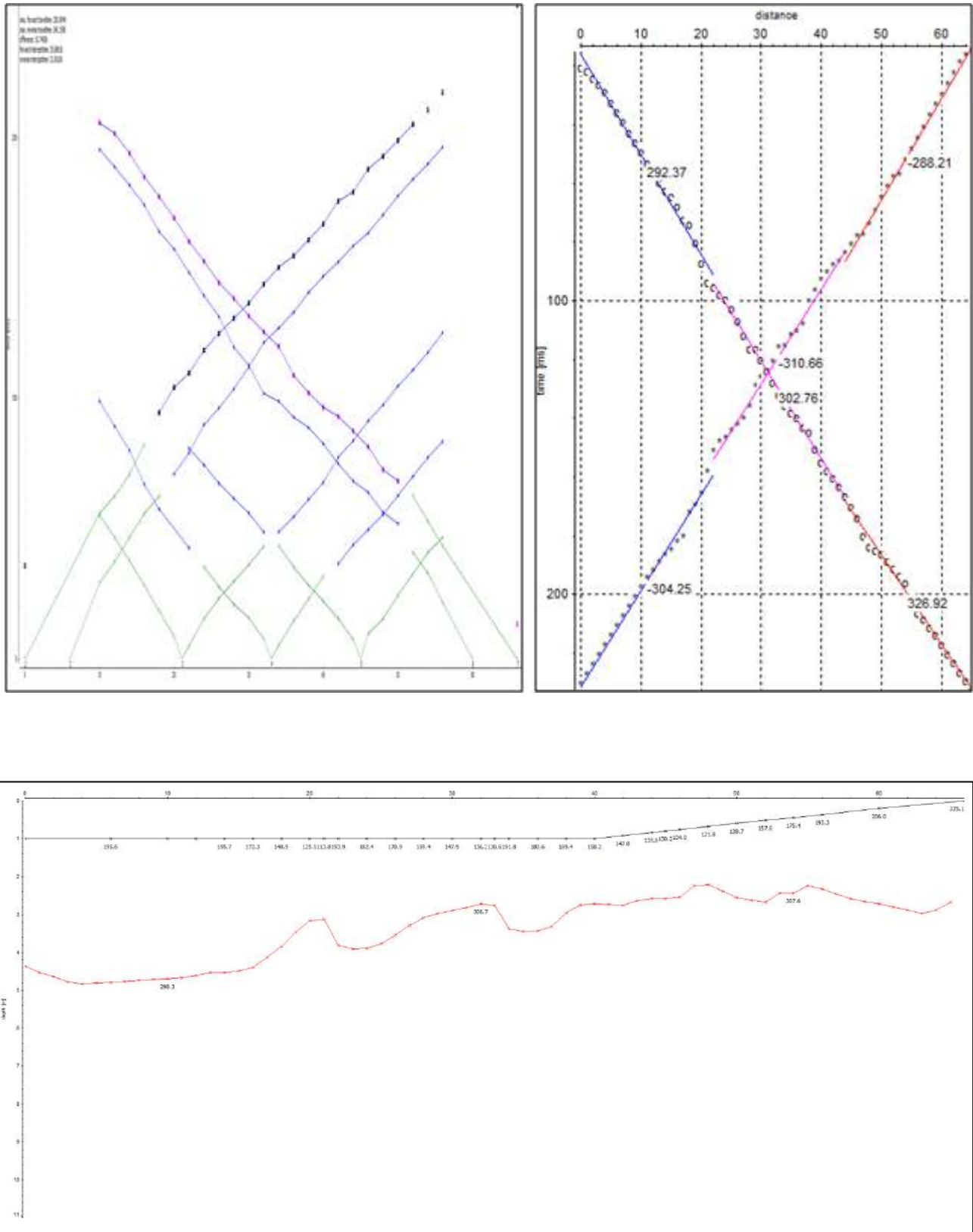




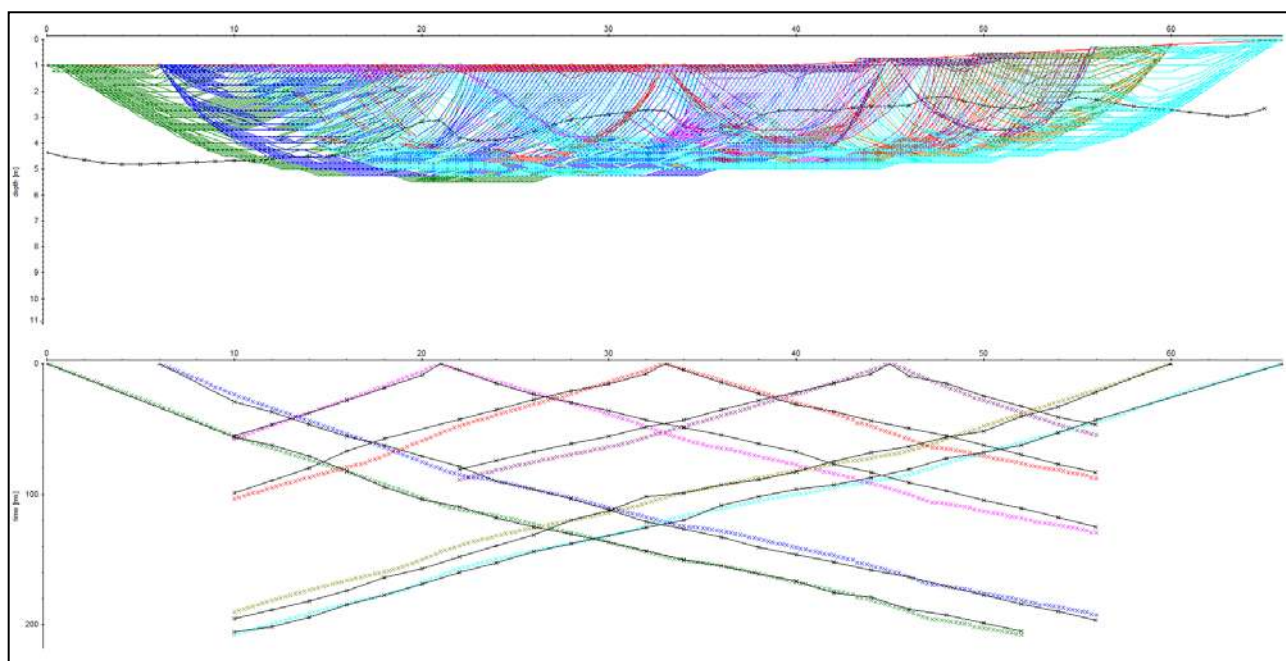
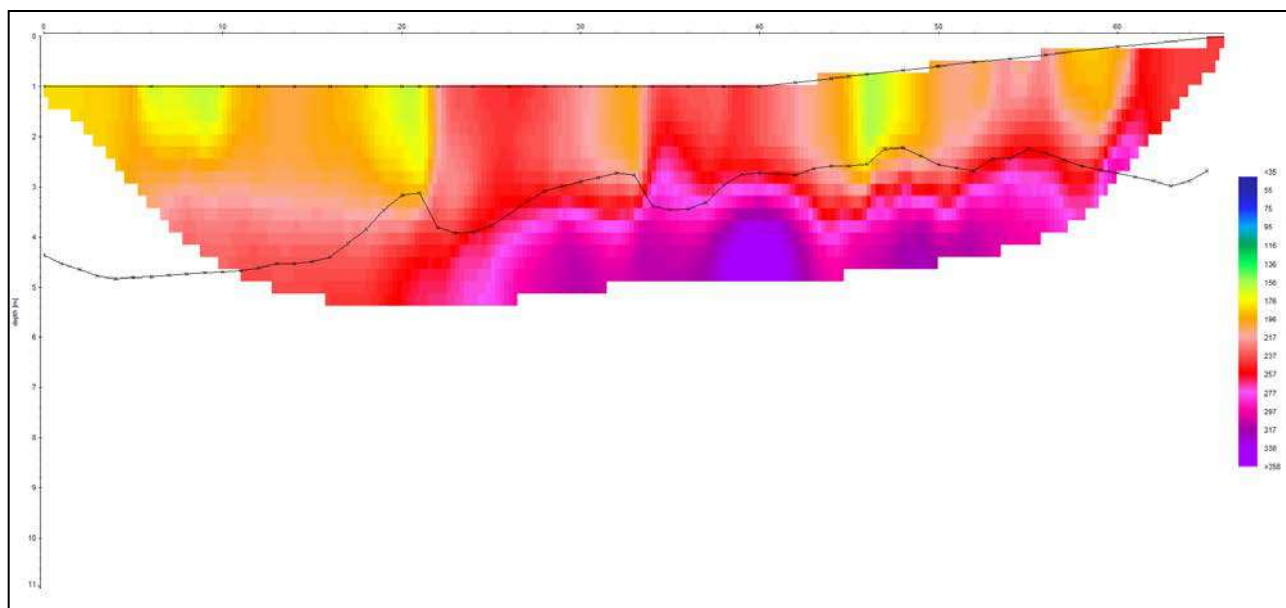
Di seguito sono riportate le dromocrone e le relative assegnazioni:



Di seguito si riportano le elaborazioni condotte con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D:



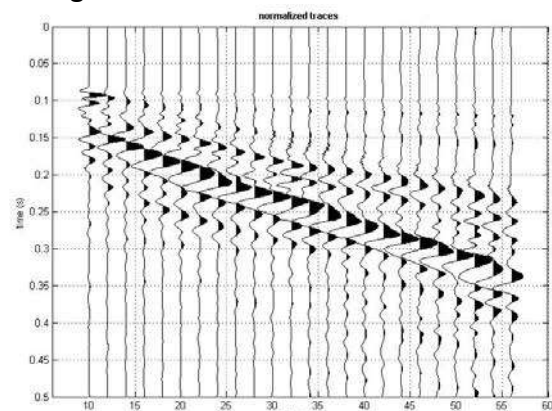
Di seguito si riportano le elaborazioni con il metodo tomografico, gli andamenti dei raggi e i punti delle dromocrone sintetiche confrontati con le dromocrone sperimentali:



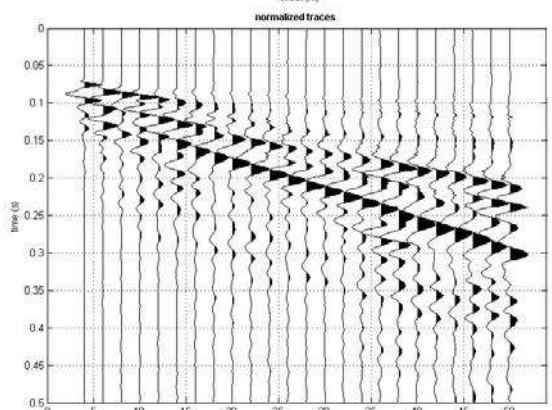
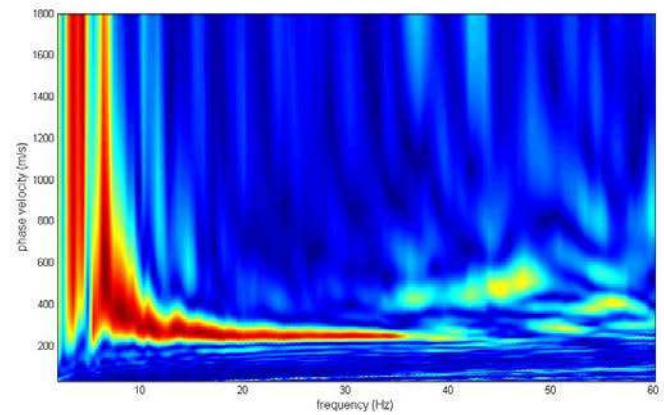


### 6.3 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE ZVF

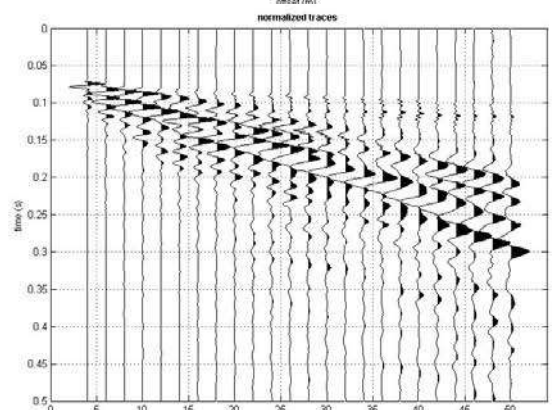
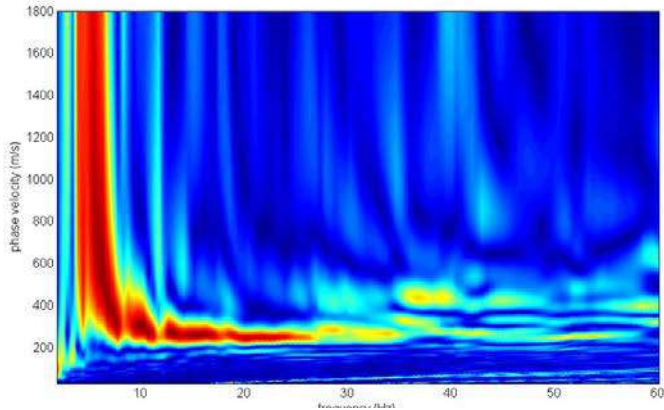
Di seguito sono riportati gli spettri  $f$ - $V_f$  (frequenza-velocità di fase) di ciascuna acquisizione coniugata:



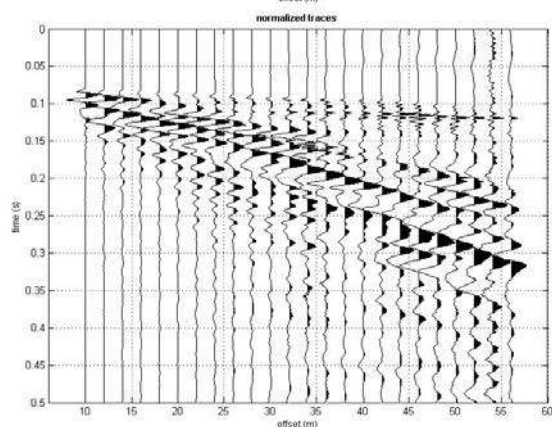
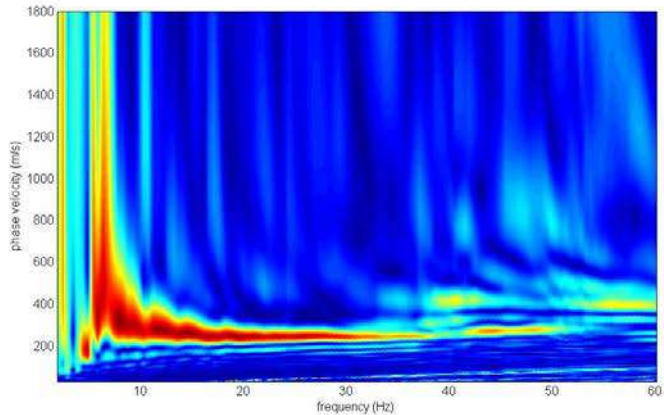
S1



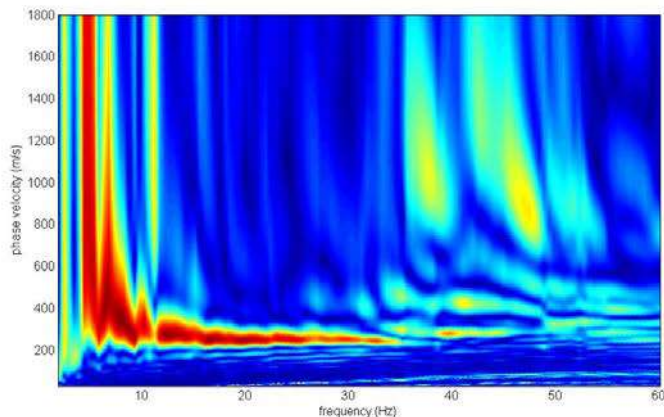
S2



S6

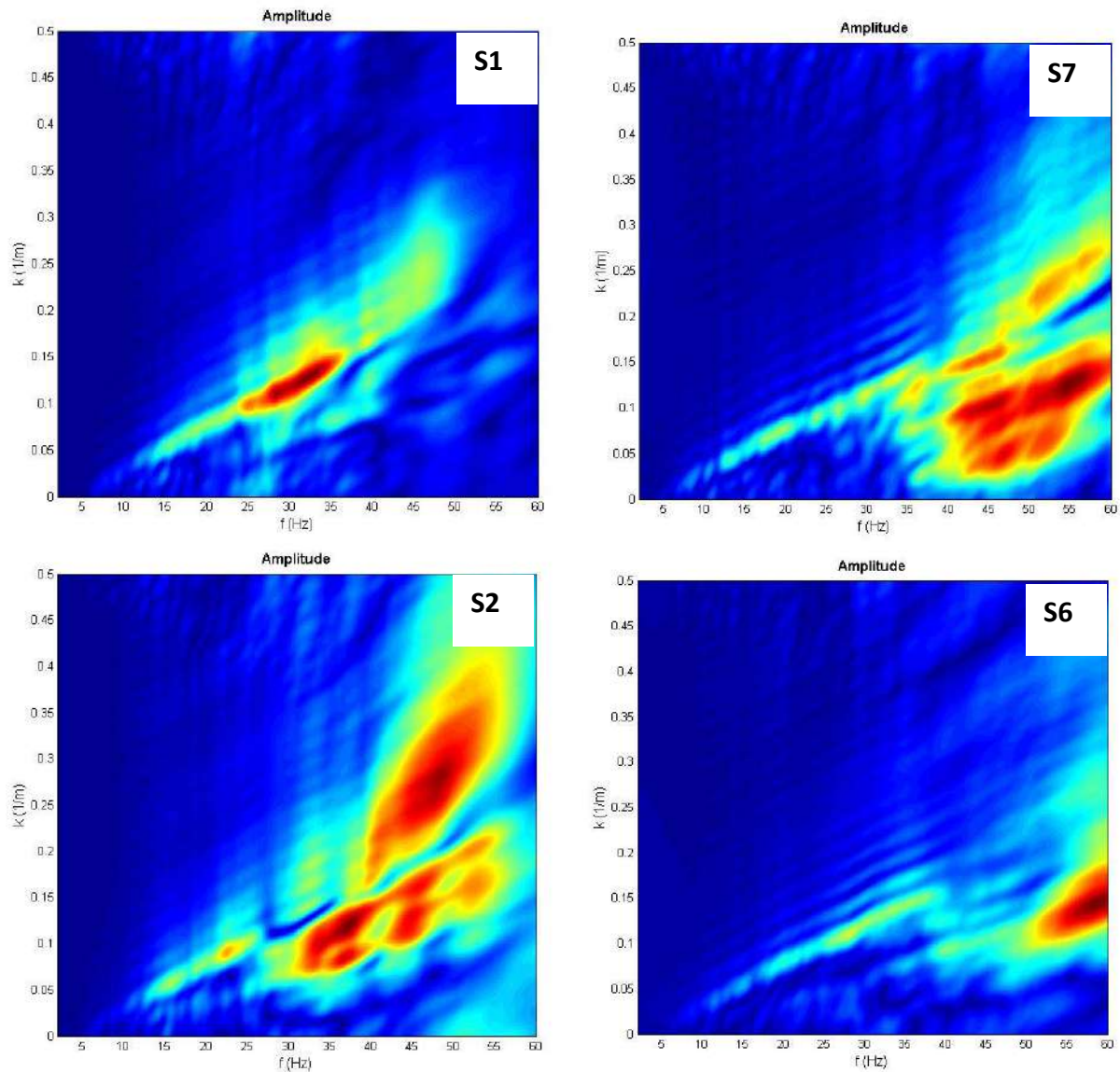


S7

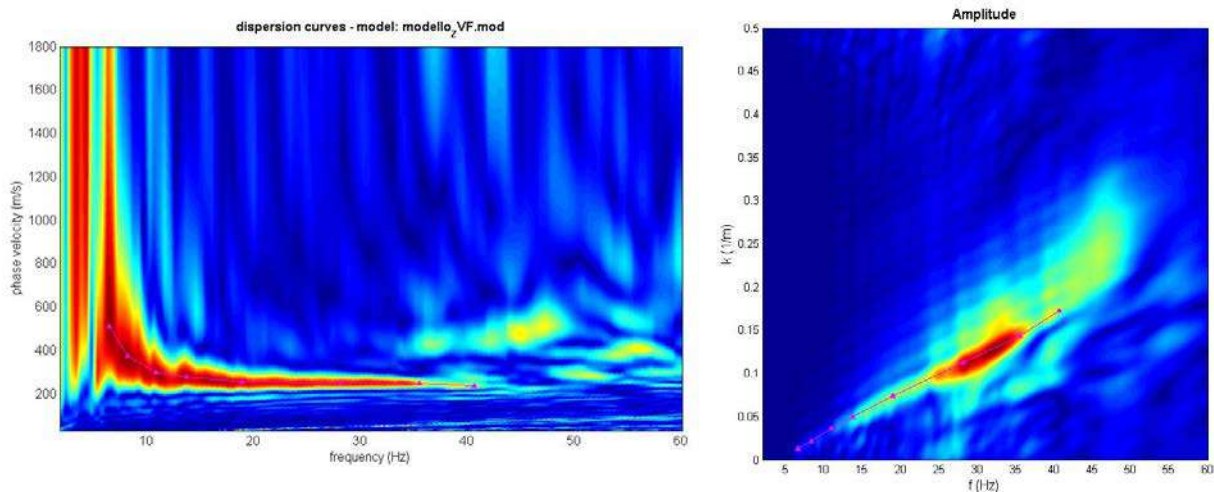




Di seguito si riportano le stesse acquisizioni elaborate nel dominio f-k:

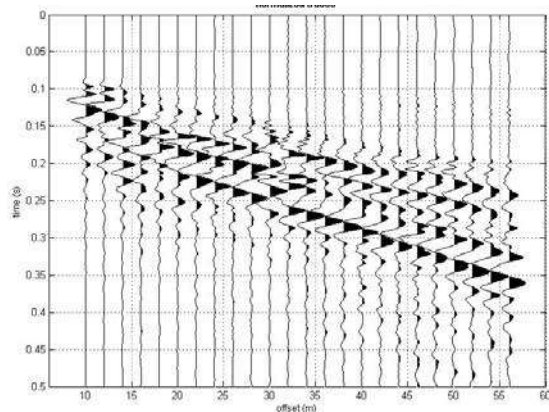


L'acquisizione S1 è considerata la migliore in termini di definizione del modo fondamentale della componente verticale dell'Onda di Rayleigh e pertanto è stata scelta per eseguire il picking:

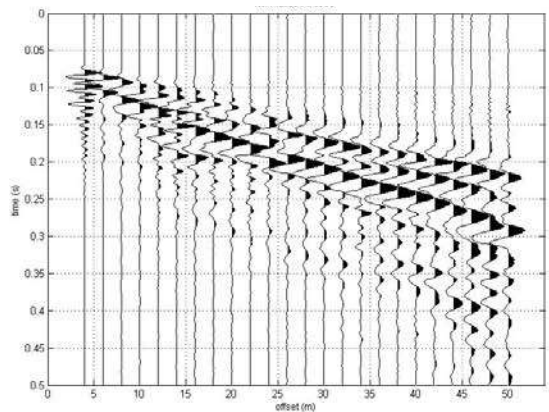
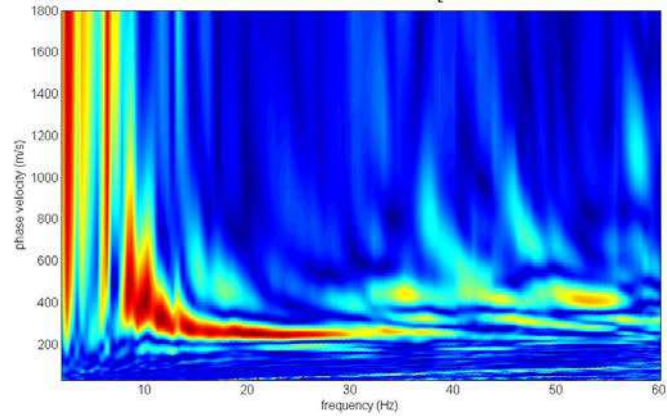


## 6.4 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE RVF

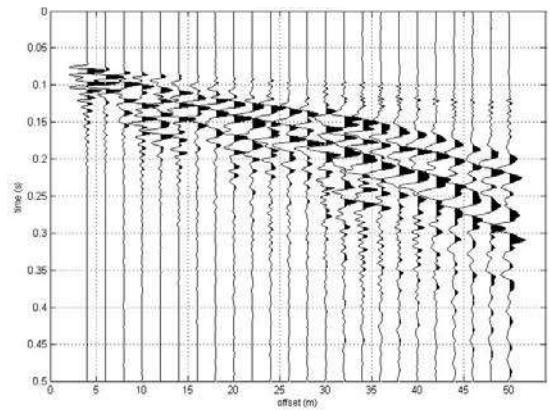
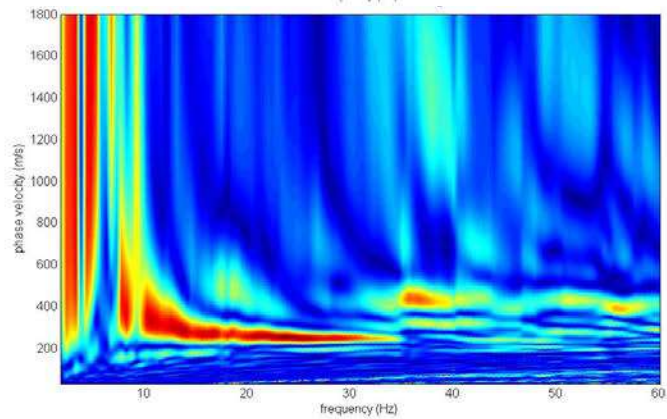
Di seguito sono riportati gli spettri  $f$ - $V_f$  (frequenza-velocità di fase) di ciascuna acquisizione coniugata:



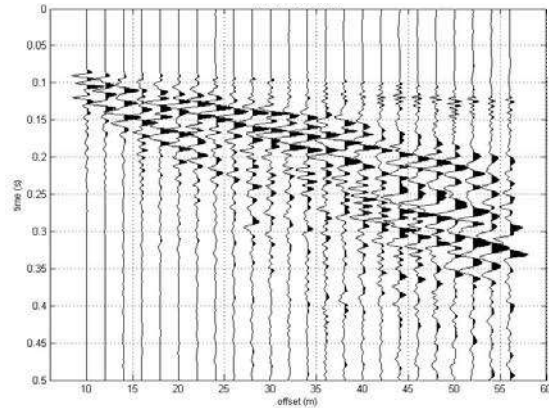
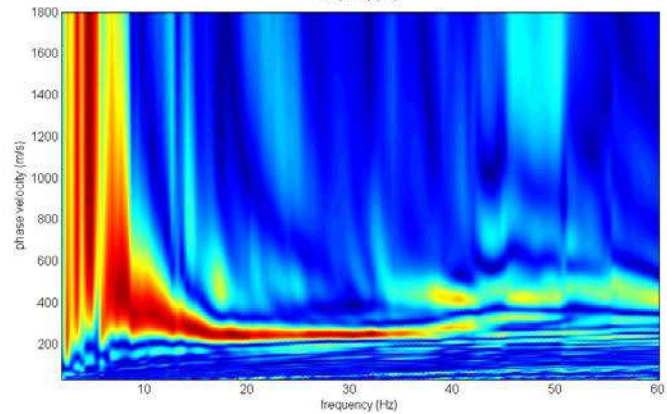
S1



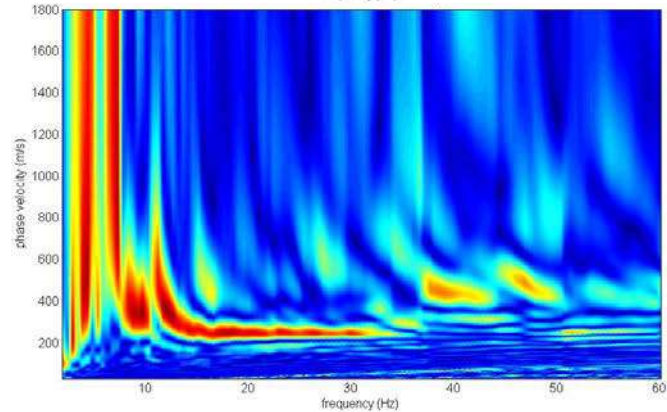
S2



S6

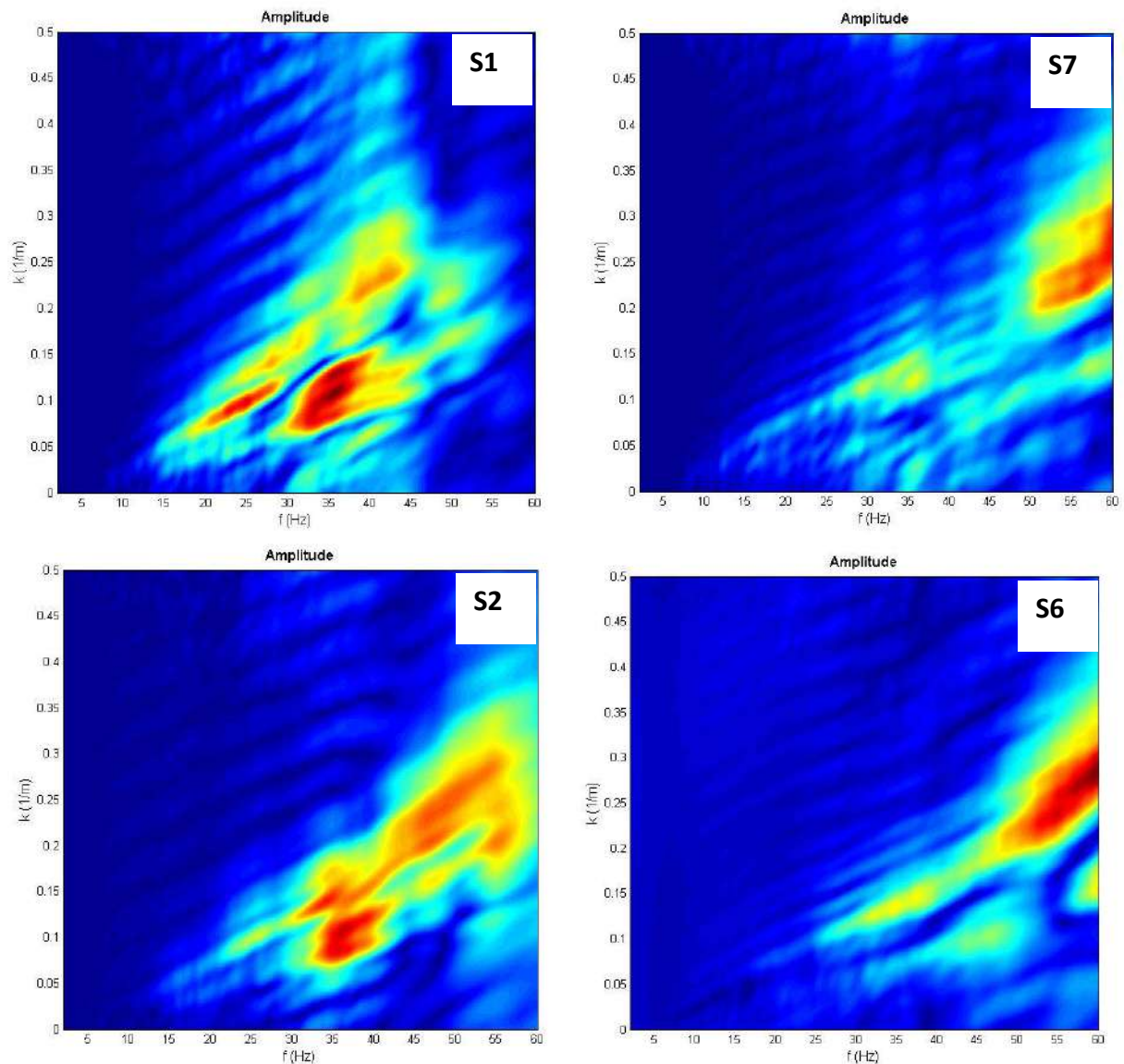


S7

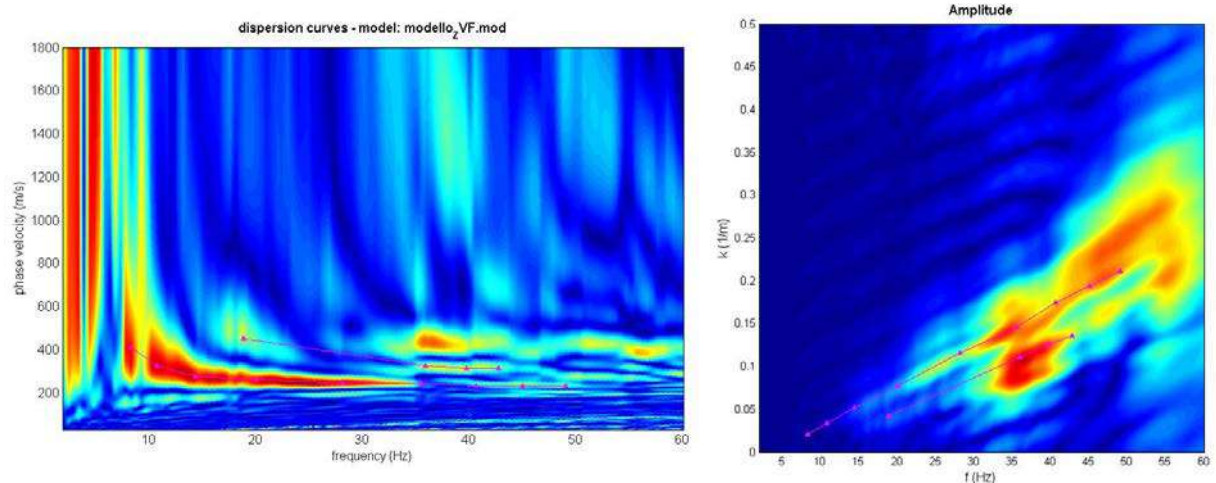




Di seguito si riportano le stesse acquisizioni elaborate nel dominio f-k:

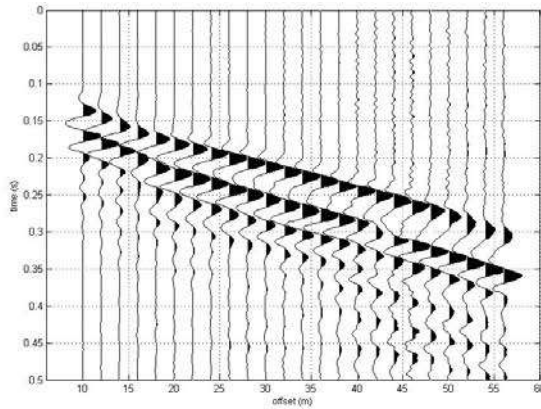


L'acquisizione S2 è considerata la migliore in termini di definizione del modo fondamentale e del primo modo superiore della componente radiale dell'Onda di Rayleigh e pertanto è stata scelta per eseguire il picking:

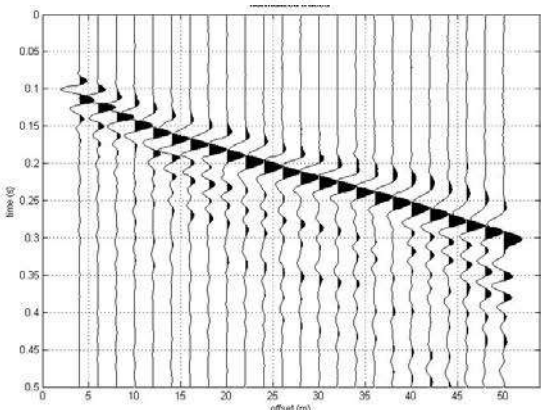
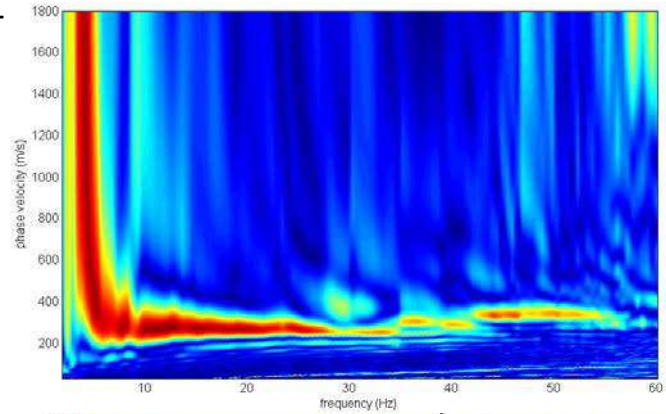


## 6.5 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE THF

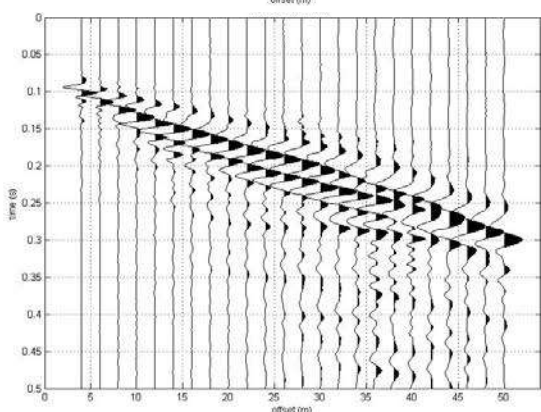
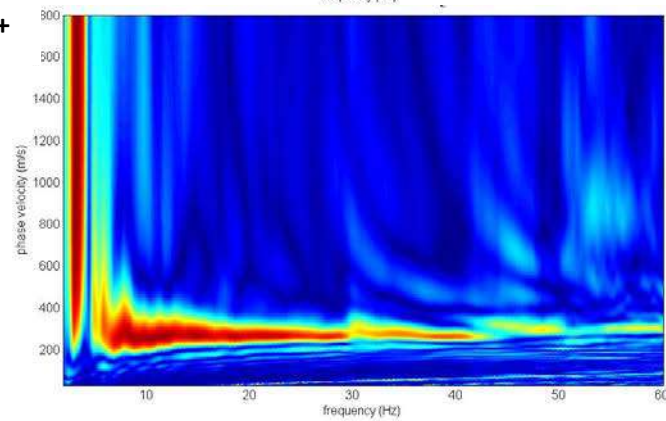
Di seguito sono riportati gli spettri f-Vf (frequenza-velocità di fase) delle acquisizioni coniugate, scelte tra le migliori energizzazioni eseguite a diversa polarità:



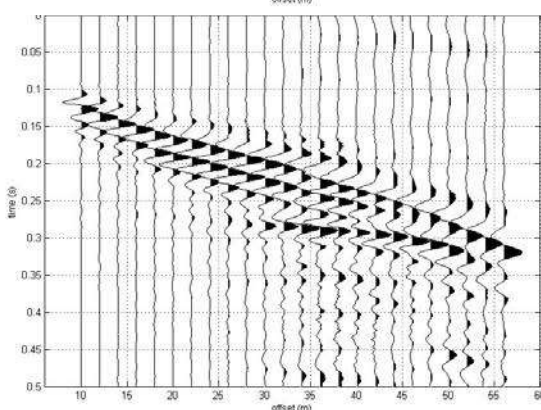
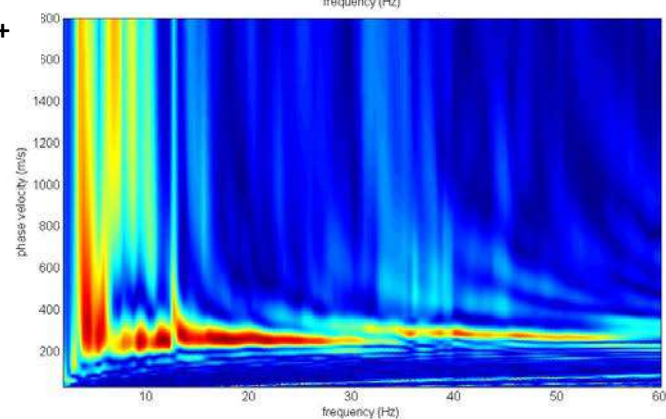
S1-



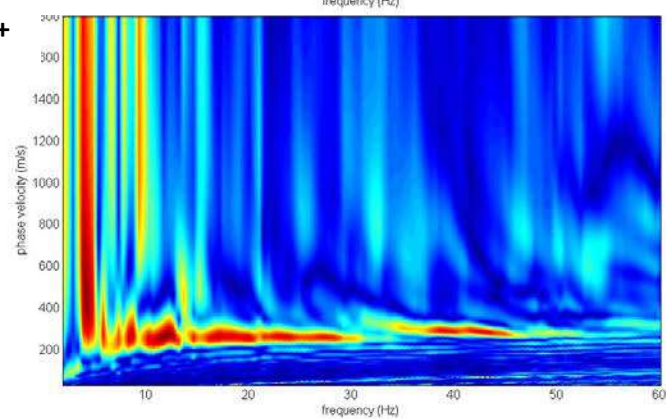
S2+



S5+

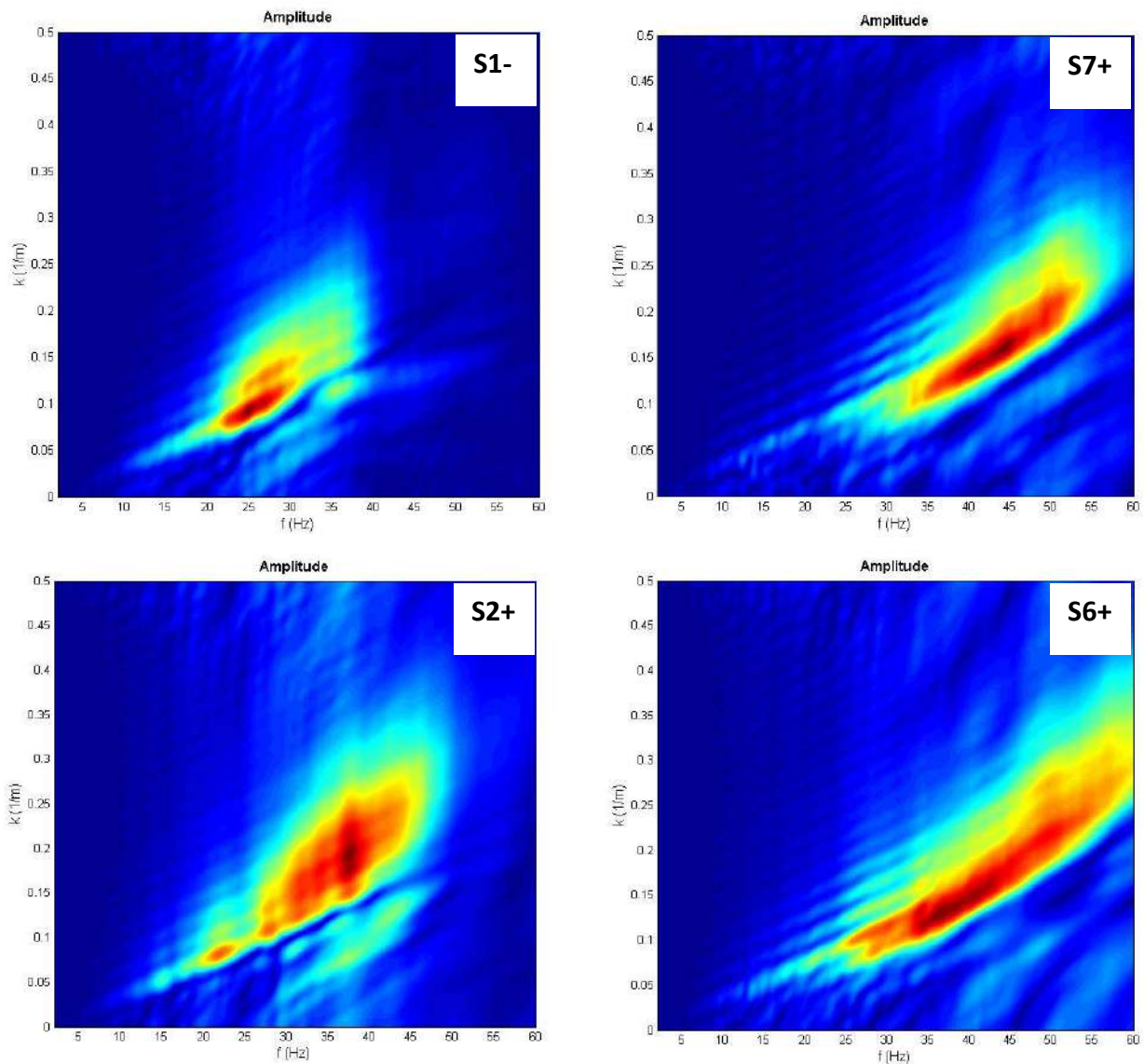


S6+

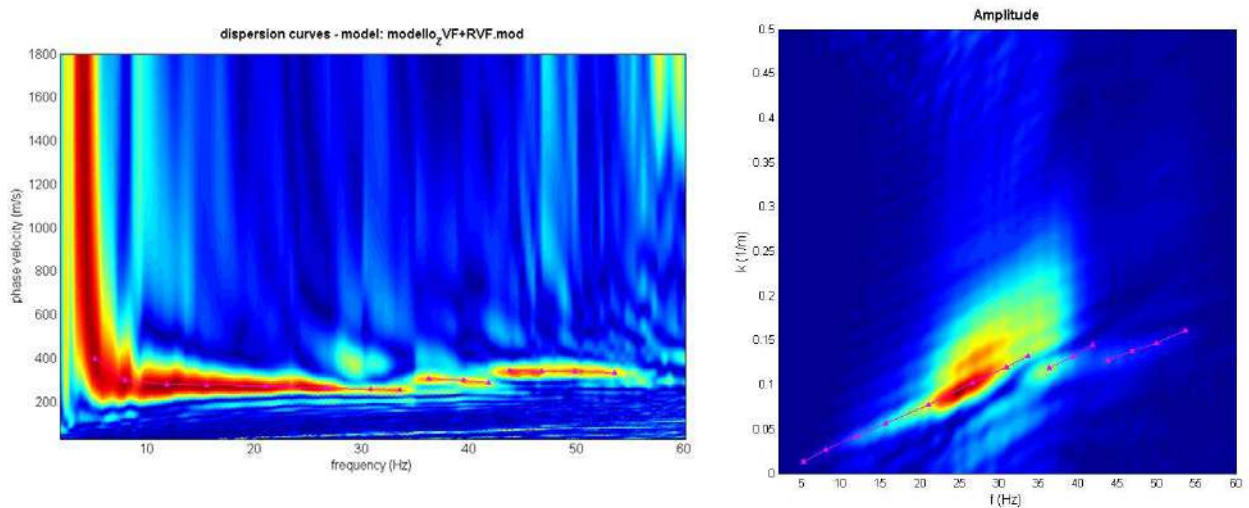




Di seguito si riportano le stesse acquisizioni elaborate nel dominio f-k:

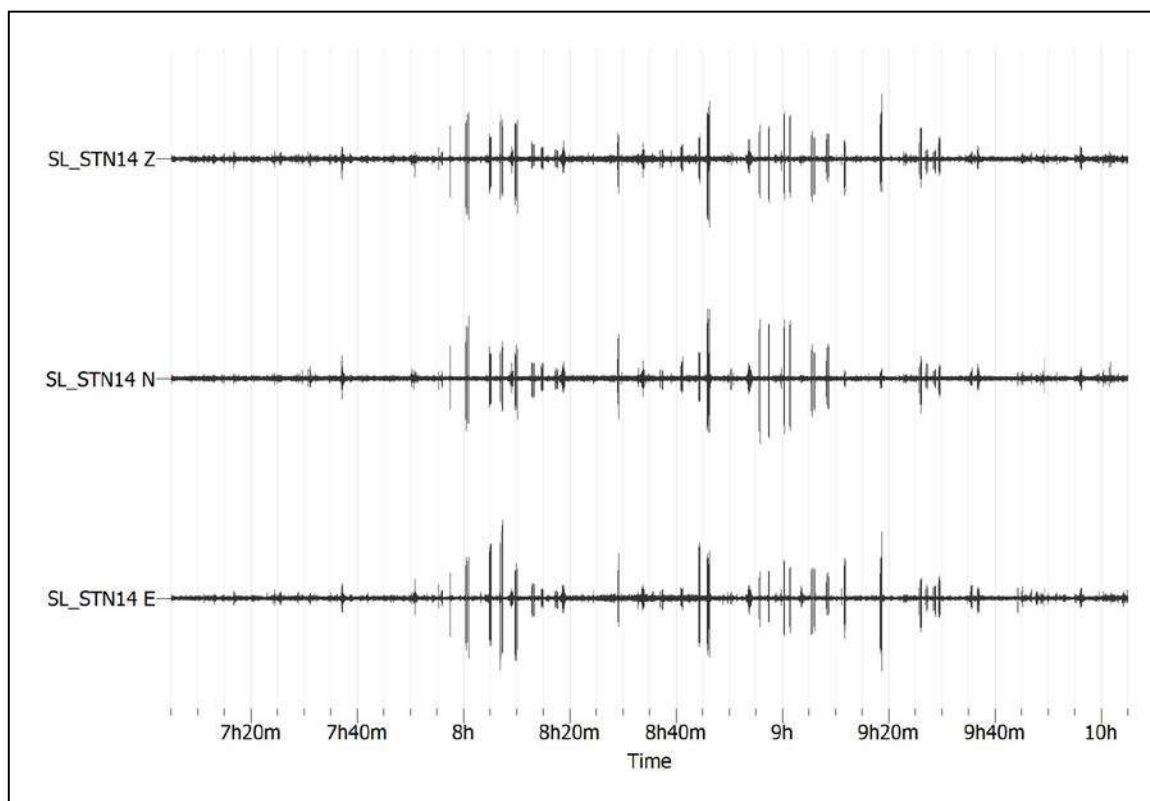


L'acquisizione S1- è considerata la migliore in termini di definizione del modo fondamentale e dei primi due modi superiori dell'Onda di Love e pertanto è stata scelta per eseguire il picking:

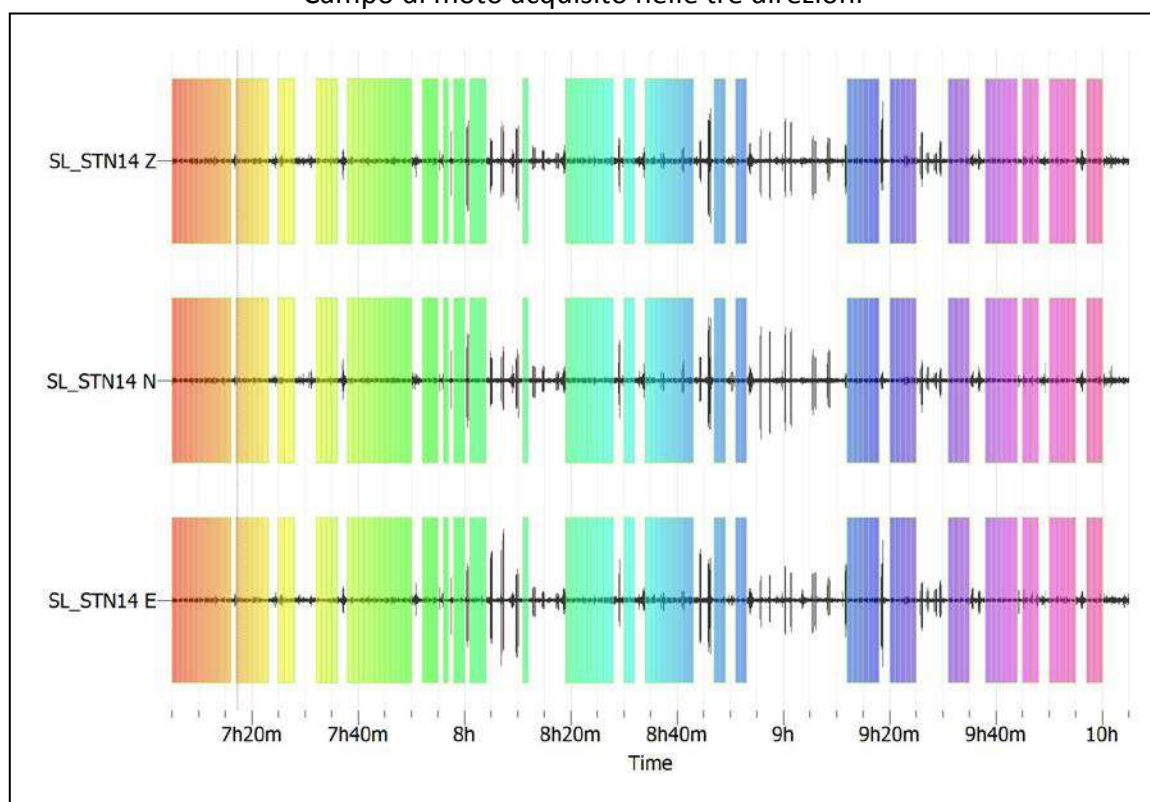


## 6.6 RISULTATI INDAGINE PUNTUALE HVSR

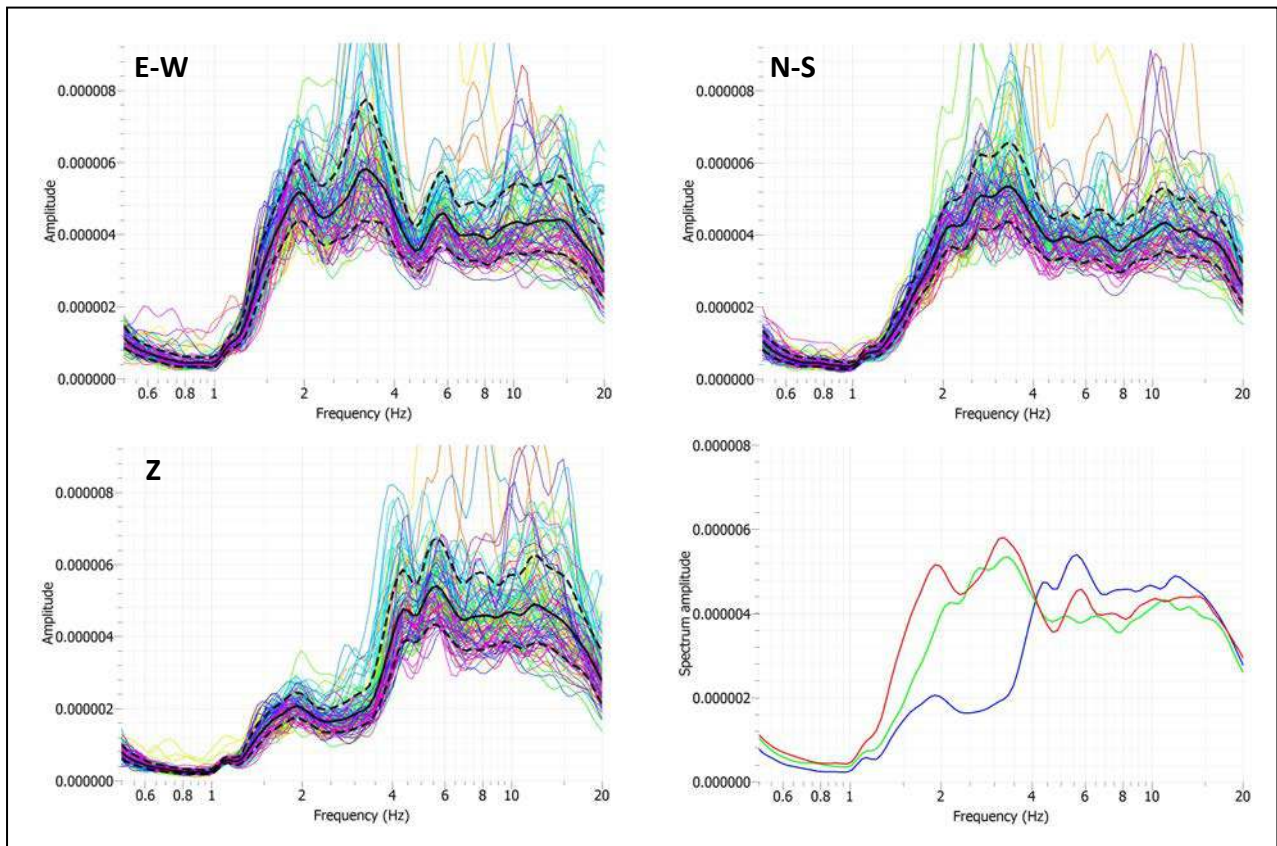
Di seguito si riportano le elaborazioni e i risultati dell'acquisizione a stazione singola.



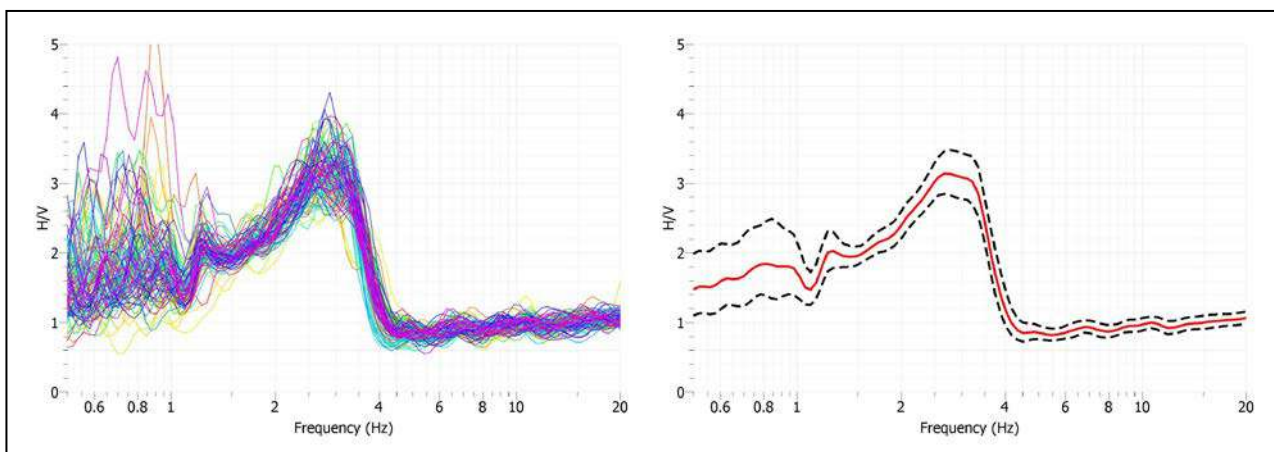
Campo di moto acquisito nelle tre direzioni



Rimozione transienti e fenestrazione del segnale utile  
(numero 102 finestre di lunghezza 60 s senza sovrapposizione)



Spettri di ampiezza calcolati per ciascuna finestra e per ciascuna componente: in basso a destra gli spettri di ampiezza medi di ciascuna componente (E-W: Rossa – N-S: Verde – Z: Blu)



Curve HV calcolate per ciascuna finestra di elaborazione (a sinistra) e curva HV media e relativa deviazione standard (a destra)



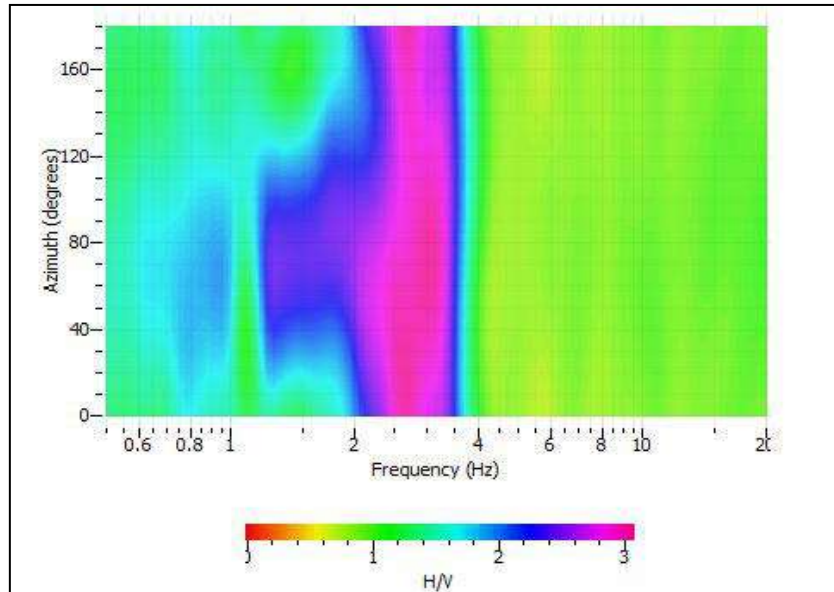
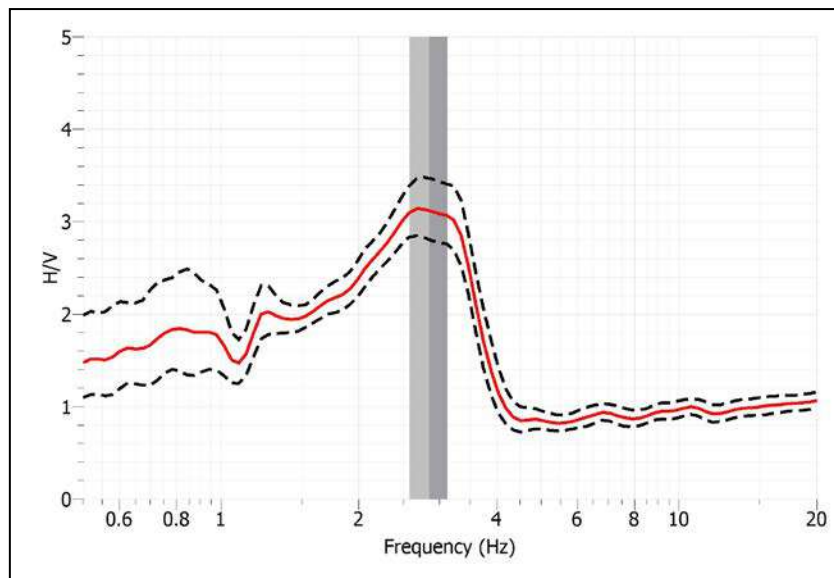


Grafico di direzionalità della curva HV



Picco H/V 2.8 Hz $\pm$ 0.2			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10/Lw$	2.85	$> 0.167$	OK
$n_c(f_0) > 200$	17442	$> 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	$f_0 > 0.5\text{Hz}$	SI	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	$f_0 < 0.5\text{Hz}$	NO	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste $f$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK
Esiste $f^*$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$			OK
$A_0 > 2$	3.12	$> 2$	OK
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.05	$< 0.05$	OK
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	0.271	$< 0.142$	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.112	$< 1.580$	OK

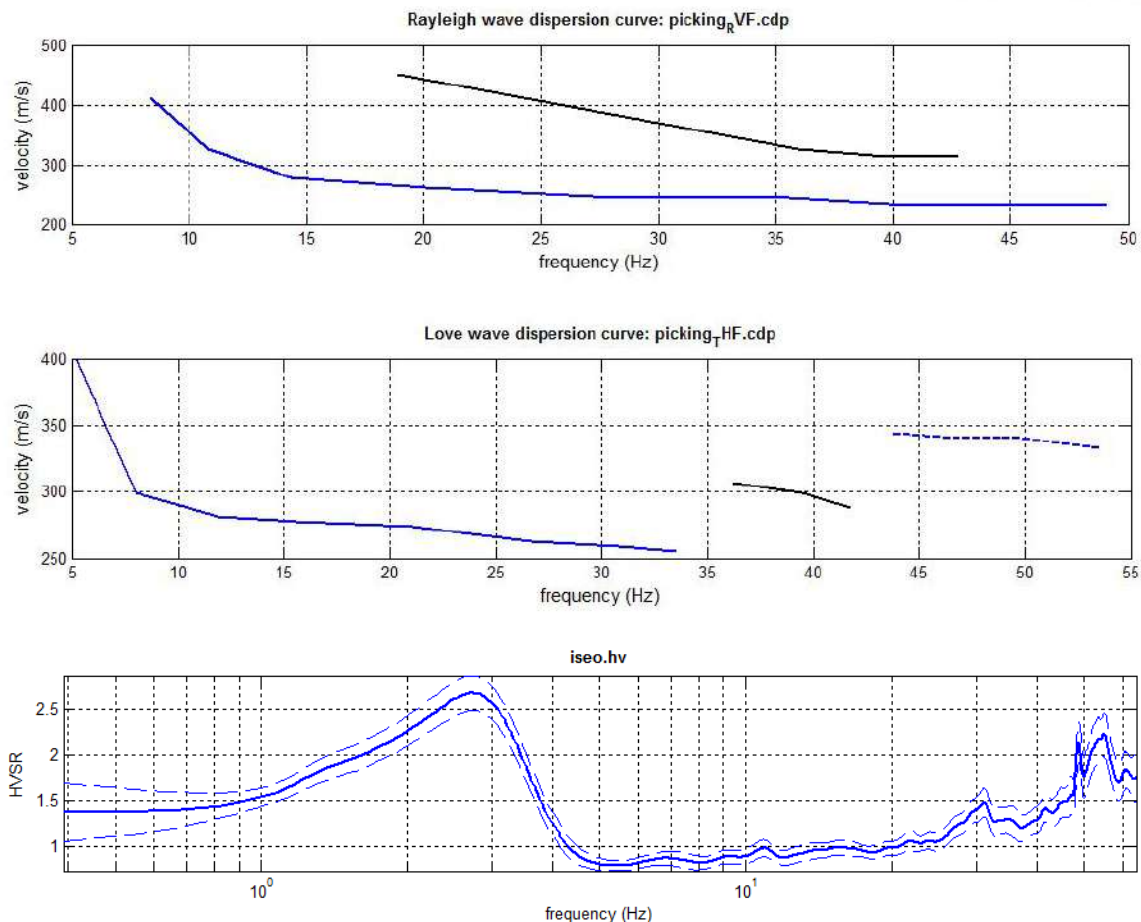
Criteri Sesame, 2004 per la valutazione dell'affidabilità statistica della curva HV e della chiarezza dei picchi di risonanza individuati

## 7. Interpretazione

Dai risultati ottenuti dall'indagine di sismica superficiale combinata eseguita nel sito si dispone dei seguenti dati sperimentali:

- curva di dispersione del modo fondamentale dell'Onda di Rayleigh e del primo modo superiore (derivati dalle acquisizioni in configurazione ZVF e RVF);
- curva di dispersione del modo fondamentale dell'Onda di Love e dei primi due modi superiori (derivati dalle acquisizioni in configurazione THF);
- andamento delle interfacce elastiche in termini di onde longitudinali e trasversali nei primi 10 m di profondità (derivate dalla sismica a rifrazione);
- curva HV con individuazione del picco di interesse stratigrafico alla frequenza di 2.8 Hz, ritenuto affidabile statisticamente e chiaro morfologicamente in base ai criteri Sesame, 2004.

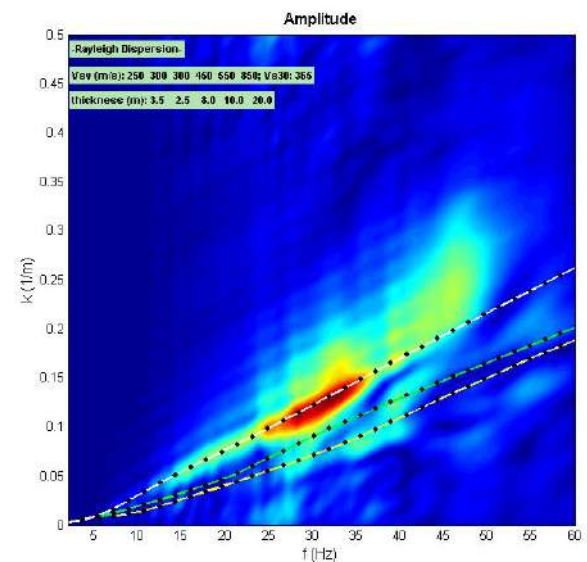
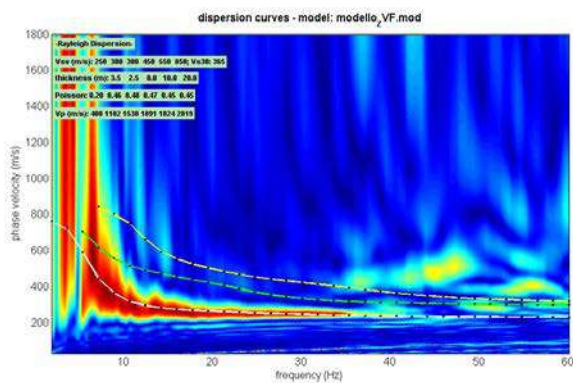
Di seguito si riportano i dati sperimentali acquisiti a seguito del processo di elaborazione descritto nei capitoli precedenti:



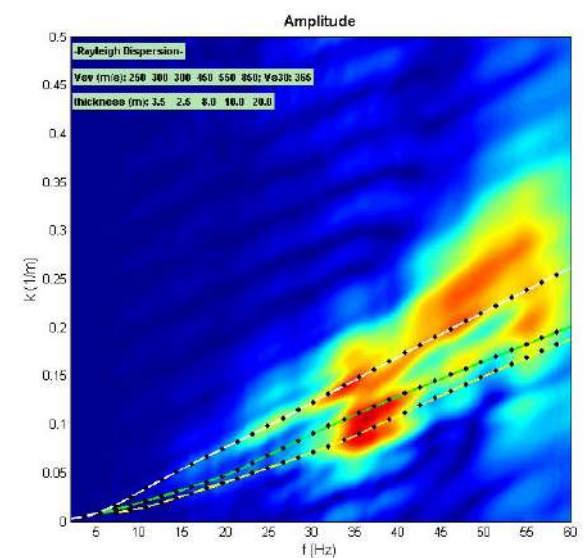
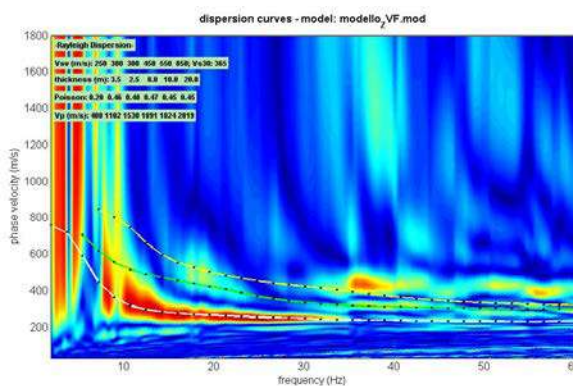
Sulla base dei risultati di sismica a rifrazione in onde P e SH e del modello geologico dell'area è stato prefissato un modello preliminare di sottosuolo, verificandone la validità tramite procedura diretta, calcolando le curve di dispersione numeriche del modo fondamentale e dei primi due modi superiori dell'Onda di Rayleigh (ZVF-RVF) e dell'Onda di Love (THF):

Unità	Modello preliminare ZVF			
	S (m)	V <sub>S</sub> (m/s)	V <sub>P</sub> (m/s)	$\nu$ (-)
U1	3.5	250	408	0.20
U2	2.5	300	1102	0.46
U3	8.0	300	1530	0.48
U4	10.0	450	1891	0.47
U5	20.0	550	1824	0.45
U6	-	850	2819	0.45

### Configurazione ZVF

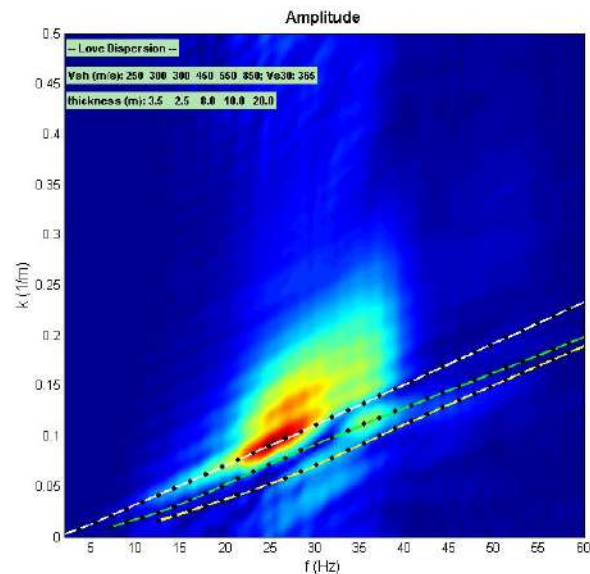
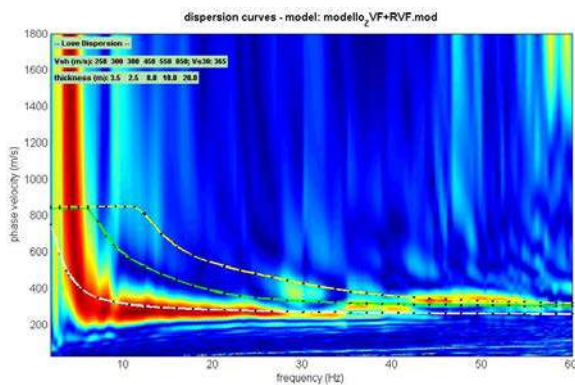


### Configurazione RVF

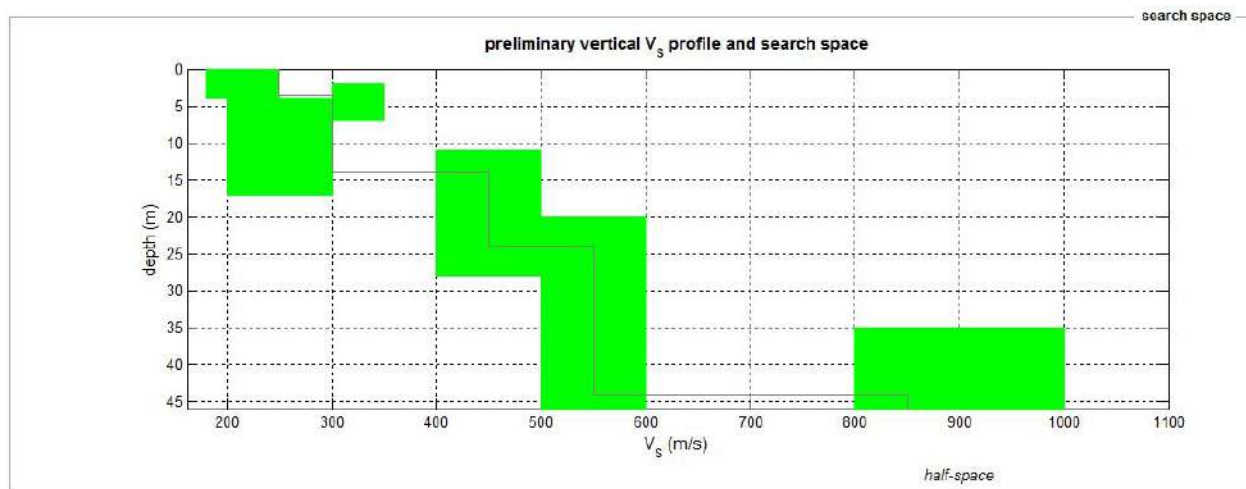




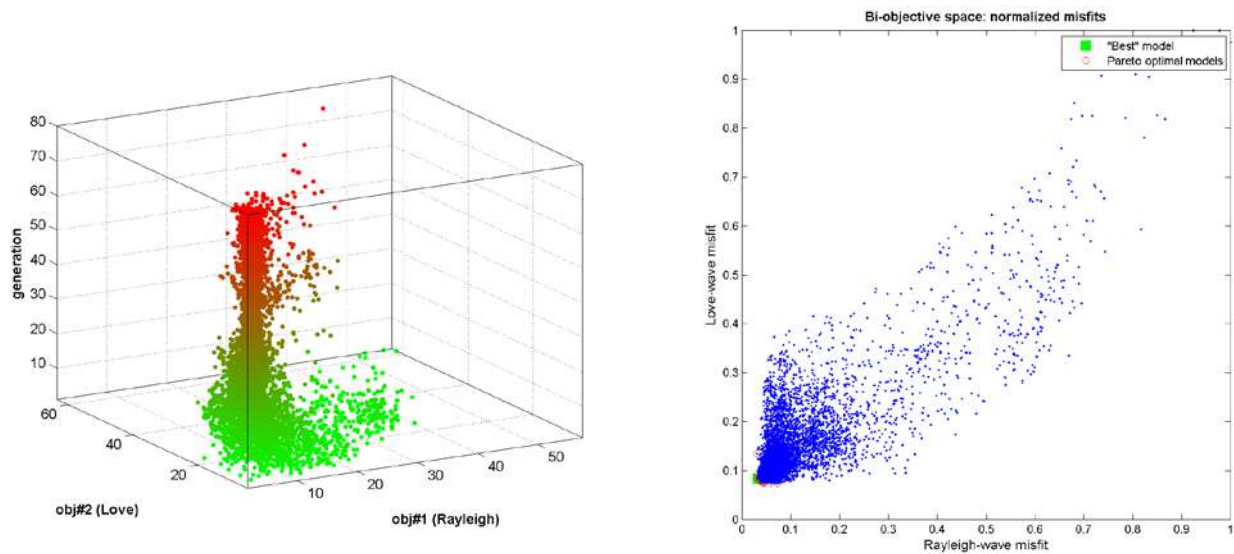
### Configurazione THF



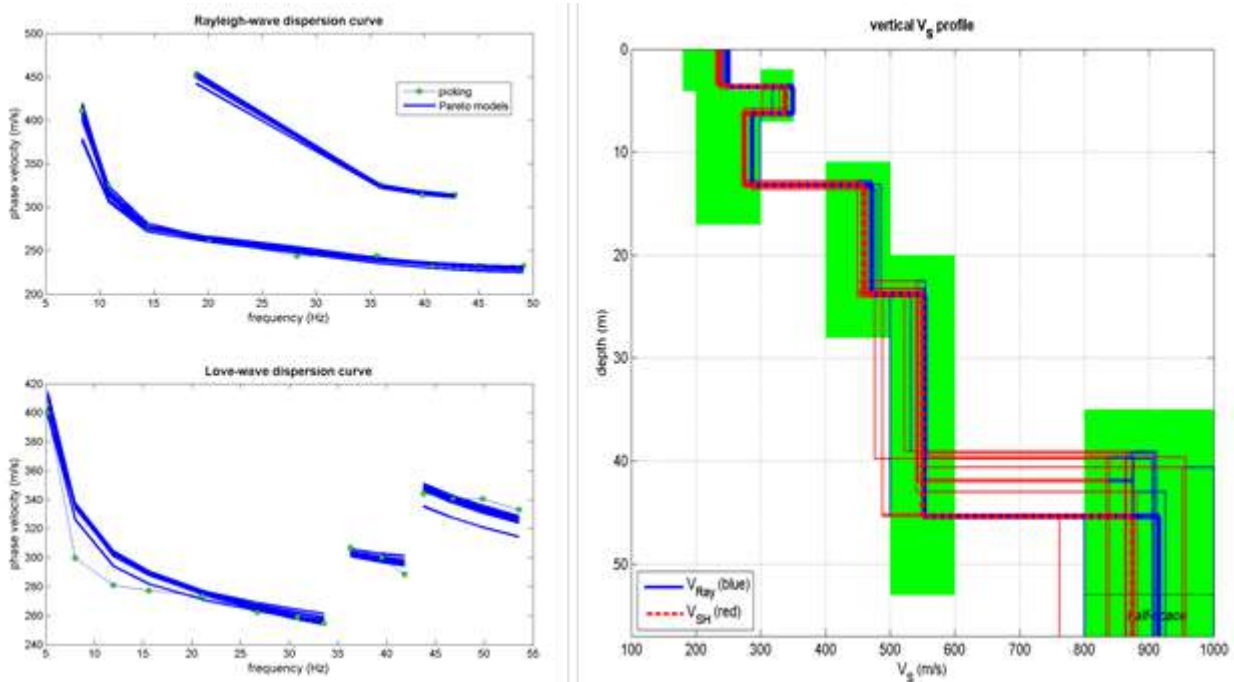
Il modello preliminare individuato rappresenta il modello di partenza assegnato al processo d'inversione automatico congiunto, eseguito considerando come target di riferimento le curve di dispersione del modo fondamentale e dei modi superiori delle Onde di Rayleigh e di Love ed assegnando il seguente campo di ricerca:



Durante il processo d'inversione sono stati generati diversi modelli di rigidezza del sottosuolo, caratterizzati da proprietà dispersive delle Onde di Rayleigh e di Love simili a quelle sperimentalmente osservate; i diversi modelli possiedono un diverso grado di scostamento (misfit) bidimensionale in relazione ai due target di riferimento; attraverso l'analisi di Pareto sono stati analizzati statisticamente tutti i modelli considerati, al fine di identificare le soluzioni con minor misfit relativo, utilizzate per determinare il modello di rigidezza medio del sottosuolo, e la soluzione con minor misfit in assoluto (modello migliore).



Di seguito si riportano gli esiti del processo d'inversione automatica congiunta:

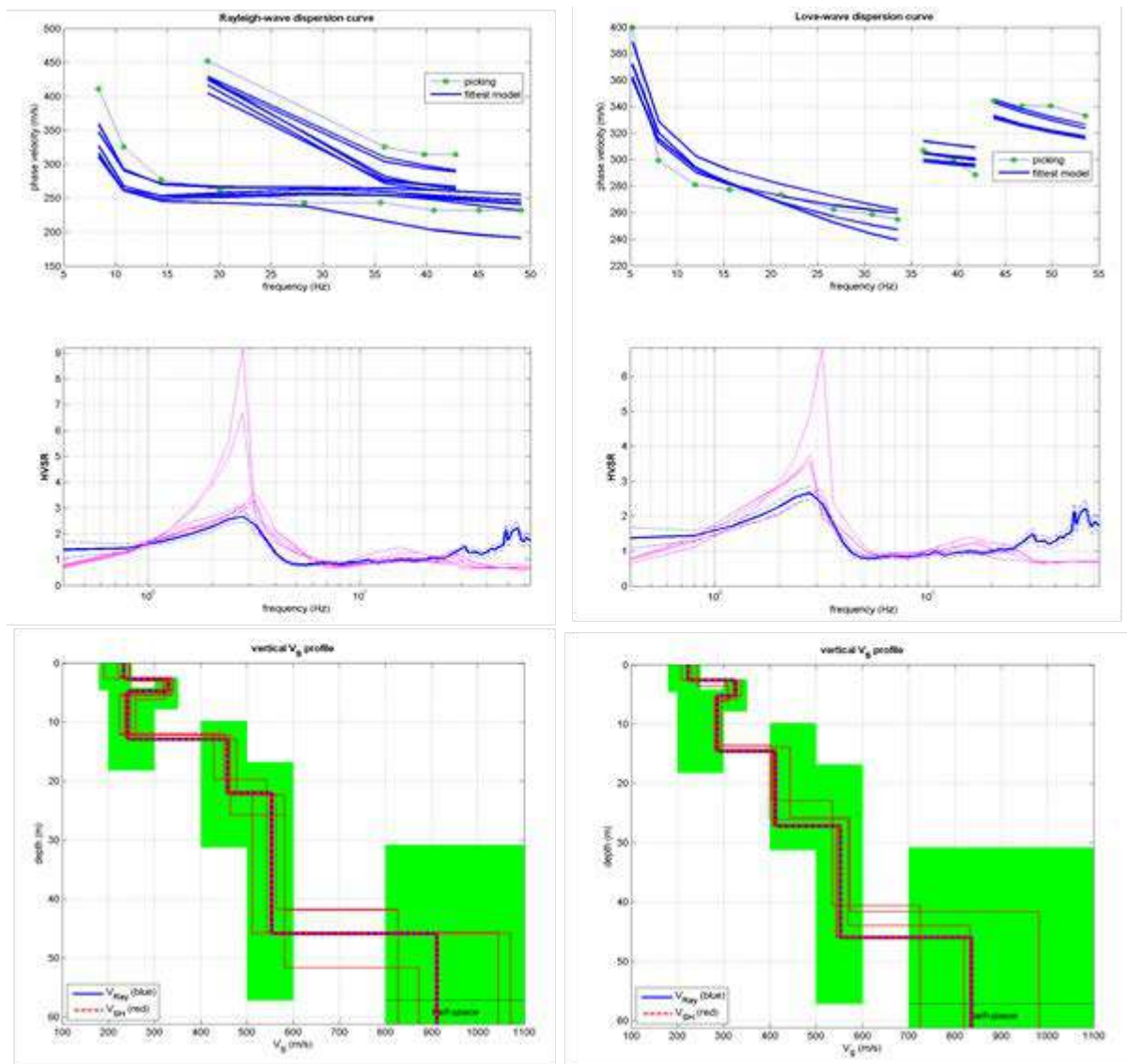


Il modello medio calcolato secondo l'operazione statistica MPPD (Dal Moro et al., 2006) e il modello migliore in termini di discrepanza tra dati sperimentali e soluzioni numeriche mono-dimensionali sono riportate nelle tabelle seguenti, ove  $S$ ,  $V_{sv}$  e  $V_{sh}$  indicano rispettivamente il valore di spessore e la velocità delle onde  $S$  nel piano verticale e orizzontale di ciascun sismostato considerato:

Unità	Rigidezza piano verticale				Rigidezza piano orizzontale			
	Modello medio		Modello migliore		Modello medio		Modello migliore	
	S (m)	$V_{Sv}$ (m/s)	S (m)	$V_{Sv}$ (m/s)	S (m)	$V_{Sh}$ (m/s)	S (m)	$V_{Sh}$ (m/s)
U1	3.5	246	3.7	250	3.5	235	3.7	238
U2	2.6	346	2.6	350	2.6	340	2.6	340
U3	7.1	287	7.0	287	7.1	275	7.0	274
U4	10.5	474	10.5	472	10.5	455	10.5	459
U5	18.0	540	21.6	553	18.0	529	21.6	551
U6	-	896	-	915	-	863	-	874

I risultati ottenuti dal processo d'inversione automatico congiunto sopra riportato sono stati integrati dai risultati di altri due processi d'inversioni automatica congiunta condotti separatamente, considerando congiuntamente la curva di dispersione dell'Onda di Rayleigh e la curva HVSR e la curva di dispersione dell'Onda di Love e la curva HVSR.

Di seguito si riportano gli esiti dei due processi d'inversione automatica congiunta:





Unità	Modello medio		Modello migliore	
	S (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)	S (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)
U1	2.6	234	2.5	248
U2	2.8	330	2.9	320
U3	7.0	242	6.7	224
U4	9.6	458	7.7	450
U5	23.4	554	25.9	542
U6	-	911	-	827

Modello medio		Modello migliore	
S (m)	V <sub>Sh</sub> (m/s)	S (m)	V <sub>Sh</sub> (m/s)
2.9	223	2.8	222
2.8	325	3.1	308
8.5	286	7.6	296
11.6	413	12.6	401
17.9	553	18.0	570
-	836	-	833

## 8. Considerazioni finali

L'indagine di sismica superficiale combinata ha permesso di individuare alcune tra le migliori soluzioni possibili al problema inverso della definizione del profilo di rigidità del sottosuolo da dati MASW e HVSr, il quale, risultando indeterminato, può prevedere infinite soluzioni.

In sintesi l'indagine di sismica superficiale combinata ha permesso di investigare i seguenti aspetti:

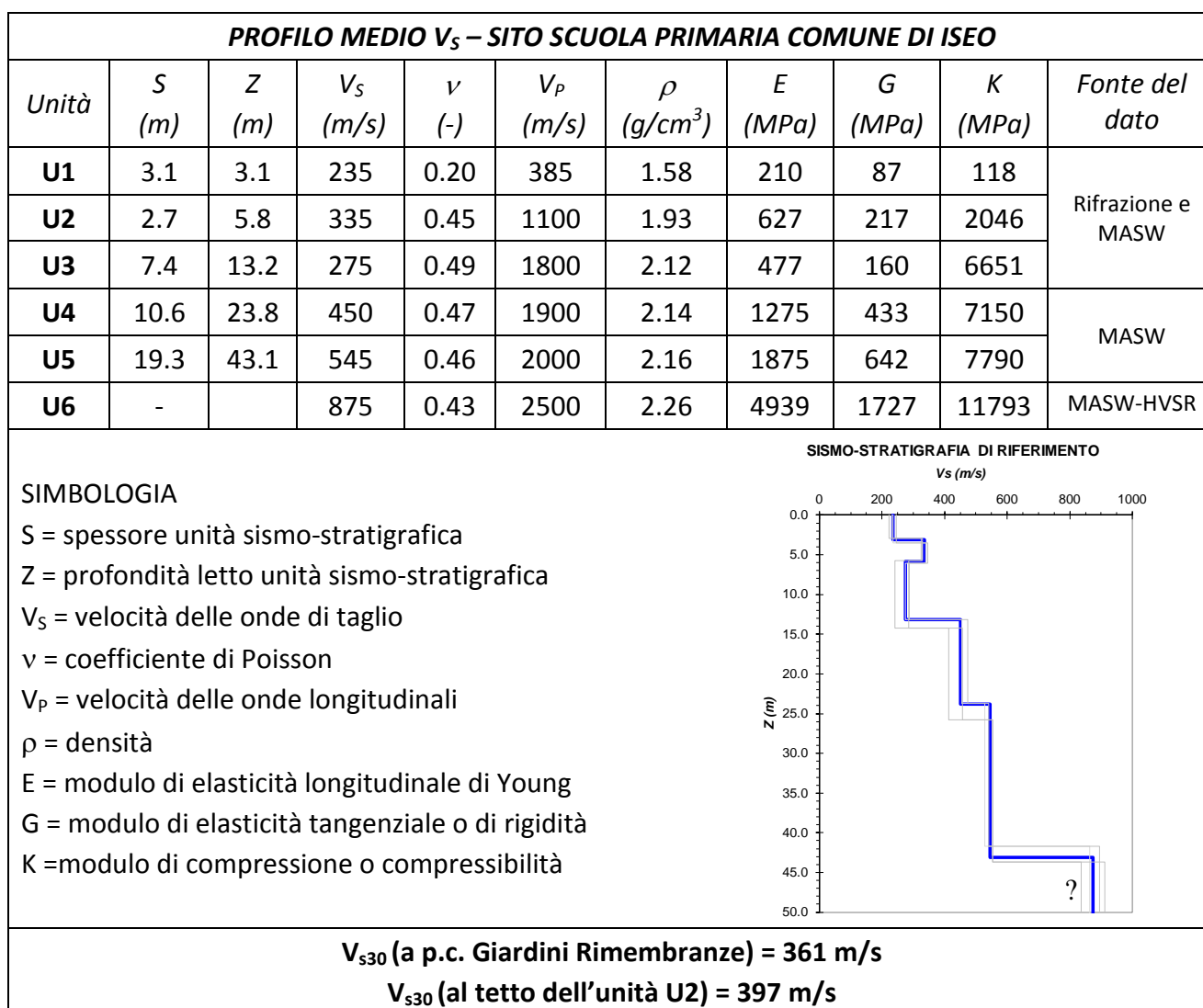
- l'indagine di sismica a rifrazione in fase P e SH ha evidenziato la presenza di un primo strato superficiale, di spessore compreso da 3 a 4 m, tendente all'assottigliamento verso SE, poggiante su un secondo strato più compatto e rigido; in termini di onde longitudinali è evidente un secondo rifrattore corrispondente alla tavola d'acqua, che tende a saturare il materiale a partire dai 5.5 m di profondità all'estremo NW e gradualmente in approfondimento verso SE; in termini di onde trasversali il secondo rifrattore non risulta evidente, testimonianza della presenza di un'inversione di velocità, la cui posizione ed entità è stata individuata tramite l'indagine delle onde superficiali;
- l'indagine MASW in configurazione ZVF ha permesso di individuare le caratteristiche dispersive del modo fondamentale dell'Onda di Rayleigh e tramite la configurazione RVF è stato possibile individuare il primo modo fondamentale; con la configurazione THF sono state individuate le caratteristiche dispersive del modo fondamentale dell'Onda di Love e dei suoi primi due modi superiori;
- l'indagine puntuale passiva HVSr ha permesso di evidenziare la presenza di un picco di risonanza a  $2.8 \text{ Hz} \pm 0.2$ .

I processi di inversione automatica congiunta hanno evidenziato cinque fondamentali aspetti:

1. la presenza di un'inversione di velocità in termini di  $V_s$  a profondità comprese tra i 6 e i 13 m di profondità;
2. la trascurabile anisotropia tra la rigidità nel piano verticale ( $V_{sv}$ ) e nel piano orizzontale ( $V_{sh}$ );

3. la presenza di un graduale aumento della rigidezza con la profondità oltre i 13 m, validato dall'andamento dei modi superiori delle onde superficiali;
4. la presenza di materiali molto rigidi a partire da profondità superiori ai 20-25 m dall'attuale piano campagna (associabili anche a materiale roccioso fratturato ed alterato);
5. l'indeterminatezza della profondità del forte contrasto d'impedenza elastica responsabile del picco di risonanza evidenziato sulla curva HVSr; esso potrebbe ragionevolmente essere generato da un contatto litologico profondo, posto indicativamente tra i 60 e gli 80 m di profondità nell'ambito del substrato roccioso (nell'ipotesi posto in corrispondenza del generico contatto tra le Formazioni del Selcifero Lombardo e quelle dei Calcari del Medolo).

Sulla base delle osservazioni sopra esposte, mediando i risultati dei 4 modelli medi ottenuti dalle elaborazioni esposte nei precedenti capitoli (linee grigie sottili riportate nel grafico sottostante) ed approssimando in modo ragionevole i valori, è stata individuata la seguente sismo-stratigrafia, che meglio rappresenta le caratteristiche del sottosuolo del sito d'indagine (linea blu nel grafico):



## 9. Bibliografia

- Achenbach, J.D.**, 1999 - Wave Propagation in Elastic Solids. North-Holland, Amsterdam, Netherlands
- Aki, K. and Richards, P.G.**, 1980 - Quantitative Seismology, Theory and Methods, Vol. 1-2 W.H. Freeman & Co., New York
- Dal Moro G., Forte E., Pipan M. & Sukan M.**, 2006 - Velocity Spectra and Seismic Signal Identification for Surface Wave Analysis, Near-Surface Geophysics, 4, 243-251
- Herman, G. T.** *Image reconstruction from projections - The fundamentals of computerized tomography*, Academic Press, New York, 316 pp., 1980
- Nakamura, Y.**, 1989 - A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1
- Nogoshi M. e Igarashi T.**, 1970 - On the propagation characteristics of microtremor. J. Seism. Soc. Jpn., 23, 264-280
- Nolet, G.** *Seismic tomography*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, pp. 386, 1987
- Palmer, D.** *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980
- Park C. B., Miller R. D., & Xia J.**, 1999 - Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64, 3; 800–808
- Sandmeier software** *Reflexw versione 7.5*, 2014
- SESAME Project**, 2004 - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, WP12, deliverable no. D23.12, [http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV\\_User\\_Guidelines.pdf](http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf)
- Worthington, M. H.** *An introduction to geophysical tomography*, First Break, 20-26, 1984
- [www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)
- [www.winmasw.com](http://www.winmasw.com)



## 10. Documentazione fotografica



Indagine lineare: vista verso SE



Indagine lineare: vista verso NW



Indagine puntuale: vista verso E



Indagine puntuale: vista verso W





Indagine puntuale: vista verso N



Indagine puntuale: dettaglio sensore



Indagine lineare: dettaglio sorgente trasversale e geofono orizzontale

