

REGIONE  
SICILIA



Provincia di  
Caltanissetta



Provincia di  
Enna



Committente:

**Novo Wind S.r.l.**  
via Sardegna 40  
00187 Roma  
P.IVA/C.F. 16666841008

Documento:

**PROGETTO DEFINITIVO**

Titolo del Progetto:

**PARCO EOLICO "PARCO DELLE VITTORIE"**

Elaborato:

**Relazione geologica e di compatibilità  
geomorfologica**

ID PROGETTO	DISCIPLINA	CAPITOLO	TIPO	REVISIONE	SCALA	FORMATO
IT-VesPdV	A	ENV	TR	0	-	A4

NOME FILE: IT-VesPdV-Gem-ENV-GEO-TR-01-Rev.0

**Progettazione:**



Studi geologici, agronomici,  
archeologici e ambientali:

Studio Geologico  
Dott. Gaetano Bordone

**Gruppo di lavoro:**

**Dott. Gaetano Bordone  
Dott. Giacomo Pettinelli  
Dott. Fabio Interrante  
Ing. Mauro di Prete  
Dott.ssa Ileana Contino**

Rev:	Data Revisione	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	Luglio 2023	PRIMA EMISSIONE	GEMSA	GEMSA	Novo Wind S.r.l.

*Studio Gaetano Bordone*  
*Relazione geologica e di compatibilità geomorfologica– Progetto per la realizzazione di un impianto eolico denominato Parco delle Vittorie, sito nel territorio comunale di Piazza Armerina, Barrafranca (EN) e Mazzarino (CL)*

***REGIONE SICILIA***

***COMUNI DI PIAZZA ARMERINA, BARRAFRANCA (EN), E  
MAZZARINO (CL)***

***PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO  
DENOMINATO PARCO DELLE VITTORIE***

***RELAZIONE GEOLOGICA E DI COMPATIBILITA’  
GEOMORFOLOGICA***

Studio Gaetano Bordone

Relazione geologica e di compatibilità geomorfologica– Progetto per la realizzazione di un impianto eolico denominato Parco delle Vittorie, sito nel territorio comunale di Piazza Armerina, Barrafranca (EN) e Mazzarino (CL)

SOMMARIO

1.	<b>PREMESSE</b> .....	<b>3</b>
2.	<b>CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE</b> .....	<b>7</b>
3.	<b>CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE</b> .....	<b>9</b>
4.	<b>LIQUEFAZIONE DEI TERRENI</b> .....	<b>14</b>
5.	<b>INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE NELL'AREA</b> .....	<b>22</b>
6.	<b>CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO</b> .....	<b>54</b>
7.	<b>CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE DA ESEGUIRE IN FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA</b> .....	<b>58</b>
8.	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>60</b>

## **1. PREMESSE**

Il presente studio geologico-idrogeologico preliminare è stato eseguito in ossequio a quanto descritto nelle normative vigenti in materia (D.M. 17/01/2018). In particolare il paragrafo 6.12 delle NTC 2018 così testualmente recita:

### **6.12. FATTIBILITÀ DI OPERE SU GRANDI AREE**

*Le presenti norme definiscono i criteri di carattere geologico e geotecnico da adottare nell'elaborazione di piani urbanistici e nel progetto di insiemi di manufatti e interventi che interessano ampie superfici, quali:*

- a) nuovi insediamenti urbani civili o industriali;*
- b) ristrutturazione di insediamenti esistenti, reti idriche e fognarie urbane e reti di sottoservizi di qualsiasi tipo;*
- c) strade, ferrovie ed idrovie;*
- d) opere marittime e difese costiere;*
- e) aeroporti;*
- f) bacini idrici artificiali e sistemi di derivazione da corsi d'acqua;*
- g) sistemi di impianti per l'estrazione di liquidi o gas dal sottosuolo;*
- h) bonifiche e sistemazione del territorio;*
- i) attività estrattive di materiali da costruzione.*

**6.12.1. INDAGINI SPECIFICHE** *Gli studi geologici e la caratterizzazione geotecnica devono essere estesi a tutta la zona di possibile influenza degli interventi previsti, al fine di accertare che la destinazione d'uso sia compatibile con il territorio in esame. In particolare, le indagini e gli studi devono caratterizzare la zona di interesse in termini vulnerabilità ambientale, per processi geodinamici interni (sismicità, vulcanismo,...) ed esterni (stabilità dei pendii, erosione,*

*subsidenza,...) e devono consentire di individuare gli eventuali limiti imposti al progetto di insiemi di manufatti e interventi (ad esempio: modifiche del regime delle acque superficiali e sotterranee, subsidenza per emungimento di fluido dal sottosuolo).*

Nello specifico ha previsto l'analisi critica dei dati forniti dal Committente e l'esecuzione di specifici rilievi di superficie per:

- determinare la costituzione geologica dell'area interessata dal progetto;
- studiarne le caratteristiche geomorfologiche con particolare riguardo alle condizioni di stabilità dei versanti;
- definire l'assetto idrogeologico con riguardo alla circolazione idrica superficiale e sotterranea;
- individuare tutte le problematiche geologico-tecniche che possono interferire con le opere in progetto;
- indicare, in linea di prima approssimazione, eventuali opere di consolidamento o presidio per garantire la realizzazione ottimale delle opere in progetto;
- determinare, in linea di prima approssimazione, le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni con maggiore interesse a quelle che più da vicino riguardano gli aspetti progettuali;
- verificare l'eventuale presenza di problematiche legate a fenomeni di liquefazione;
- indicare un programma di indagini geognostiche e geotecniche da eseguire nelle successive fasi di progettazione.

Lo studio è stato, quindi, articolato come segue:

**a) Studio geologico dell'area interessata** comprendente la descrizione delle formazioni geologiche presenti, delle loro

caratteristiche litologiche, dei reciproci rapporti di giacitura, dei loro spessori, nonché l'indicazione di tutti i lineamenti tettonici.

**b) Studio geomorfologico dell'area interessata** comprendente la descrizione dei principali lineamenti morfologici, degli eventuali fenomeni di erosione e dissesto, dei principali processi indotti da antropizzazione.

**c) Studio idrogeologico dell'area interessata** comprendente la descrizione dei lineamenti essenziali sulla circolazione idrica superficiale e sotterranea in relazione alla loro interferenza con le problematiche geotecniche ed all'individuazione delle aree soggette ad esondazione.

**d) Studio delle pericolosità geologiche dell'area interessata** comprendente tutto quanto necessario ad evidenziare le aree interessate da "pericolosità geologiche" quali frane, colate, crolli, erosioni, esondazioni, rappresentando, cioè, un'attenta analisi ed interpretazione degli studi precedenti.

**e) Studio della pericolosità sismica locale** atto ad evidenziare le aree con particolari problematiche sismiche e tali da poter provocare fenomeni di amplificazione, liquefazione, cedimenti ed instabilità.

Da quanto detto prima si evince che in una prima fase il nostro lavoro è stato organizzato eseguendo numerosi sopralluoghi finalizzati allo studio di una zona più vasta rispetto a quella direttamente interessata dal progetto per inquadrare, in una più ampia visione geologica, la locale situazione geostrutturale.

Nostro interesse era, inoltre, quello di definire l'habitus geomorfologico e l'assetto idrogeologico concentrando la nostra attenzione

sulle condizioni di stabilità dei versanti, sullo stato degli agenti morfogenetici attivi e sulla presenza e profondità di eventuali falde freatiche.

Per la ricostruzione della serie stratigrafica locale e del modello geologico, nonché per l'individuazione dell'eventuale presenza di falde freatiche e della profondità del livello piezometrico, sono stati utilizzati i dati in nostro possesso e quelli derivanti dai sopralluoghi e dalle indagini eseguite per il presente lavoro e da studi eseguiti dal sottoscritto in aree limitrofe all'area direttamente interessata dallo studio.

Per la caratterizzazione sismica sono stati utilizzati i dati delle indagini sismiche eseguite per il presente studio, che hanno consentito di ottenere informazioni sulle velocità delle onde sismiche Vs nei primi 30 m di profondità a partire dal p.c.

Con i dati in nostro possesso, abbiamo redatto la presente relazione geologico-tecnica corredata da:

- ❖ carta geologica, geomorfologica ed idrogeologica in scala 1/10.000 fuori testo;
- ❖ carte in scala 1/10.000 fuori testo relative al “Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.)” redatte dall'Assessorato Territorio e Ambiente – Servizio 4 “Assetto del territorio e difesa del suolo” e al P.G.R.A., con l'ubicazione delle aree interessate delle opere in progetto;
- ❖ risultati delle indagini geofisiche eseguite.

Le ipotesi geologiche formulate in questa sede sono da confermare con l'esecuzione delle indagini indicate nell'apposito capitolo, nella successiva fase di progettazione.

## **2. CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE**

Il presente studio geologico è stato realizzato conducendo inizialmente la necessaria ricerca bibliografica sulla letteratura geologica esistente, la raccolta ed il riesame critico dei dati disponibili e, infine, una campagna di rilievi effettuati nell'area strettamente interessata dallo studio.

Entrando nel particolare del l'impianto in progetto, la situazione litostratigrafica locale è caratterizzata, dall'alto verso il basso, dall'affioramento di:

⇒ **DEPOSITI ALLUVIONALI TERRAZZATI (Pleistocene sup.):**

Si tratta di rocce costituite prevalentemente da sabbie ghiaiose di colore giallastro, talora rossastro, a clasti poligenici ed eterometrici.

Interessano direttamente gli aerogeneratori WTG 04 e WTG 05.

⇒ **SABBIE DI LANNARI (Gelasiano-Calabriano):** si tratta di sabbie di colore ocra a granulometria medio-fine talora limose, a stratificazione irregolare con intercalati livelli arenacei teneri e cementati.

Interessano direttamente gli aerogeneratori WTG 01, WTG 07, WTG 08, WTG 09, WTG 10, WTG 11, WTG 12, WTG 13, WTG 14.

⇒ **MARNE DI GERACELLO (Gelasiano):** si tratta di argille marnose ed argille siltose di colore grigio azzurro, talora biancastro, a stratificazione indistinta. Si possono riscontrare intercalati livelli centimetrici di sabbie grigio-giallastre.

Interessano direttamente gli aerogeneratori WTG 02, WTG 03 e WTG 06.

In conclusione, nell'area direttamente interessata dal progetto sono individuabili 3 situazioni geologicamente diverse:

- ❖ nelle aree dove affiorano i depositi terrazzati (aerogeneratori WTG4 e WTG 5) i litotipi di sedime sono prevalentemente rocce sciolte costituite da sabbie ghiaiose di colore giallastro, talora rossastro, a clasti poligenici ed eterometrici. Si presentano generalmente scarsamente addensate e sature. Lo spessore è variabile tra 3 e 8 m e sovrastano i litotipi della Marne di Geracello. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale;
- ❖ nelle aree dove affiorano le Sabbie di Lannari (aerogeneratori WTG 1, WTG 7, WTG 8, WTG 9, WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13) i litotipi di sedime sono sabbie di colore ocra a granulometria medio-fine talora limose, a stratificazione irregolare con intercalati livelli arenacei teneri e cementati. Lo spessore è variabile tra 10 e 30 m e sovrastano i litotipi e sovrastano i litotipi della Marne di Geracello. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale.
- ❖ nelle aree dove affiorano le Marne di Geracello (aerogeneratori WTG 2, WTG 3 e WTG 6) i litotipi di sedime sono argille marnose ed argille siltose di colore grigio azzurro, talora biancastro, a stratificazione indistinta. Si presentano alterate per i primi 7-8 m di profondità. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale.

### **3. CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE**

Nell'area vasta l'habitus geomorfologico è piuttosto irregolare e costituito da un paesaggio contraddistinto da formazioni geologiche di varia natura litologica.

Risulta molto tormentato e caratterizzato da strette valli dove affiorano i termini più coerenti che convergono in ampie vallate circondate da rilievi argillosi.

Infatti, da un lato le litologie di tipo pseudocoerente, che sono rappresentate dai termini argillosi affiorano in corrispondenza di rilievi dall'andamento dolce, dall'altro quelle coerenti, ovvero le litologie calcarenitiche, danno luogo a rilievi molto più acclivi e dall'andamento accidentato.

Questa marcata differenziazione di origine “strutturale” viene ulteriormente accentuata dalla cosiddetta “erosione selettiva”, ossia dalla differente risposta dei terreni agli agenti morfogenetici, che nel sistema morfoclimatico attuale sono dati essenzialmente dalle acque di precipitazione meteorica e da quelle di scorrimento superficiale.

Le litologie più coerenti vengono erose in misura più ridotta e tendono, quindi, a risaltare nei confronti delle circostanti litologie pseudocoerenti o incoerenti.

I processi morfodinamici prevalenti nel sistema morfoclimatico attuale vedono, infatti, come agente dominante l'acqua, sia per quanto riguarda i processi legati all'azione del ruscellamento ad opera delle acque selvagge, che per i processi di erosione e/o sedimentazione operati dalle acque incanalate.

Sono essenzialmente i processi fluviali quelli che hanno esplicito e tutt'ora esplicano un ruolo fondamentale nell'evoluzione geomorfologica dell'area.

Per quanto riguarda i processi fluviali, il reticolato idrografico risulta organizzato in maniera abbastanza indipendente da discontinuità iniziali, con un pattern molto articolato, come desumibile dal rilievo aerofoto-geologico.

Per quanto concerne le forme geodinamiche presenti nei versanti interessati dalle opere in progetto, si mette in evidenza che tramite i rilievi di superficie, integrati dallo studio delle fotografie aeree del territorio, sono state individuate alcune aree coinvolte da fenomeni morfogenetici caratterizzati prevalentemente da dissesti di tipo “erosione concentrata o diffusa” attive.

I fenomeni sopra citati sono esclusivamente legati all'azione delle acque ed alla pendenza media dei versanti, essendo legati al fatto che la coltre superficiale alterata si imbibisce durante i periodi di piogge prolungate e grazie alla concomitante attività erosiva dei corsi d'acqua presenti, soprattutto quelli secondari, tende a muoversi sia pure con movimenti di massa lenti.

***Detti dissesti non interessano gli aerogeneratori in progetto e ciò è confermato da PAI che non li include tra le aree a rischio/pericolosità geomorfologica.***

***Certamente alcuni tratti di cavidotto avranno alcune criticità da risolvere con opere di ingegneria naturalistica che saranno studiate una volta in possesso del tracciato definitivo.***

Si mette in evidenza che i versanti a valle degli aerogeneratori WTG12, WTG13 e WTG14 sono caratterizzati da aree elevate pendenza

interessate da un'attività geodinamica piuttosto spinta che si sviluppa gradualmente seguendo alcuni stadi:

- ✓ in un primo tempo si ha un'*erosione diffusa*, ad opera del velo d'acqua che bagna la superficie secondo la linea di massima pendenza;
- ✓ in seguito, si genera la cosiddetta *erosione per rigagnoli*, in cui l'erosione si concentra nei solchi generati dalla precedente erosione ed in cui scorre l'acqua;
- ✓ infine, si ha l'*erosione a solchi*, in cui l'acqua è riuscita a scavare nel terreno incisioni profonde.

Per questi aerogeneratori lo studio di dettaglio che sarà eseguito in una seconda fase ci consentirà di verificare l'eventuale necessità di prevedere alcune opere di consolidamento.

***Sin da subito si può dire che sarebbe preferibile allontanare i sopra indicati aerogeneratori dai limiti dei dissesti di almeno 50 m dal ciglio della parete sabbioso-calcarenitica.***

In particolare, le aree indicate nelle carte del P.A.I. sono interessate dai suddetti “fenomeni geodinamici” e debbono essere tenuti nella dovuta considerazione nella scelta del tracciato della viabilità e del cavidotto al fine di evitare che la loro evoluzione possa in futuro interferire negativamente con le stesse.

***Un'altra criticità geomorfologica riguarda il WTG 09 che si trova ubicato su un “promontorio calcarenitico-sabbioso” molto stretto di larghezza massima pari a circa 20-30 m delimitato da pareti molto alte (circa 15-20 mt.) e da versanti argillosi con scarse condizioni di stabilità.***

***Anche in questo caso uno spostamento di un centinaio di metri potrebbe essere la soluzione ideale.***

Dal punto di vista idrogeologico l'area direttamente interessata dal progetto è caratterizzata dall'affioramento di terreni diversi che abbiamo suddiviso in 2 tipi di permeabilità prevalente:

- ❖ **Rocce permeabili per porosità:** Si tratta di rocce caratterizzate da una permeabilità per porosità che varia al variare delle dimensioni granulometriche dei terreni presenti. In particolare la permeabilità risulta essere medio-bassa nella frazione limosa mentre tende ad aumentare nei livelli sabbiosi e ghiaiosi. Di conseguenza la circolazione idrica sotterranea è discontinua con livelli acquiferi sospesi. Rientrano in questo complesso i terreni afferenti ai depositi terrazzati e le Sabbie di Lannari.
- ❖ **Rocce impermeabili:** Questo complesso è costituito dalle Marne di Geracello. In queste rocce l'infiltrazione si esplica tanto lentamente da essere considerate praticamente impermeabili anche se la porzione alterata superficiale acquista una bassa permeabilità per porosità.

Vista la natura dei terreni presenti si può affermare che il livello piezometrico della falda presente nei depositi terrazzati si attesta a una quota pari a circa 2.0 m dal p.c., ma può raggiungere il piano campagna durante i periodi di pioggia. Si tratta di una falda di poco interesse per la sua scarsa potenzialità e perché prevalentemente a carattere stagionale.

È presente, invece, un'importante falda dove affiorano le Sabbie di Lannari. Si tratta di un adunamento idrico legato all'esteso territorio dove affiora questa formazione geologica.

Il livello freatico è generalmente profondo, rispetto alle fondazioni dei manufatti in progetto ed in ogni caso questa formazione è interessata solo marginalmente ed in posizione prossima a versanti sub verticali e con

elevata pendenza che drenano la falda alla loro base, per cui, in questa fase si può affermare che non è possibile alcuna interferenza negativa tra la realizzazione/esercizio/dismissione delle opere in progetto e la falda,

Nelle aree caratterizzate dall'affioramento dei litotipi argillosi, non sono presenti falde freatiche ma nel periodo delle piogge i primi metri alterati si possono trovare in condizioni di saturazione.

Da un punto di vista geotecnico, il calcolo delle fondazioni deve tenere conto che presumibilmente, nel periodo delle piogge invernali, la parte alterata possa essere in condizioni di saturazione per il notevole potere di assorbimento che caratterizza le porzioni superficiali dei complessi argillosi.

Da un punto di vista idraulico il P.A.I. ed il P.G.R.A. non inseriscono le opere in progetto all'interno di aree identificate con pericolosità e/o rischio.

*L'area rientra all'interno dell'acquifero "Piazza Armerina", considerati dalla Regione come significativo, ma nelle vicinanze dell'impianto non sono presenti né pozzi né sorgenti tutelati dal PTA. Si ritiene che l'impianto in progetto non possa interferire con la falda acquifera e comunque la stessa sarà accuratamente monitorata come previsto nel Piano di Monitoraggio ambientale.*

#### **4. LIQUEFAZIONE DEI TERRENI**

Il problema della liquefazione dei terreni è di estrema importanza in aree a rischio sismico, come quella in cui si deve realizzare il progetto.

Si tratta di un fenomeno estremamente importante e pericoloso in particolari condizioni.

Il termine *liquefazione* viene usato, per definire un processo per cui una massa di terreno saturo, a seguito dell'intervento di forze esterne, statiche o dinamiche perde resistenza al taglio e si comporta come un fluido.

Ricordando la relazione di un terreno incoerente saturo:

$$\tau_f = (\sigma_f - u) \operatorname{tg} \varphi$$

se per effetto delle azioni esterne la pressione applicata si trasferisce integralmente alla fase liquida, ossia  $\sigma = u$ , viene  $\tau_f = 0$  e quindi resistenza tangenziale nulla.

Sono soprattutto le azioni dinamiche a disturbare l'equilibrio dello scheletro solido orientando le particelle di roccia, immerse in acqua, verso una maggiore compattezza.

Le particelle di terreno sotto la vibrazione, si dispongono infatti facilmente in un nuovo assetto ed in questa fase di transizione perdono il contatto fra di loro e, quindi, sono «flottanti» temporaneamente nell'acqua perdendo ogni funzione portante.

La presenza dell'acqua pone le sabbie, sottoposte a rapide alternanze di carico, in situazione analoga a quella delle argille sature sottoposte rapidamente a carichi statici; infatti la velocità con la quale si producono le variazioni di volume è talmente elevata che, nonostante la forte permeabilità dello scheletro granulare della sabbia, l'acqua non riesce a

sfuggire mentre avviene la riduzione di volume del tessuto e, quindi, le pressioni interstiziali annullano la resistenza di attrito.

Di qui la liquefazione del terreno e lo sprofondamento delle opere.

La predisposizione alla liquefazione dipende, quindi, dalla capacità del terreno ad aumentare la propria densità, il che è legato evidentemente alla percentuale di vuoti iniziale.

Il fenomeno della liquefazione si verifica per stratificazioni superficiali, a profondità di 15 m può dirsi che esso sia escluso a causa della compattezza prodotta dalla pressione geostatica.

Notevoli assestamenti possono verificarsi con terreni anche asciutti sottoposti a vibrazioni ma senza la presenza della falda non è possibile l'istaurarsi del fenomeno della liquefazione.

I metodi con cui si calcola la tendenza alla liquefazione sono divisi in due categorie: a) Metodi semplificati; b) Metodi empirici ed il nostro studio utilizza quelli definiti dal programma Liquiter della Geostru.

I metodi semplificati si basano sul rapporto che intercorre fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto; hanno perciò bisogno di valutare i parametri relativi sia all'evento sismico sia al deposito, determinati questi ultimi privilegiando metodi basati su correlazioni della resistenza alla liquefazione con parametri desunti da prove in situ ed indagini geofisiche per il calcolo delle  $V_{s30}$ .

La resistenza del deposito alla liquefazione viene, quindi, valutata in termini di fattore di resistenza alla liquefazione

$$(1.0)F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

I metodi semplificati proposti differiscono fra loro soprattutto per il modo con cui viene ricavata CRR, la resistenza alla liquefazione.

Il parametro maggiormente utilizzato è il numero dei colpi nella prova SPT anche se oggi, con il progredire delle conoscenze, si preferisce valutare il potenziale di liquefazione utilizzando prove di misurazione delle onde di taglio Vs.

I metodi di calcolo del potenziale di liquefazione adottati dal programma sono:

- 1) *Metodo di Seed e Idriss (1982);*
- 2) *Metodo di Iwasaki et al. (1978; 1984);*
- 3) *Metodo di Tokimatsu e Yoshimi (1983);*
- 4) *Metodo di Finn (1985);*
- 5) *Metodo di Cortè (1985);*
- 6) *Metodo di Robertson e Wride modificato (1997);*
- 7) *Metodo di Andrus e Stokoe (1998);*
- 8) *Metodi basati sull'Eurocodice 8 (ENV 1998-5);*
- 9) *Metodo basato sull'NTC 2008.*

In base all'Eurocodice 8 (ENV 1998-5) si può escludere pericolo di liquefazione per i terreni sabbiosi saturi che si trovano a profondità di 15 m o quando  $a_g < 0,15$  e, contemporaneamente, il terreno soddisfi almeno una delle seguenti condizioni:

- ❖ contenuto in argilla superiore al 20%, con indice di plasticità  $> 10$ ;
- ❖ contenuto di limo superiore al 10% e resistenza  $N_{1,60} > 20$ ;

- ❖ frazione fine trascurabile e resistenza  $N_{1,60} > 25$ .

Quando nessuna delle precedenti condizioni è soddisfatta, la suscettibilità a liquefazione deve essere verificata come minimo mediante i metodi generalmente accettati dall'ingegneria geotecnica, basati su correlazioni di campagna tra misure in situ e valori critici dello sforzo ciclico di taglio che hanno causato liquefazione durante terremoti passati.

Lo sforzo ciclico di taglio CSR viene stimato con l'espressione semplificata:

$$CSR = 0,65 \frac{a_g}{g} S \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{r_d}{MSF}$$

dove **S** è il coefficiente di profilo stratigrafico, definito come segue:

Categoria suolo	Spettri di Tipo 1- S (M > 5,5)	Spettri di Tipo 2 - S (M < 5,5)
A	1,00	1,00
B	1,20	1,35
C	1,15	1,50
D	1,35	1,80
E	1,40	1,60

Il fattore di correzione della magnitudo **MSF** consigliato dalla normativa è quello di Ambraseys.

Nel caso vengano utilizzati dati provenienti da prove SPT, la resistenza alla liquefazione viene calcolata mediante la seguente relazione di Blake, 1997:

(a)

$$CRR = \frac{0,04844 - 0,004721(N_{1,60})_{cs} + 0,0006136[(N_{1,60})_{cs}]^2 - 0,00001673[(N_{1,60})_{cs}]^3}{1 - 0,1248(N_{1,60})_{cs} + 0,009578[(N_{1,60})_{cs}]^2 - 0,0003285[(N_{1,60})_{cs}]^3 + 0,000003714[(N_{1,60})_{cs}]^4}$$

dove  $(N_{1,60})_{cs}$  viene valutato con il metodo proposto da Youd e Idriss (1997) e raccomandato dal NCEER:

$$(N_{1,60})_{cs} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

dove  $N_{1,60}$  è la normalizzazione dei valori misurati dell'indice  $N_m$  (ridotti del 25% per profondità  $< 3$  m) nella prova SPT rispetto ad una pressione efficace di confinamento di 100 KPa ed a un valore del rapporto tra l'energia di impatto e l'energia teorica di caduta libera pari al 60%, cioè:

$$N_{1,60} = C_N C_E N_m$$

$$C_N = \left( \frac{100}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5}$$

$$C_E = \frac{ER}{60}$$

dove ER è pari al rapporto dell'energia misurato rispetto al valore teorico x 100 e dipende dal tipo di strumento utilizzato.

<b>Attrezzatura</b>	<b>C<sub>E</sub></b>
Safety Hammer	0,7 – 1,2
Donut Hammer (USA)	0,5 – 1,0
Donut Hammer (Giappone)	1,1 – 1,4
Automatico-Trip Hammer (Tipo Donut o Safety)	0,8 – 1,4

I parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , invece, dipendono dalla frazione fine (FC):

$\alpha = 0$	per $FC \leq 5\%$
$\alpha = \exp[1,76 - (190 / FC^2)]$	per $5\% < FC \leq 35\%$
$\alpha = 5$	per $FC > 35\%$
$\beta = 1,0$	per $FC \leq 5\%$
$\beta = [0,99 + (FC^{1,5} / 1000)]$	per $5\% < FC \leq 35\%$
$\beta = 1,2$	per $FC > 35\%$

Se invece si possiedono dati provenienti da una prova penetrometrica statica (CPT), i valori di resistenza alla punta misurati  $q_c$  devono essere normalizzati rispetto ad una pressione efficace di confinamento pari a 100 KPa e vanno calcolati mediante la seguente formula

$$q_{c1N} = \frac{q_c}{Pa} \left( \frac{Pa}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

Per poter tenere conto della eventuale presenza di particelle fini, il software utilizza il metodo di Robertson e Wride.

Poiché, come dimostrato, è possibile assumere:

$$\frac{(q_{c1N})_{cs}}{(N_{1,60})_{cs}} = 5$$

come proposto dall'EC8, derivato  $(N_{1,60})_{cs}$ , si utilizza la (a) per il calcolo di CRR.

Quando invece si possiedono dati provenienti da prove sismiche, si calcola la velocità di propagazione normalizzata con la formula:

$$V_{SI} = V_s \left( \frac{100}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,25}$$

e la resistenza alla liquefazione mediante la formula di Andrus e Stokoe:

$$CRR = 0,03 \left( \frac{V_{SI}}{100} \right)^2 + 0,9 \left[ \frac{1}{(V_{SI})_{cs} - V_{SI}} - \frac{1}{(V_{SI})_{cs}} \right]$$

Rispetto alla normativa europea, la normativa italiana (NTC 2008) è meno accurata e non fornisce proposte di metodologie per valutare il potenziale di liquefazione.

La normativa richiede che il controllo della possibilità di liquefazione venga effettuato quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse

di sabbie sciolte sottofalda, anche se contenenti una frazione fine limo-argillosa.

Secondo le normative europea e italiana è suscettibile di liquefazione un terreno in cui lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico che ha provocato liquefazione durante terremoti passati.

La probabilità di liquefazione  $P_L$ , invece, è data dall'espressione di Juang et al. (2001):

$$P_L = \frac{1}{1 + \left( \frac{F_s}{0,72} \right)^{3,1}}$$

I calcoli del coefficiente di liquefazione sono, come è ovvio, molto specifici del sito di sedime in quanto dipendono prevalentemente dalla granulometria dei terreni che in questi complessi hanno caratteristiche molto variabili anche a distanza di pochi metri.

Nello specifico del nostro lavoro si evince che dove sono presenti terreni di natura prevalentemente argillosa sono soddisfatte le condizioni di cui alla normativa vigente e può essere esclusa la possibilità che avvengano fenomeni di liquefazione dei terreni, mentre dove affiorano i litotipi sabbiosi, in questa fase, sono stati eseguiti i primi preliminari calcoli sulla base delle indagini geofisiche eseguite che ci confortano in base alla notevole presenza di materiali a granulometria media e per la presenza di livelli e strati variamente cementati che inibiscono l'istaurarsi di tale fenomeno per cui si può dire che in generale il problema non sussiste, come peraltro la serie storica dei terremoti che si sono avvertiti in zona dimostra.

Infatti, in tutta la storia recente, pur in presenza di terremoti anche di magnitudo importante non si sono osservati fenomeni di liquefazione in sito.

Si ritiene, comunque, indispensabile che in fase di progettazione esecutiva e di calcolo delle strutture in c.a. si eseguano le indagini indicate nel capitolo successivo al fine di procedere alla calcolazione dei coefficienti di liquefazione sito-specifici per ogni singolo sub parco e della sottostazione ai sensi del D.M. 17/01/2018.

## **5. INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE NELL'AREA**

Nell'ambito del presente studio sono state eseguite n. 13 misure di microtremore ambientale, a partire dal piano di campagna, con un tromografo digitale progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico, al fine di verificare il valore delle VS30 caratteristiche del sito.

Per quanto riguarda le aree dove in affioramento si individuano i litotipi del complesso alluvionale, si sono scelti due siti dove gli spessori del complesso sono presumibilmente quello minimo e quello massimo.

Di seguito vengono riportati alcuni cenni riguardo la metodologia utilizzata.

La sismica passiva è una tecnica che permette di definire la serie stratigrafica locale basandosi sul concetto di contrasto di impedenza dove per strato si intende un'unità distinta in relazione al rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

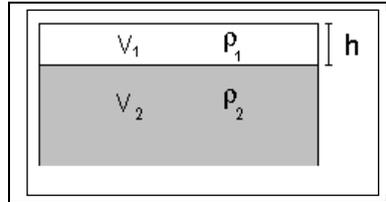
I primi studi su questa tecnica sono da attribuire a Kanai (1957) e da allora diversi metodi sono stati proposti per estrarre utili informazioni sul sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in sito.

Tra questi la tecnica che si è maggiormente consolidata è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSR), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970).

Successivamente Nakamura (1989) ha applicato tale metodo come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D).

Considerando lo schema illustrato nella Figura 1 si osserva che sono presenti due strati (1 e 2) che si differenziano per le densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).



*Figura 1. Modello di suolo costituito da due strati a diverse velocità delle onde sismiche e densità.*

In questo caso un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dalla superficie di strato.

L'onda riflessa interferendo con quelle incidenti si somma e raggiunge le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato.

Ne consegue che la frequenza di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1}/(4 H) \quad [1]$$

mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = V_{S1}/(4 H). \quad [2]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSr mostra, come massimi relativi, le frequenze di risonanza dei vari strati.

Questo dato, insieme alla stima delle velocità, è in grado di fornire utili previsioni sullo spessore H degli strati.

Questa informazione è contenuta principalmente nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali

e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- ❖ il contenuto in frequenza;
- ❖ la risposta strumentale;
- ❖ l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Da evidenziare, inoltre, che i microtremori sono costituiti da onde di volume, P o S, ed in misura maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh.

Tale inconveniente è facilmente superabile sia perché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva, sia perché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

D'altro canto l'applicabilità pratica della formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico.

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati sperimentali, consiste in un tromografo digitale denominato "Tromino", dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, fornito di GPS interno e senza cavi esterni. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

Dalle registrazioni del rumore sismico sono state ricavate e analizzate due serie di dati:

- le curve HVSR che sono state ottenute col software Grilla eseguendo un processing con i seguenti parametri:

- ✓ larghezza delle finestre d'analisi pari a 20 s per tempi di acquisizione di 20 minuti;
  - ✓ lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 15% della frequenza centrale,
  - ✓ rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore ad 2;
  - ✓ rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti.
- le curve dello spettro di velocità delle tre componenti del moto sono state ottenute dopo l'analisi con gli stessi parametri sopra riportati.

Le profondità  $H$  delle discontinuità sismiche sono state ricavate tramite la formula sotto riportata, in cui:

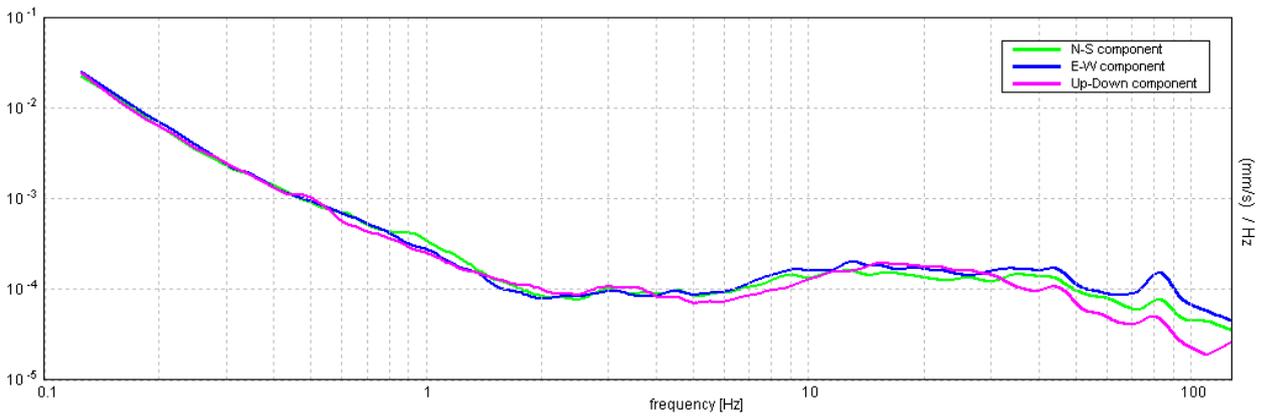
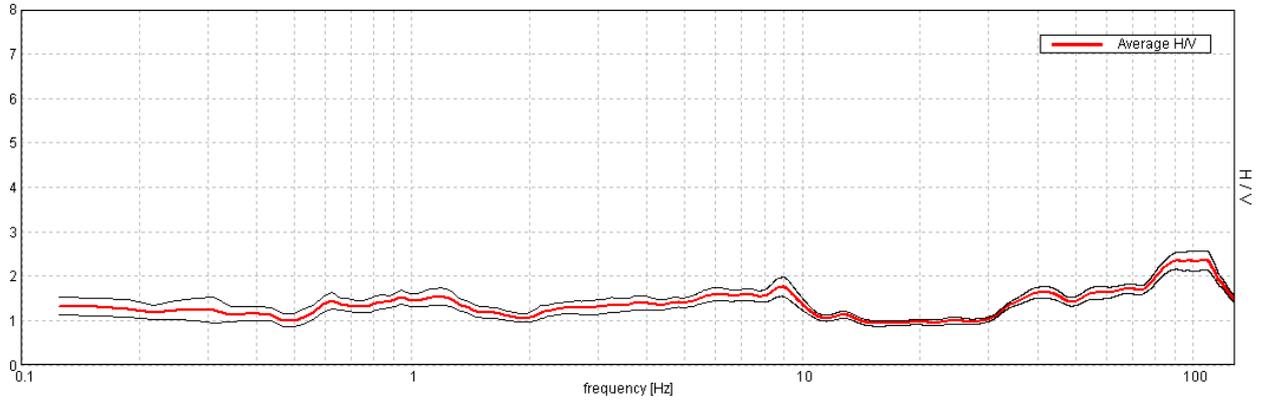
- ⇒  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato;
- ⇒  $a$  un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.);
- ⇒  $\nu$  la frequenza fondamentale di risonanza.

$$H = \left[ \frac{V_0(1-a)}{4\hat{v}_1} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1$$

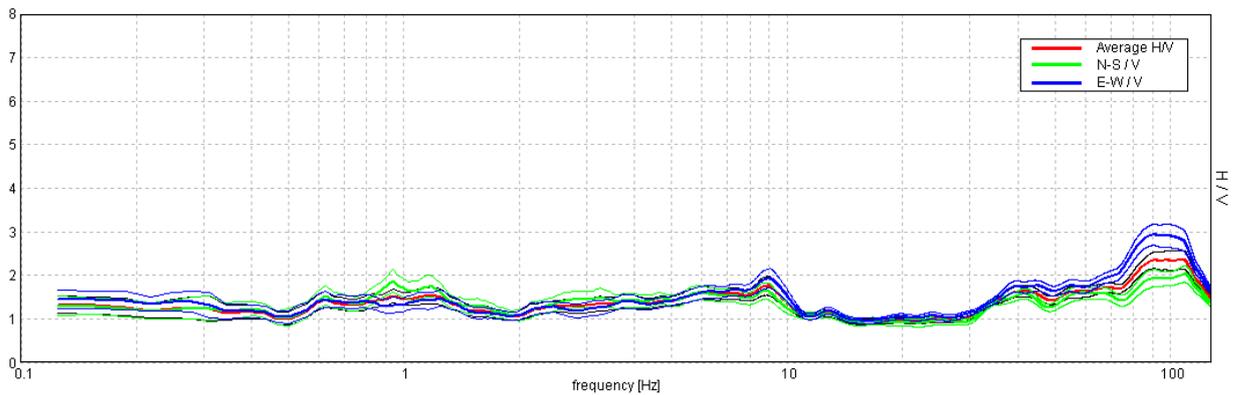
Di seguito sono riportate, in dettaglio, le interpretazioni dei dati sperimentali ottenuti.

### Sondaggio tromografico T1

Max. H/V at 108.13 ± 7.55 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

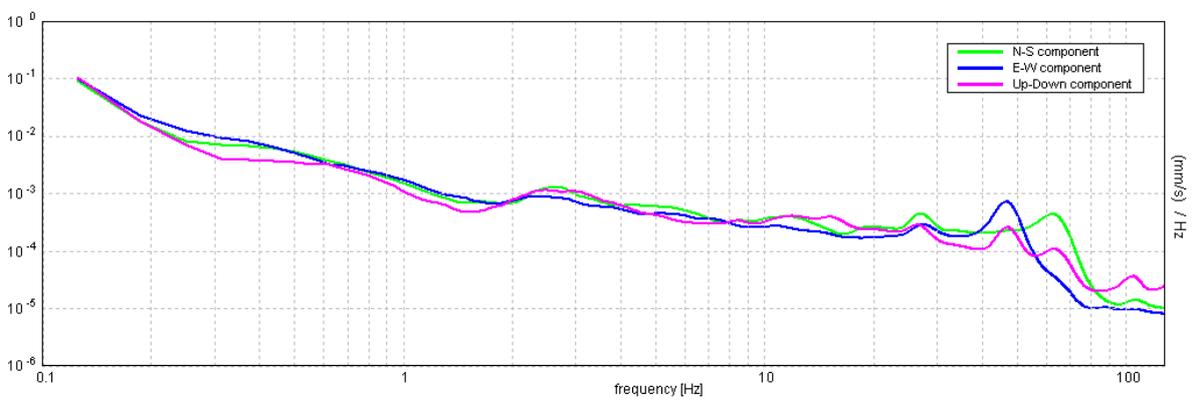
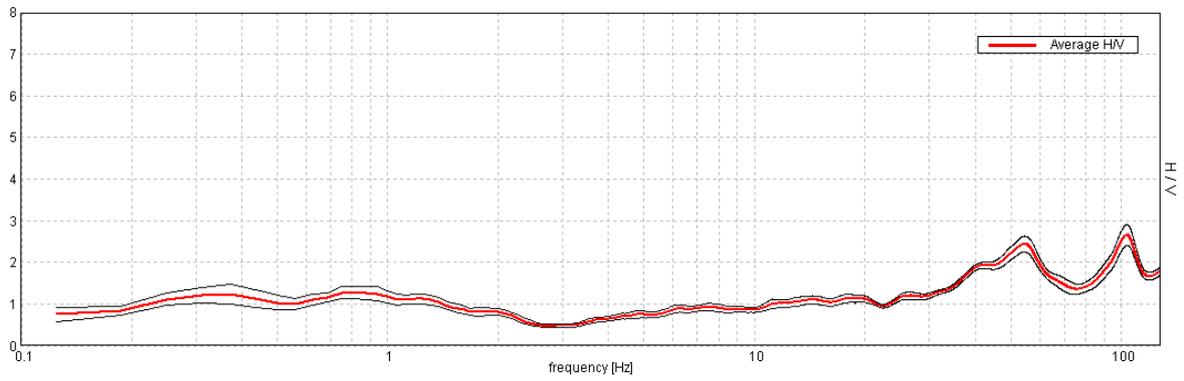


Max. H/V at 108.13 ± 7.55 Hz. Max.(N-S)/V: 109.06 ± 22.07 Hz. Max.(E-W)/V: 90.66 ± 2.95 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

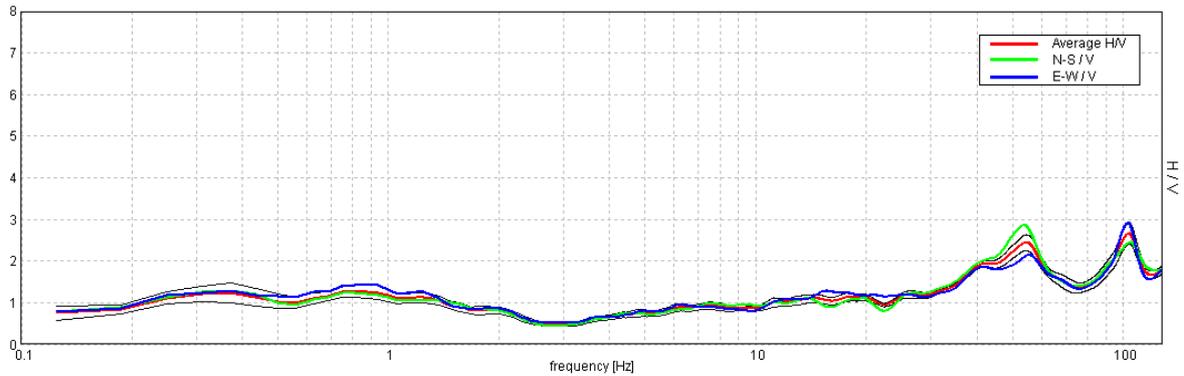


### Sondaggio tomografico T2

Max. H/V at 103.75 ± 1.19 Hz. (In the range 0.0 - 126.0 Hz).

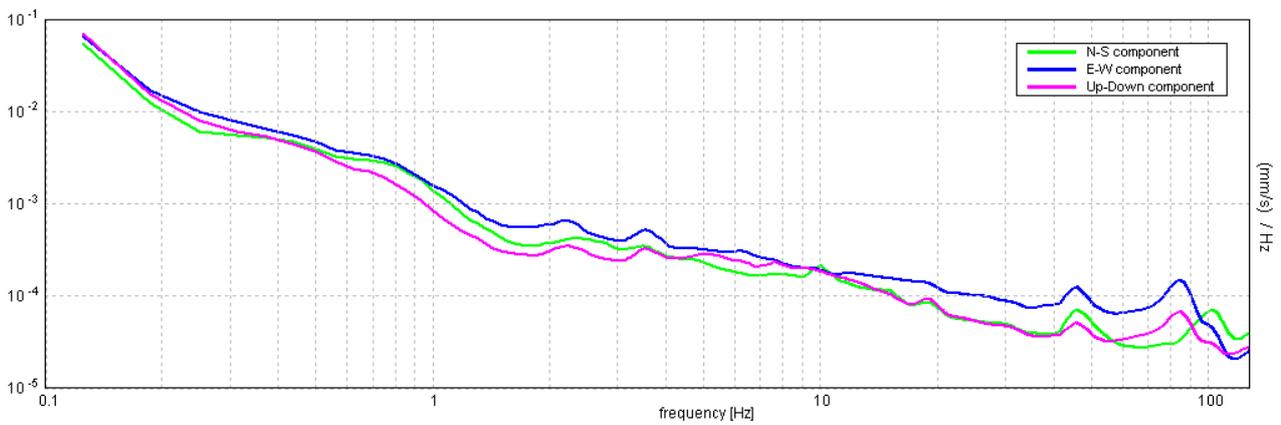
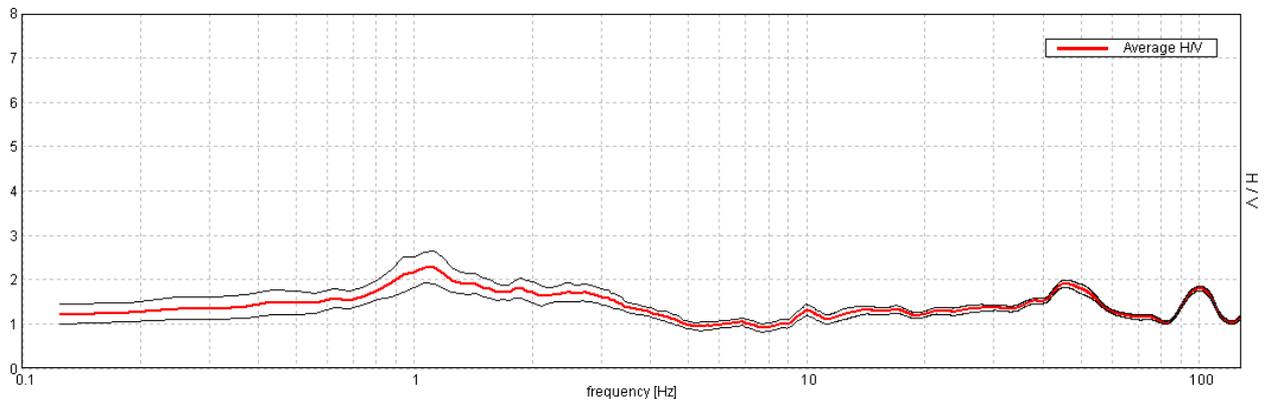


Max. H/V at 103.75 ± 1.19 Hz. Max. (N-S)/V: 53.75 ± 3.72 Hz. Max. (E-W)/V: 103.13 ± 1.15 Hz. (In the range 0.0 - 126.0 Hz).

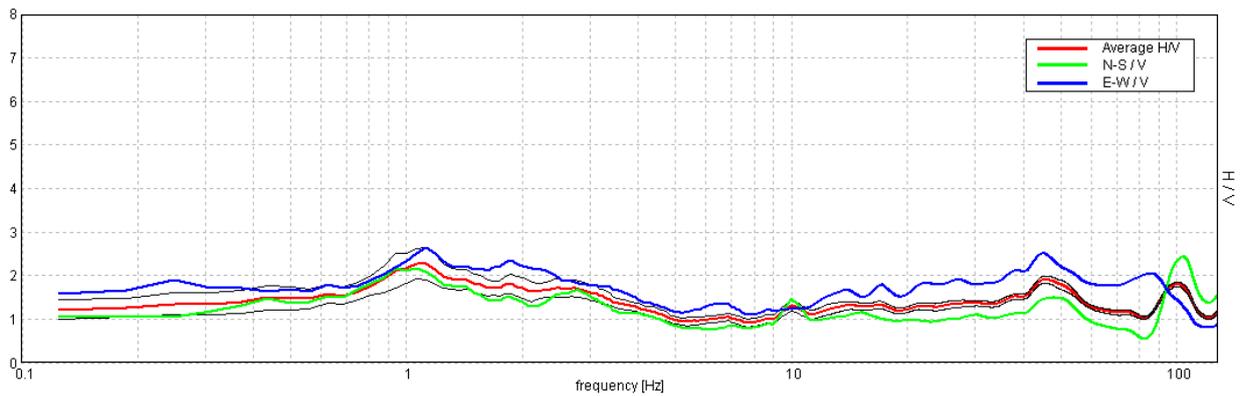


### Sondaggio tromografico T3

Max. H/V at 1.13 ± 0.09 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

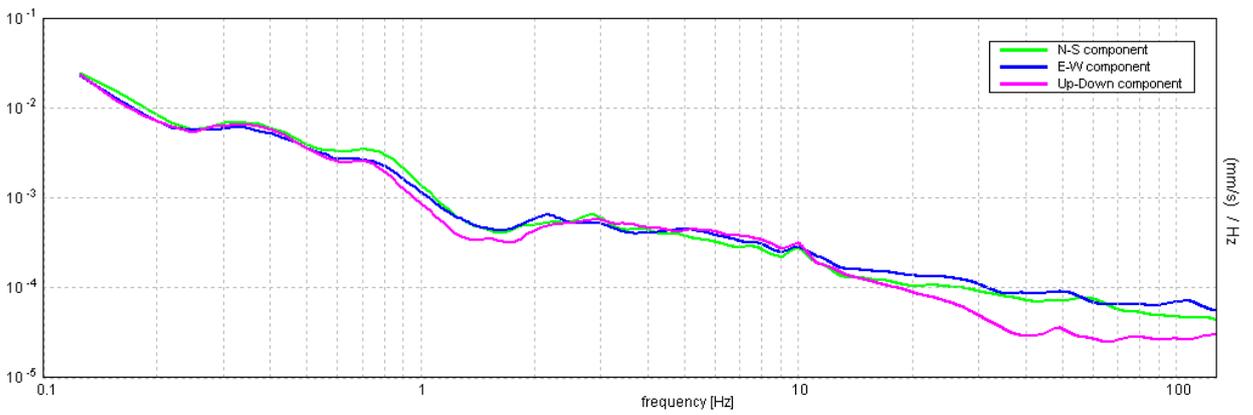
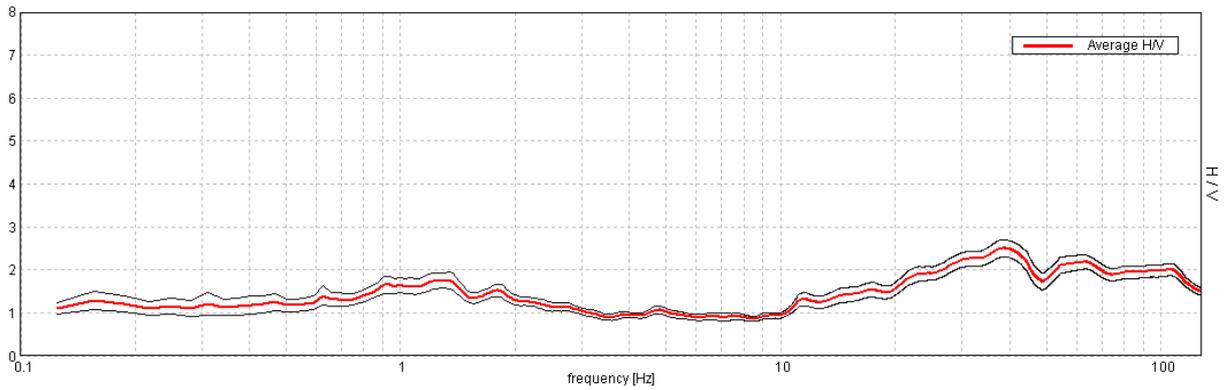


Max. H/V at 1.13 ± 0.09 Hz. Max. (N-S)/V: 103.75 ± 8.48 Hz. Max. (E-W)/V: 1.13 ± 0.14 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

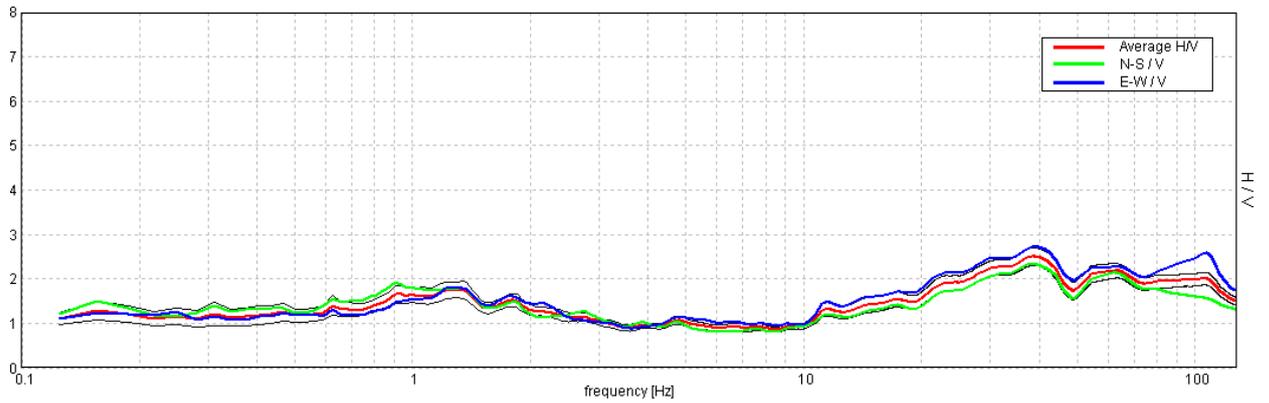


### Sondaggio tromografico T4

Max. H/V at 38.72 ± 4.96 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

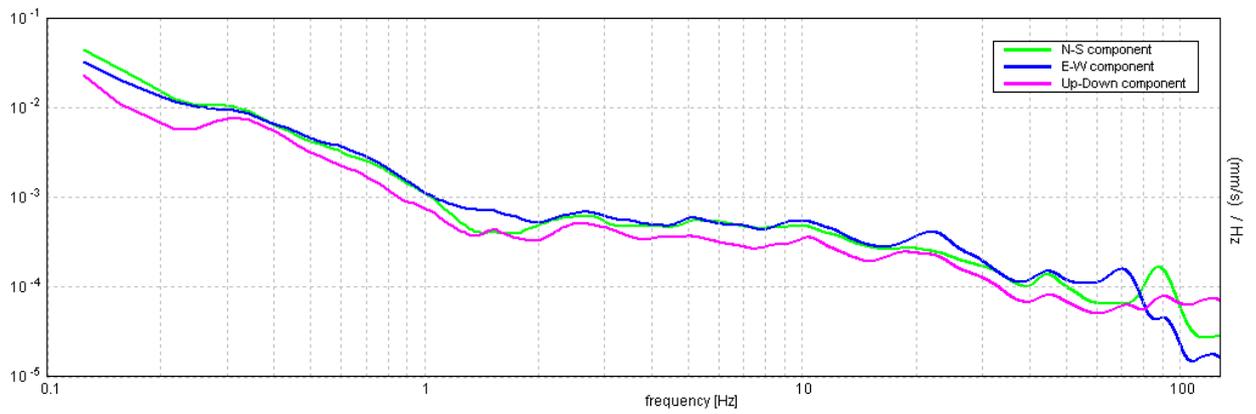
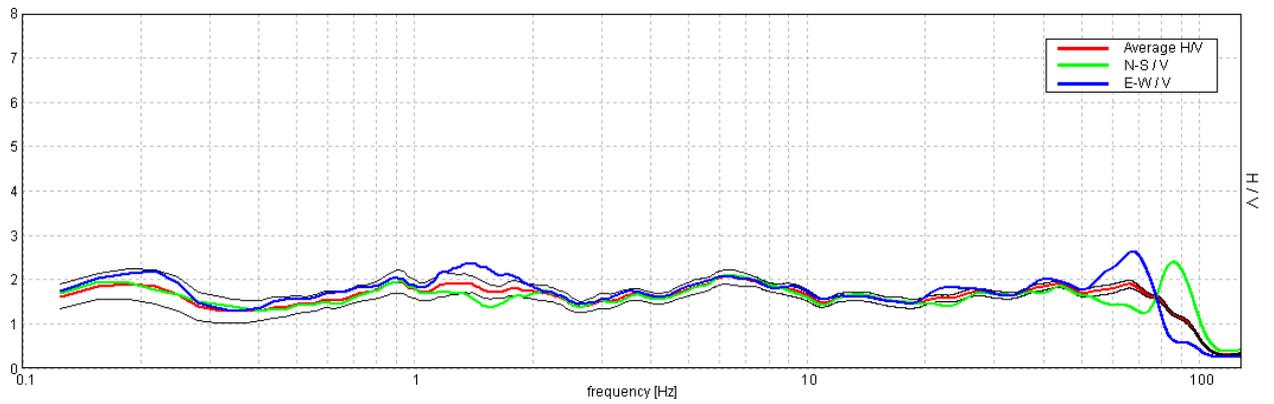


Max. H/V at 38.72 ± 4.96 Hz. Max. (N-S)/V: 38.44 ± 7.37 Hz. Max. (E-W)/V: 39.06 ± 13.61 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

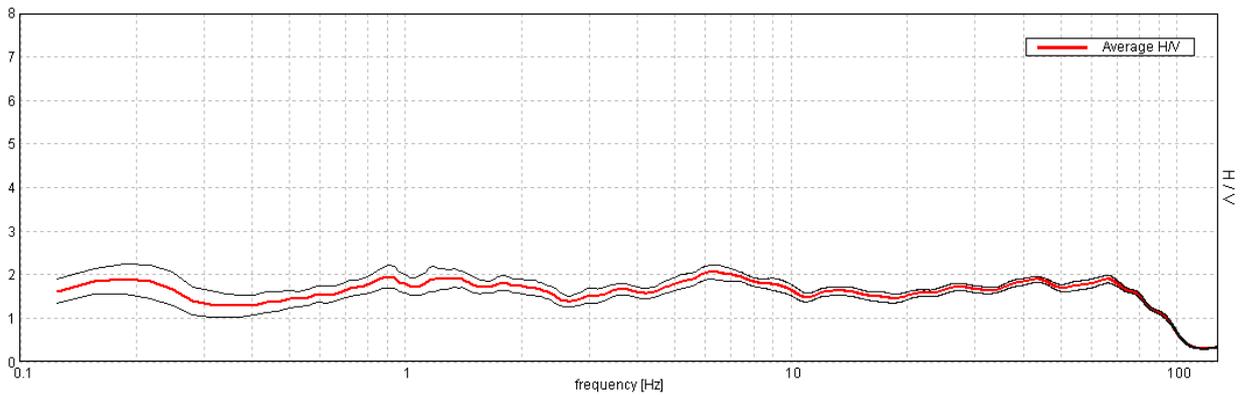


### Sondaggio tromografico T5

Max. H/V at 6.19 ± 0.86 Hz. Max. (N-S)/V: 85.94 ± 9.56 Hz. Max. (E-W)/V: 67.5 ± 5.51 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

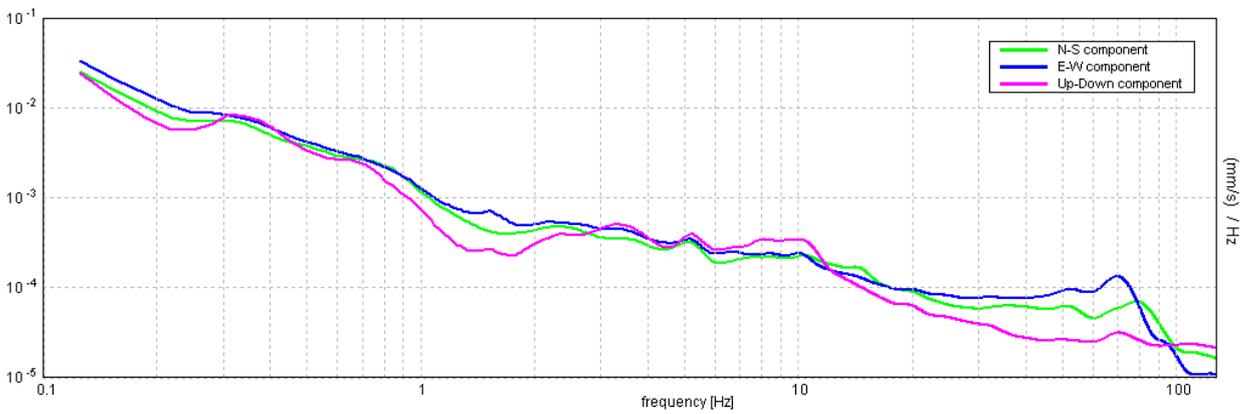
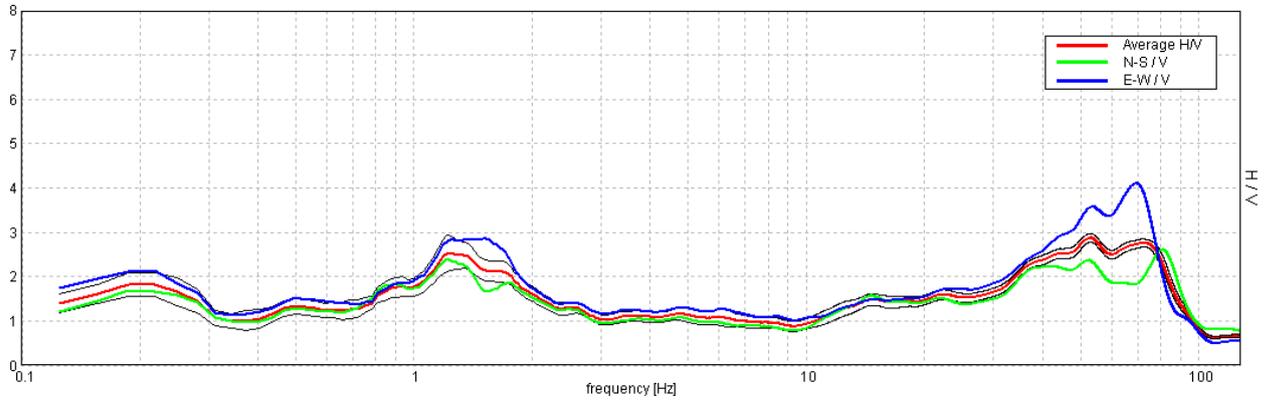


Max. H/V at 6.19 ± 0.86 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

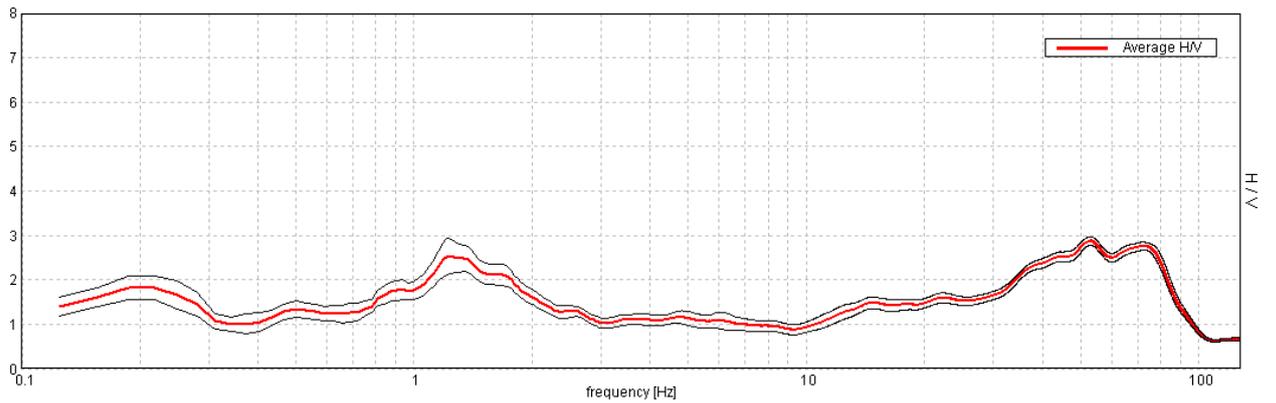


### Sondaggio tromografico T6

Max. HV at 53.09 ± 7.14 Hz. Max. (N-S)/V: 80.94 ± 14.44 Hz. Max. (E-W)/V: 69.38 ± 3.48 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

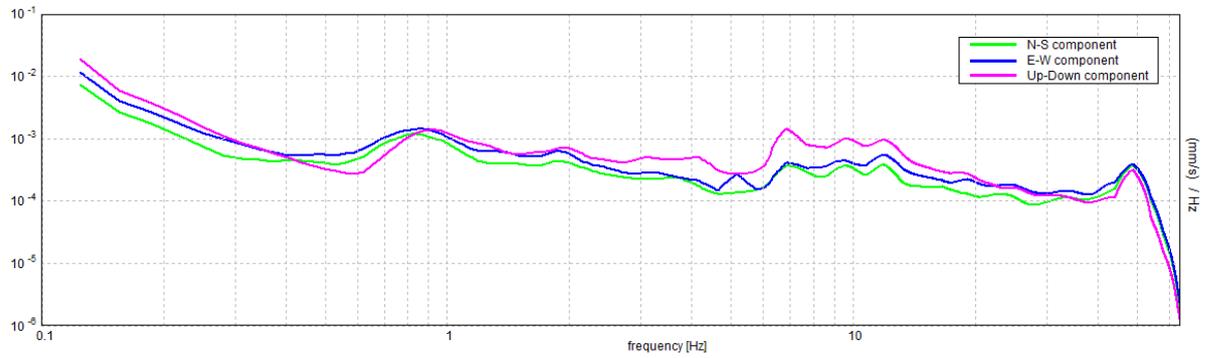
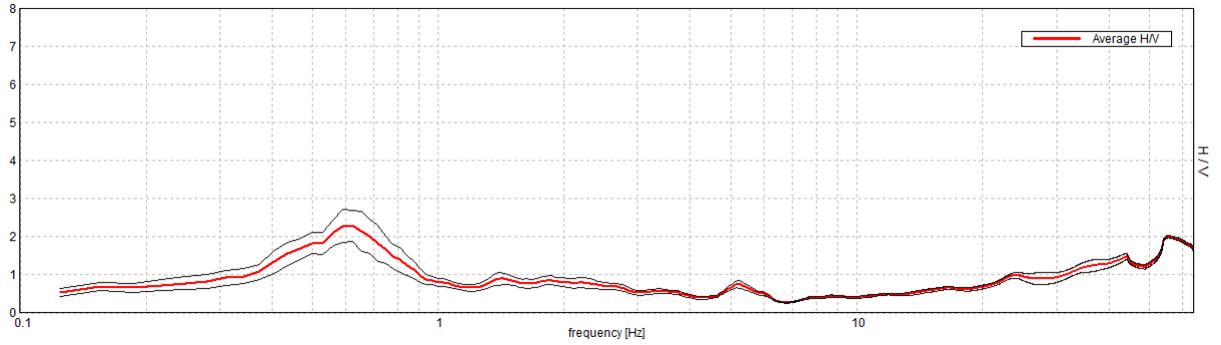


Max. HV at 53.09 ± 7.14 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).

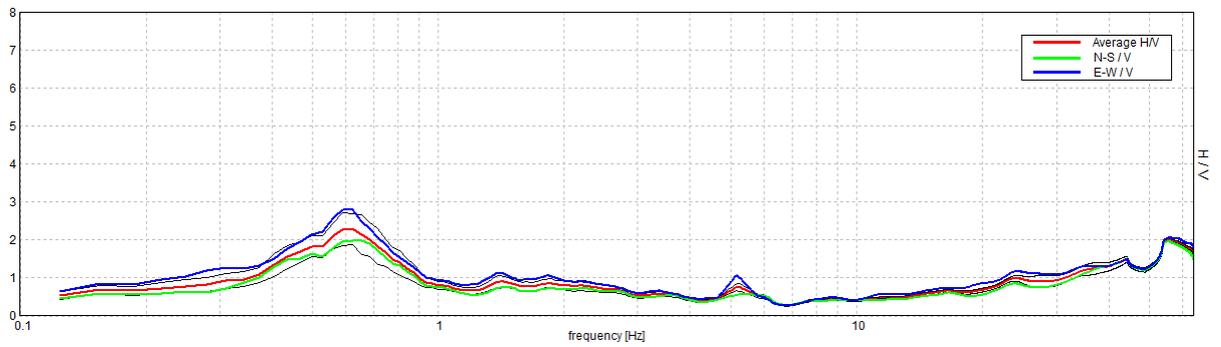


### Sondaggio tromografico T7

Max. H/V at  $0.63 \pm 10.33$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

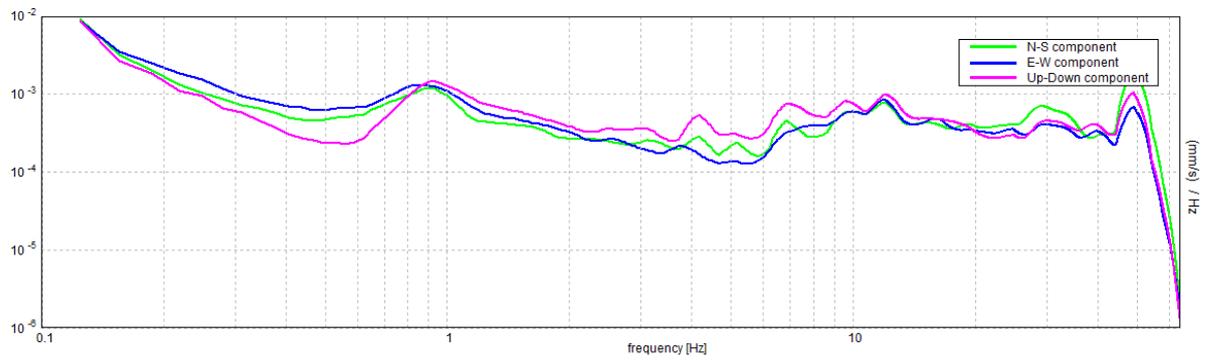
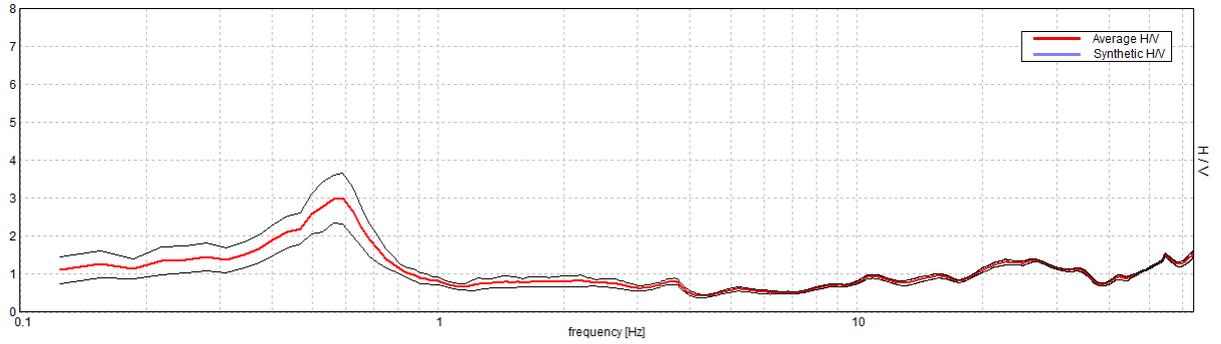


Max. H/V at  $0.63 \pm 10.33$  Hz. Max.(N-S)/V:  $0.63 \pm 26.51$  Hz. Max.(E-W)/V:  $0.63 \pm 10.72$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

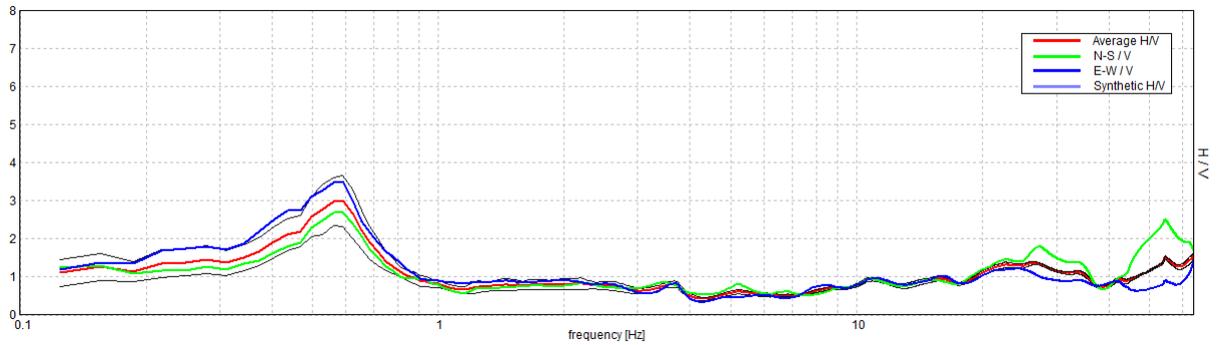


### Sondaggio tromografico T8

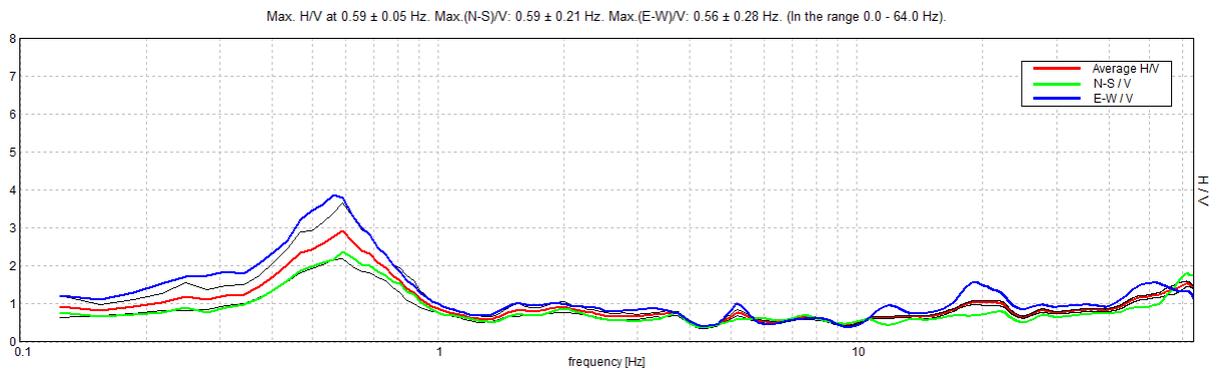
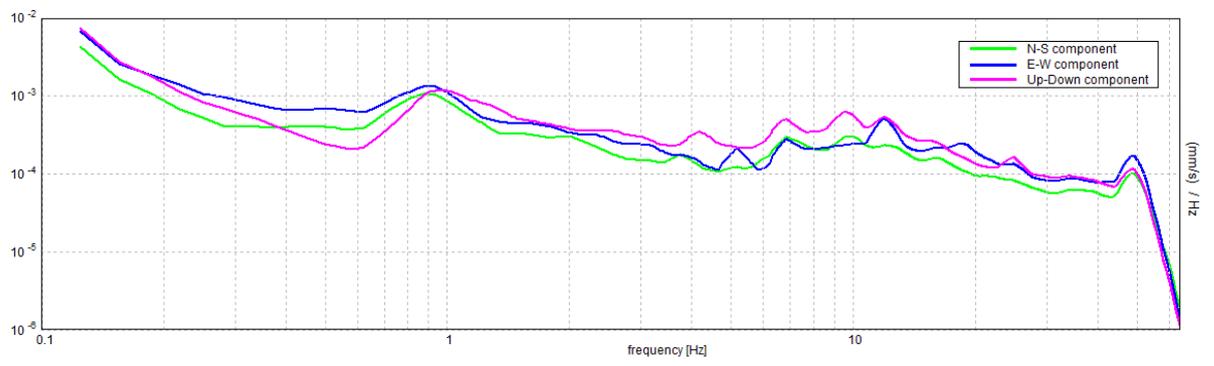
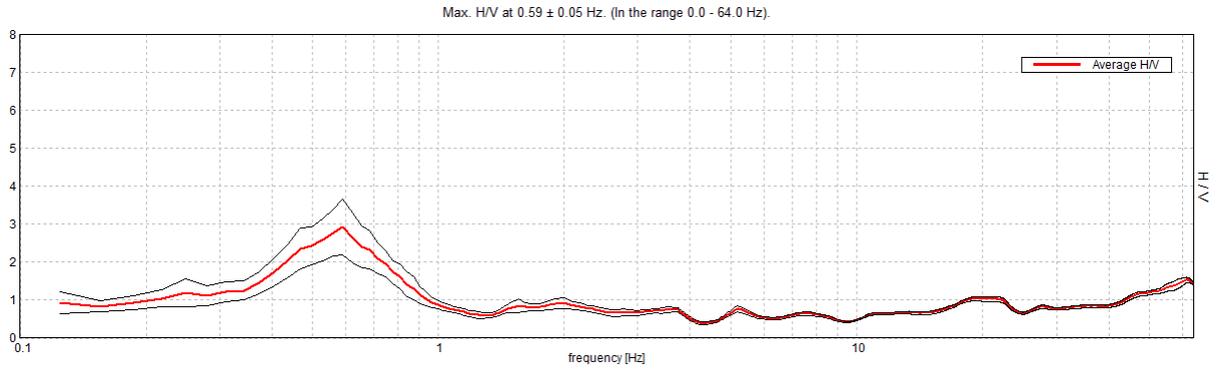
Max. H/V at  $0.59 \pm 0.06$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



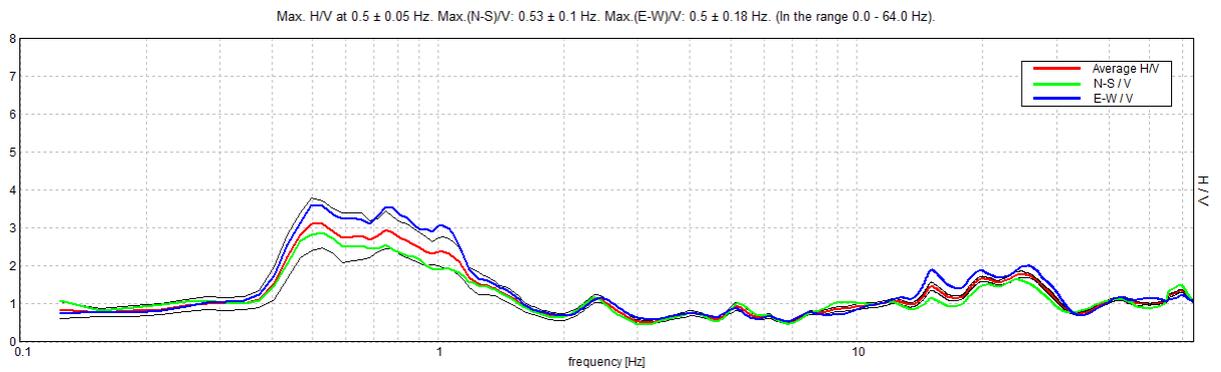
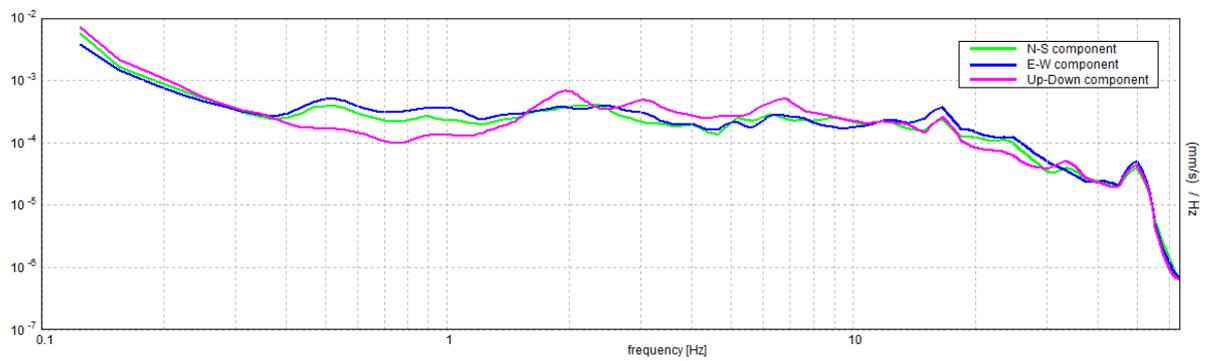
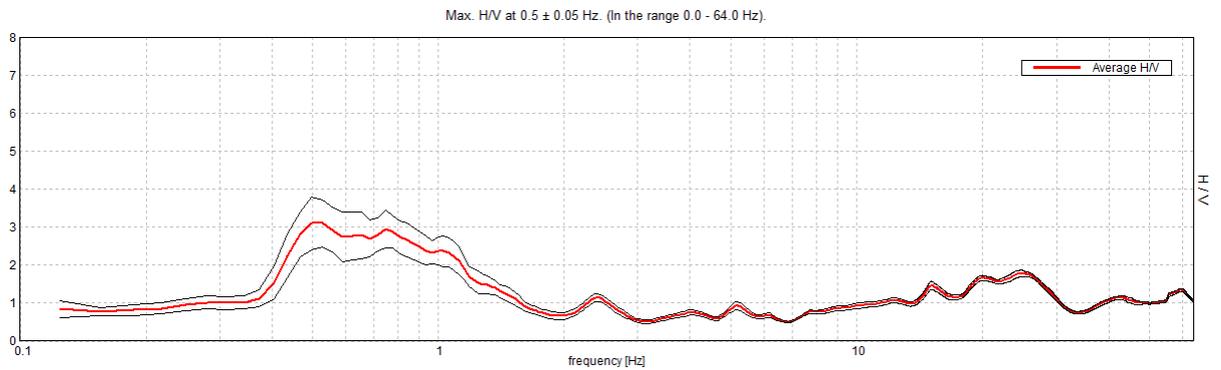
Max. H/V at  $0.59 \pm 0.06$  Hz. Max.(N-S)/V:  $0.56 \pm 28.22$  Hz. Max.(E-W)/V:  $0.59 \pm 0.23$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



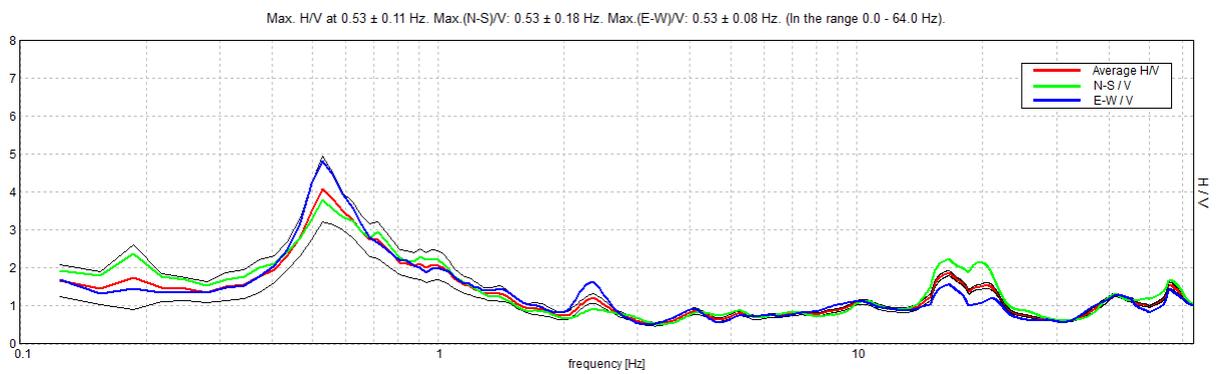
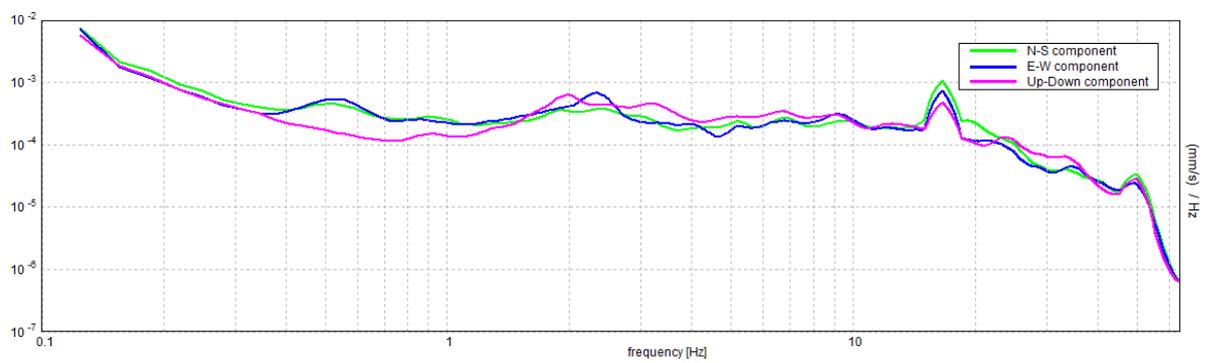
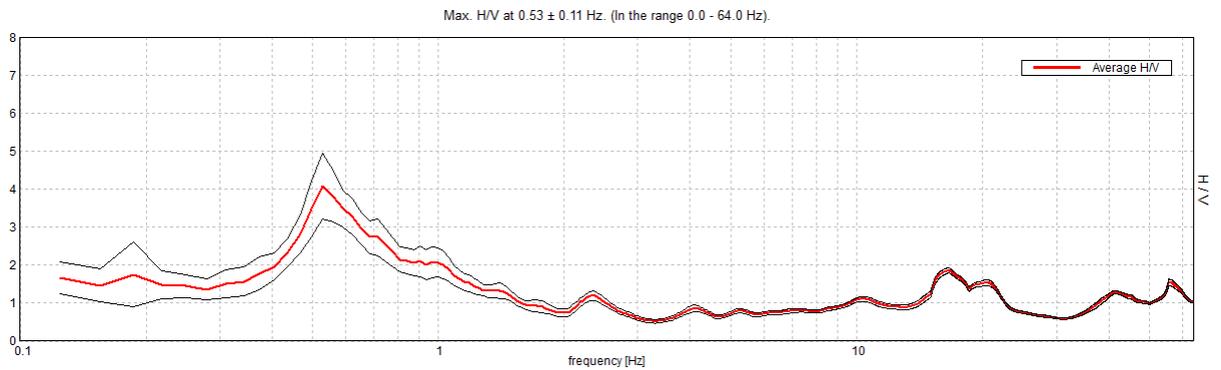
### Sondaggio tromografico T9



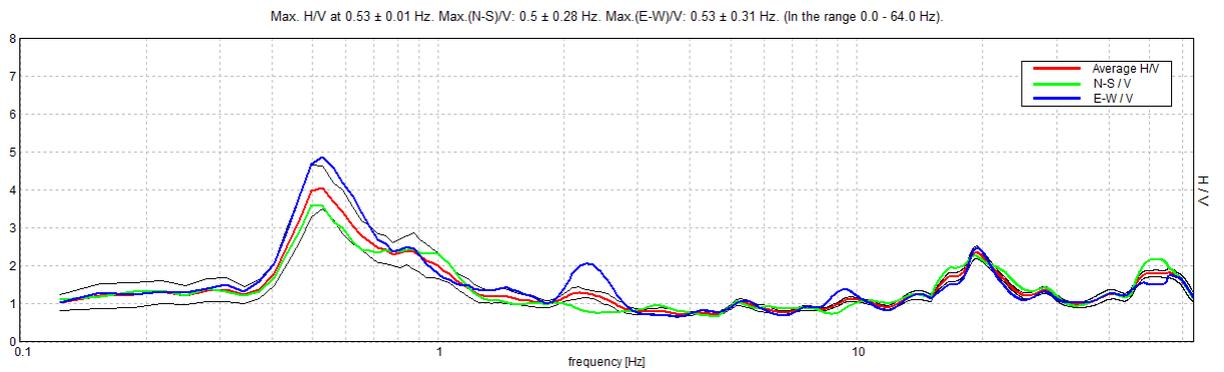
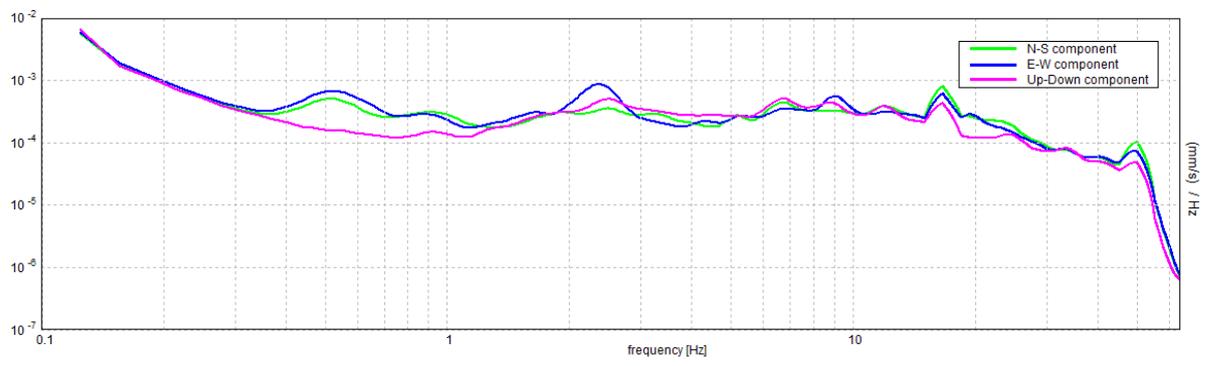
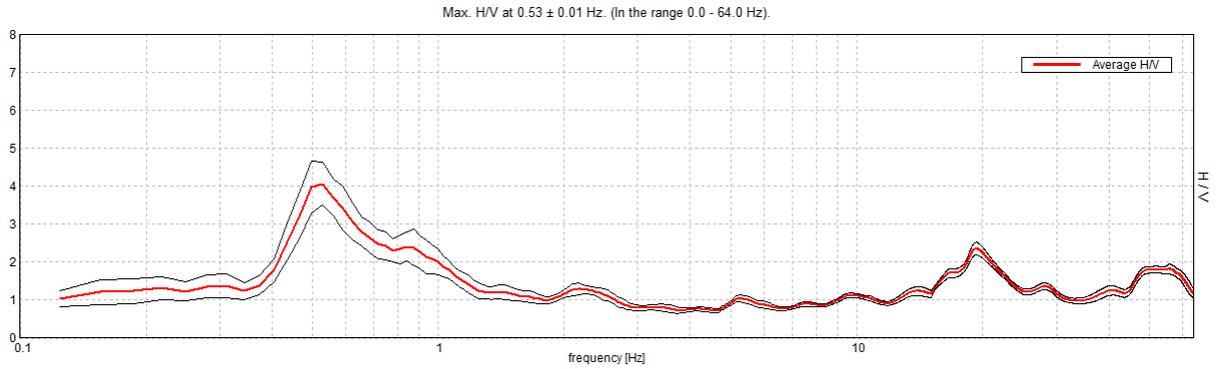
### Sondaggio tromografico T10



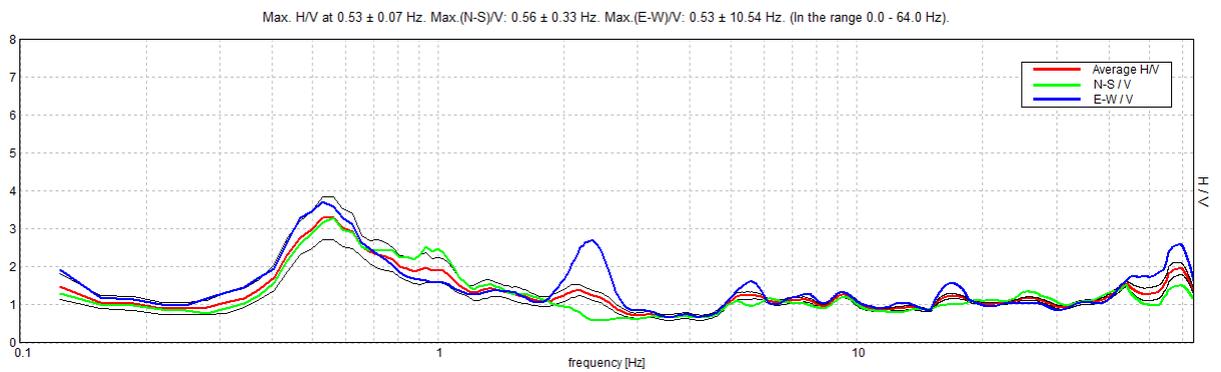
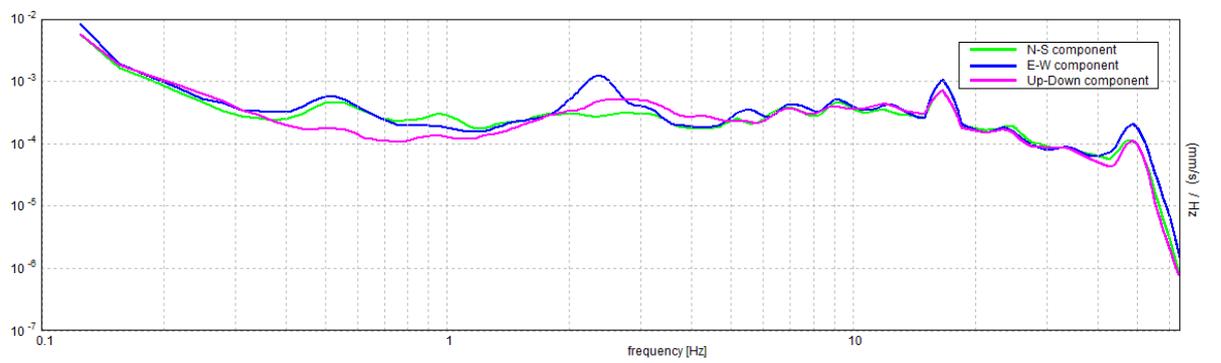
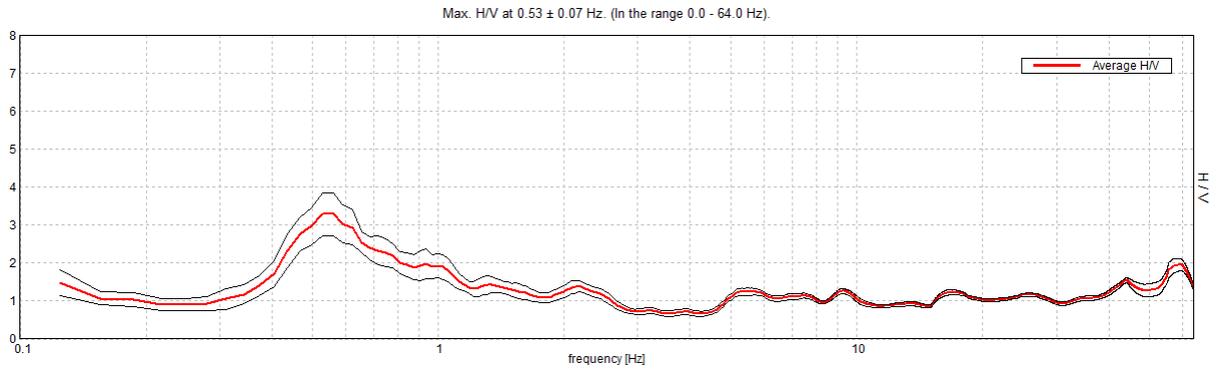
### Sondaggio tromografico T11



### Sondaggio tromografico T12



### Sondaggio tromografico T13



***Strumentazione utilizzata – Tromografo digitale - Micromed***



I dati sperimentali ricavate dalle indagini di sismica passiva a stazione singola permettono di ricavare una stima delle velocità delle onde di taglio  $V_s$ .

In generale, la frequenza di risonanza delle onde S che viaggiano all'interno di uno strato è legata al tempo di tragitto delle onde S nello strato stesso dalla relazione:

$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

Dove  $T_H$  è il tempo di tragitto dall'interfaccia risonante e  $f_r$  è la frequenza di risonanza.

A partire dalla formula precedente e conoscendo la profondità  $h$  dell'interfaccia risonante è definibile la velocità media delle onde S nella struttura risonante:

$$V = \frac{H}{T_H}$$

e

$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

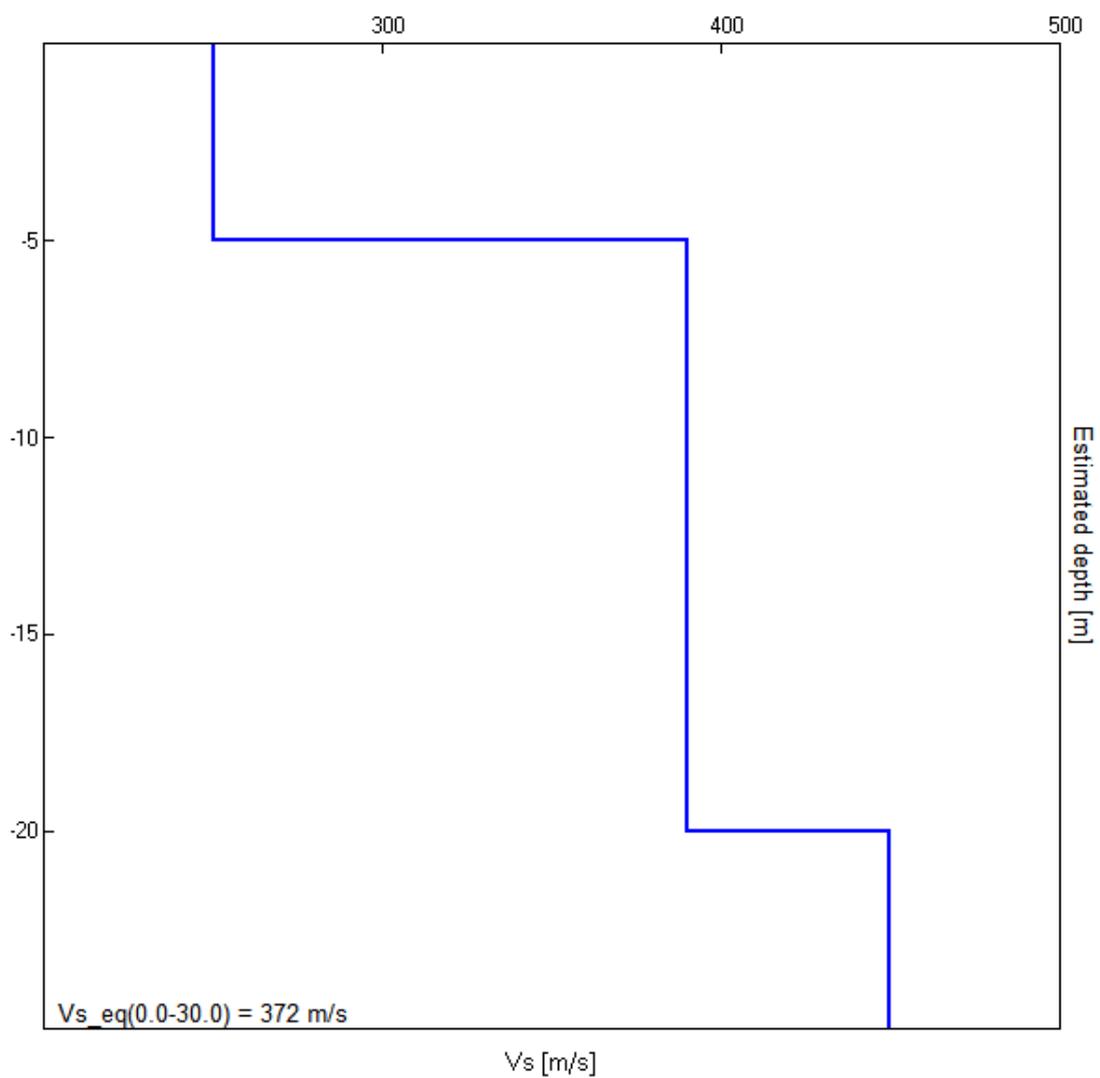
da cui si ricava

$$V = 4 f_r h$$

In allegato sono riportate, in dettaglio, le interpretazioni dei dati sperimentali ottenuti.

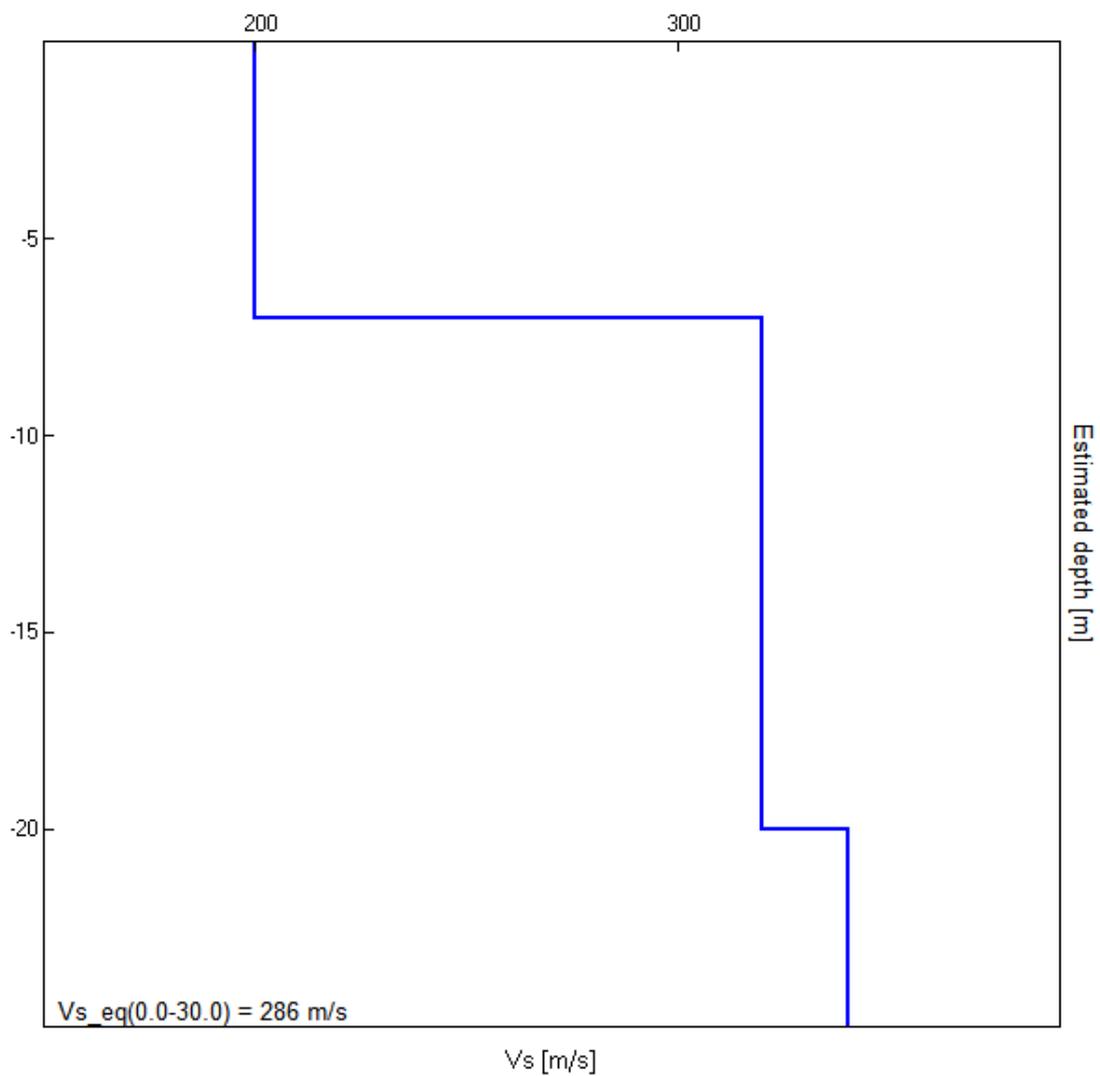
**Sondaggio tromografico T1**

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</b>	
0.00 – 5.00	250	C	<b>B</b> (Vs,eq= 372 m/s)
5.00 – 20.00	390	B	
20.00 – 30.00	430	B	



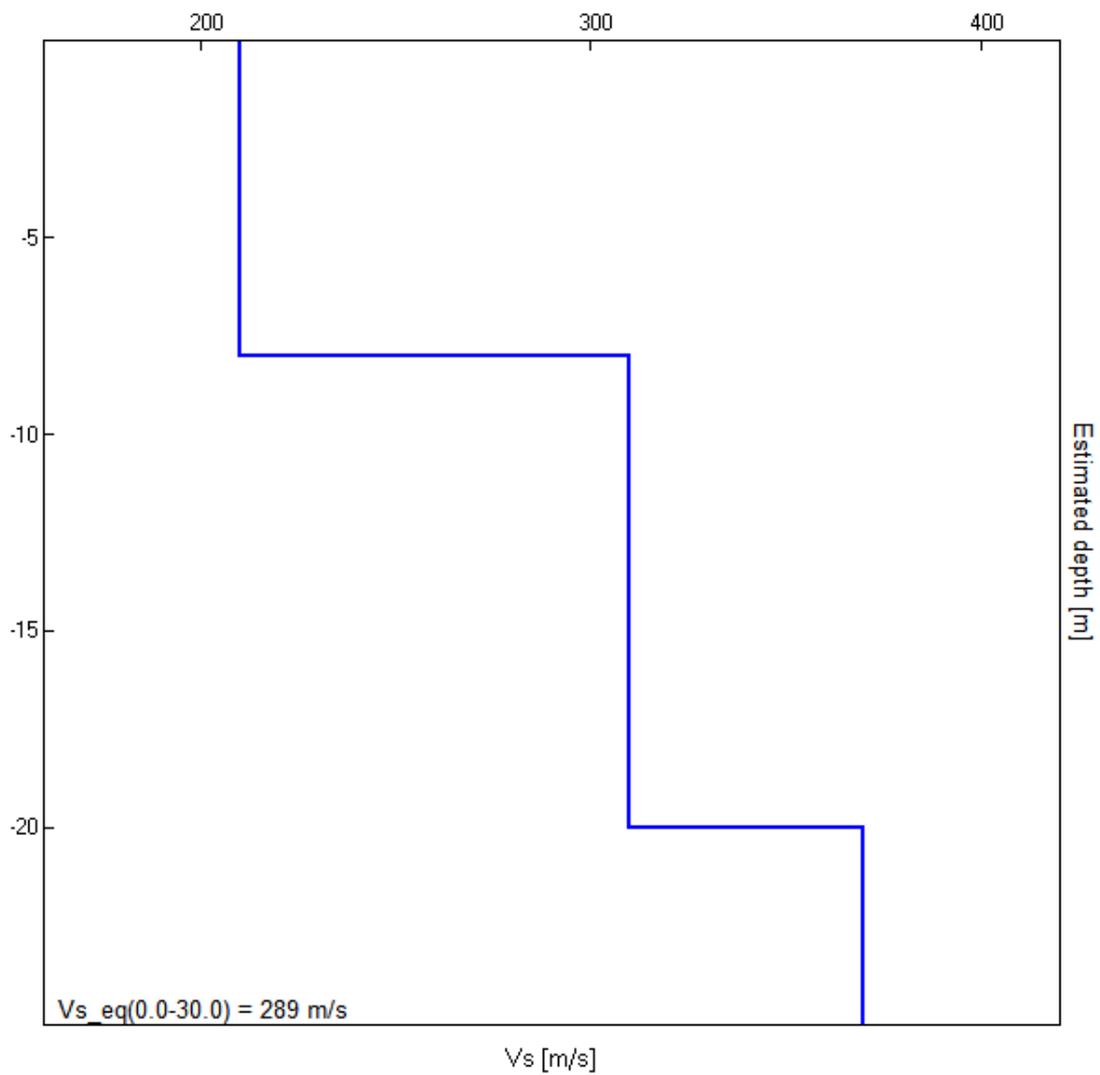
### Sondaggio tromografico T2

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 7.00	200	C	<b>C</b> (Vs,eq = 286 m/s)
7.00 – 20.00	320	C	
20.00 – 30.00	340	C	



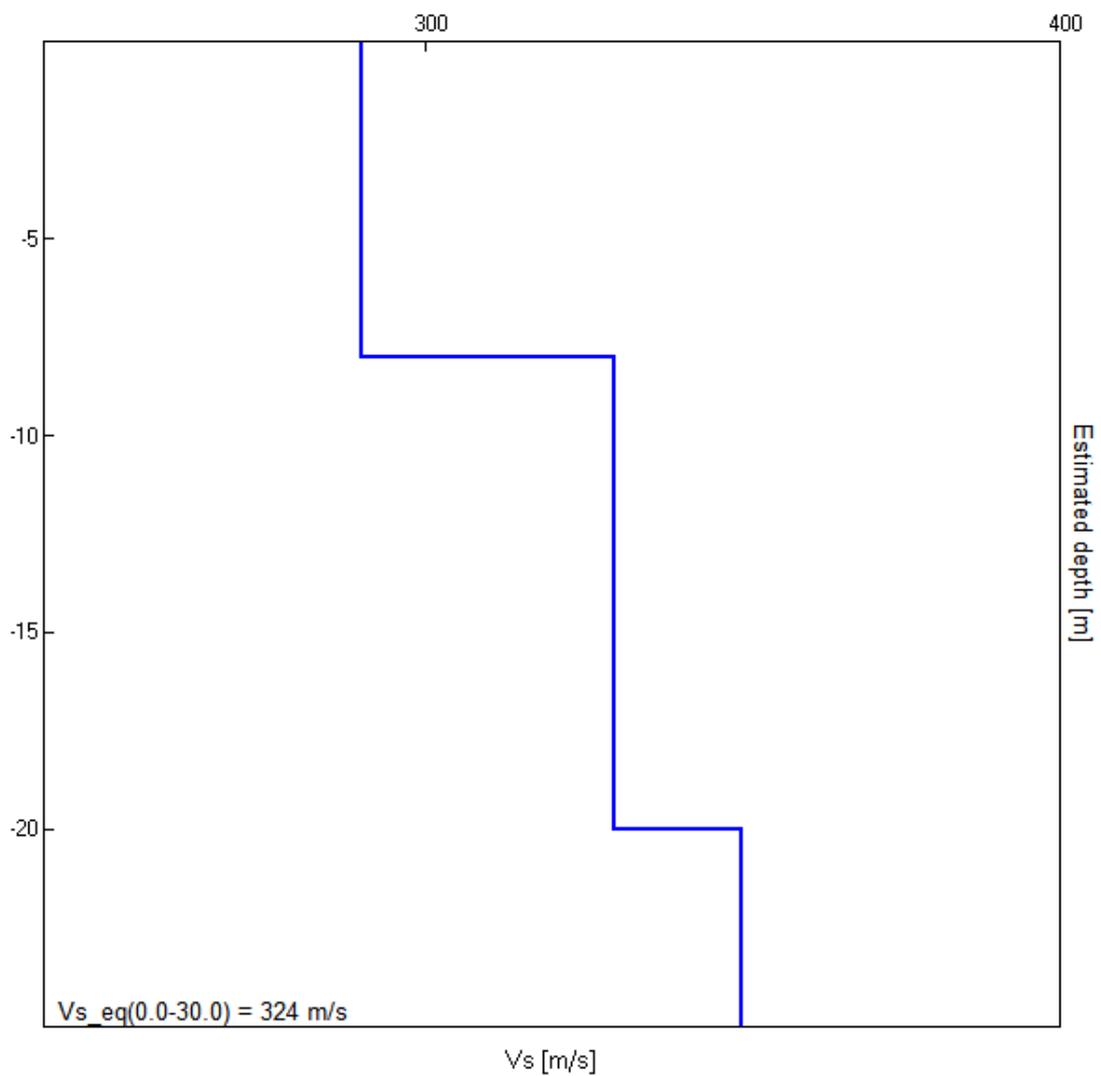
### **Sondaggio tromografico T3**

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</b>	
0.00 – 8.00	210	C	<b>C</b> (Vs,eq = 289 m/s)
8.00 – 20.00	310	C	
20.00 – 30.00	370	B	



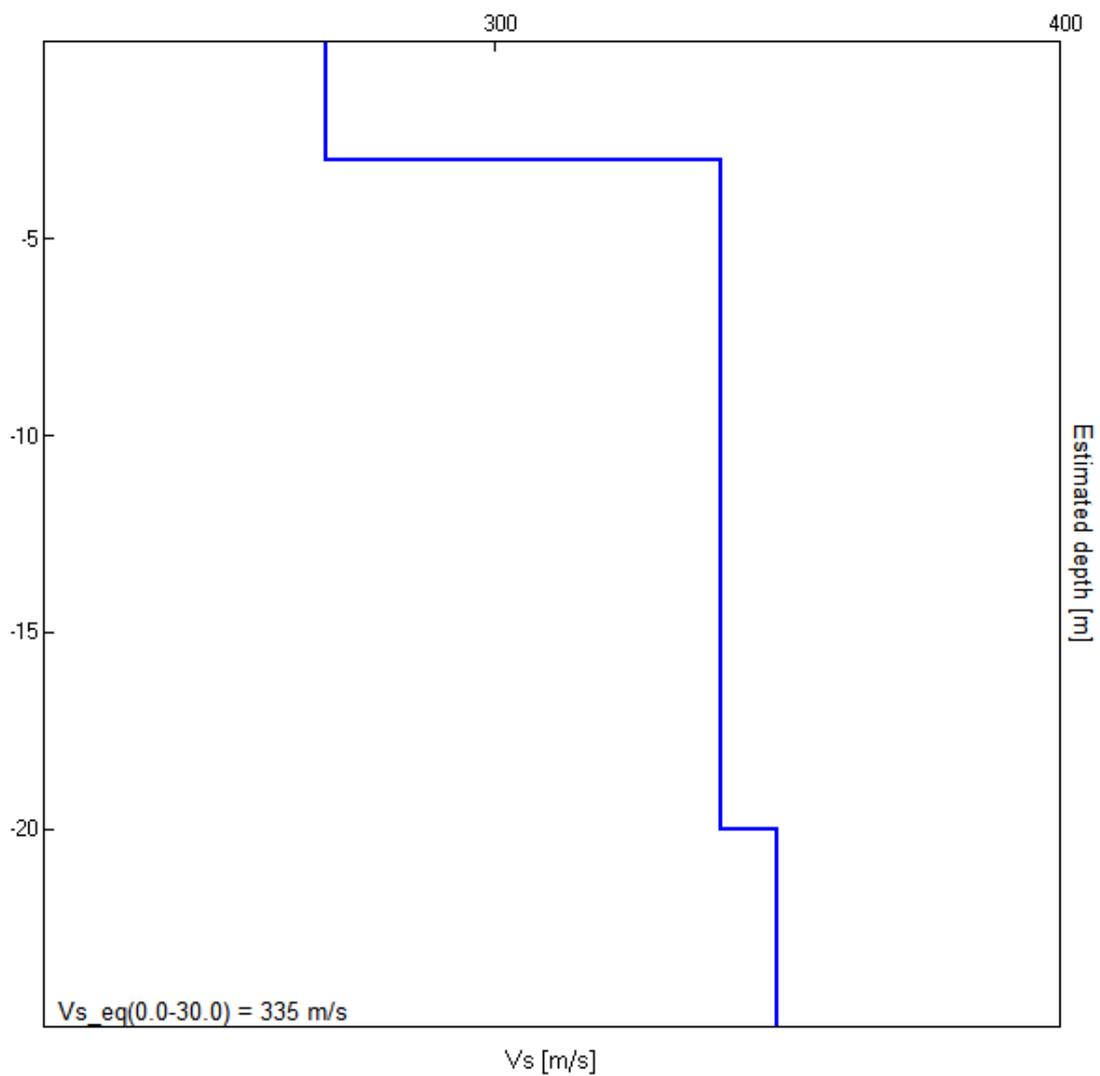
### Sondaggio tromografico T4

<i>Profondità (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>	<i>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</i>	
0.00 – 8.00	290	C	<b>C</b> (Vs,eq = 324 m/s)
8.00 – 20.00	330	C	
20.00 – 30.00	350	C	



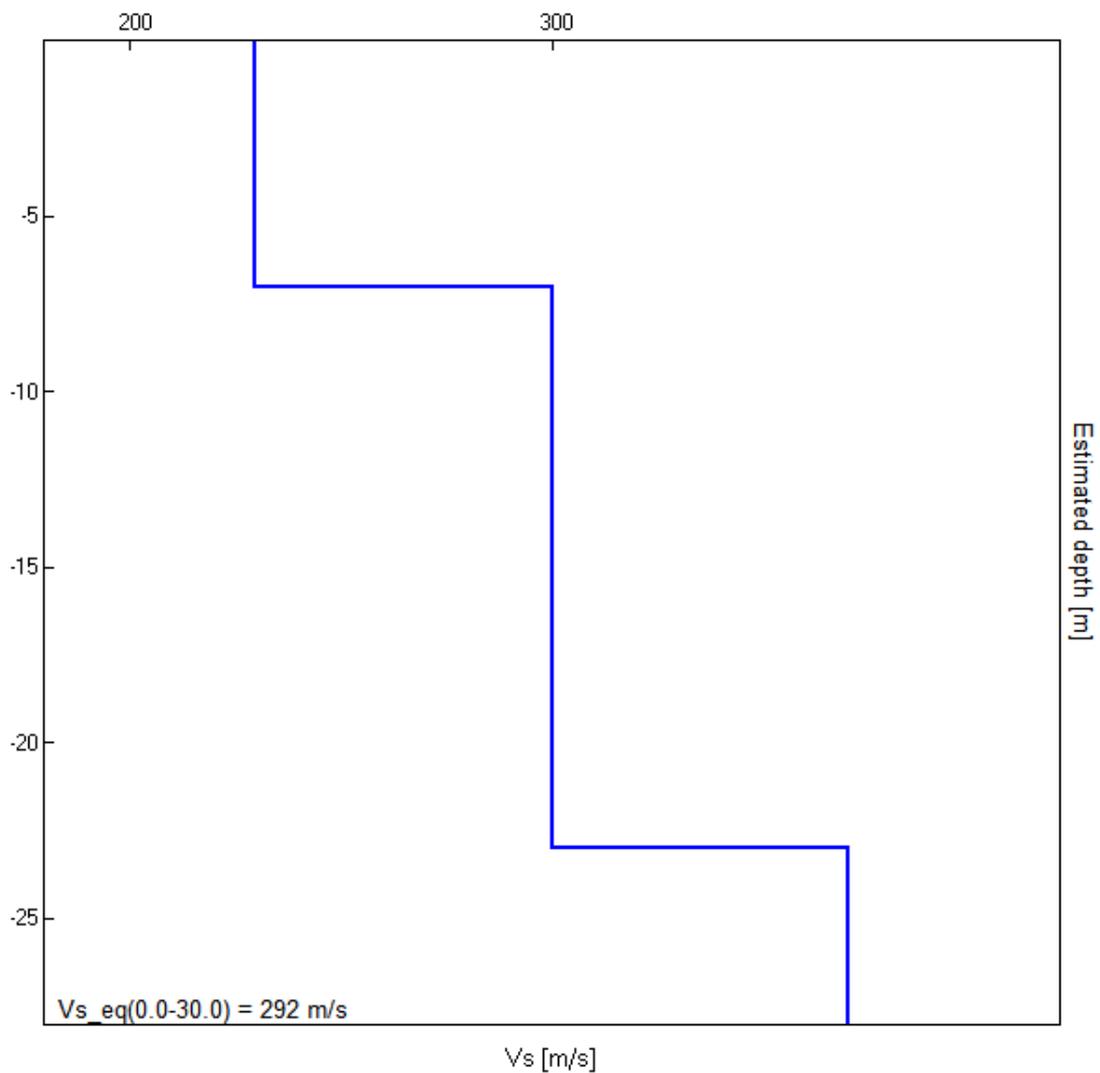
### Sondaggio tromografico T5

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 3.00	270	C	<b>C</b> (Vs,eq = 335 m/s)
3.00 – 20.00	340	C	
20.00 – 30.00	350	C	



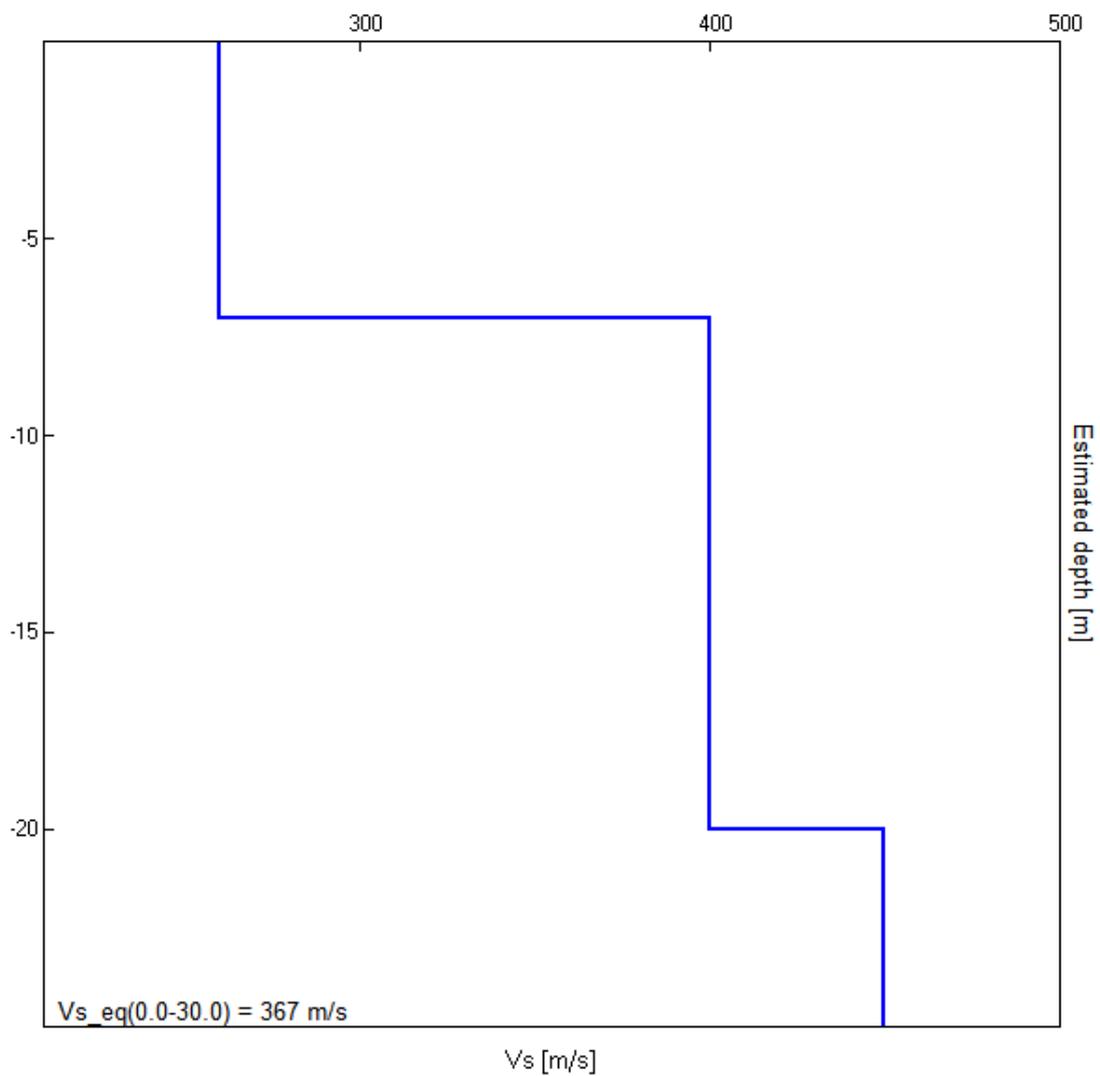
### Sondaggio tromografico T6

<i>Profondità (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>	<i>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</i>	
0.00 – 7.00	230	C	<b>C</b> (Vs,eq = 292 m/s)
7.00 – 23.00	300	B	
23.00 – 30.00	370	B	



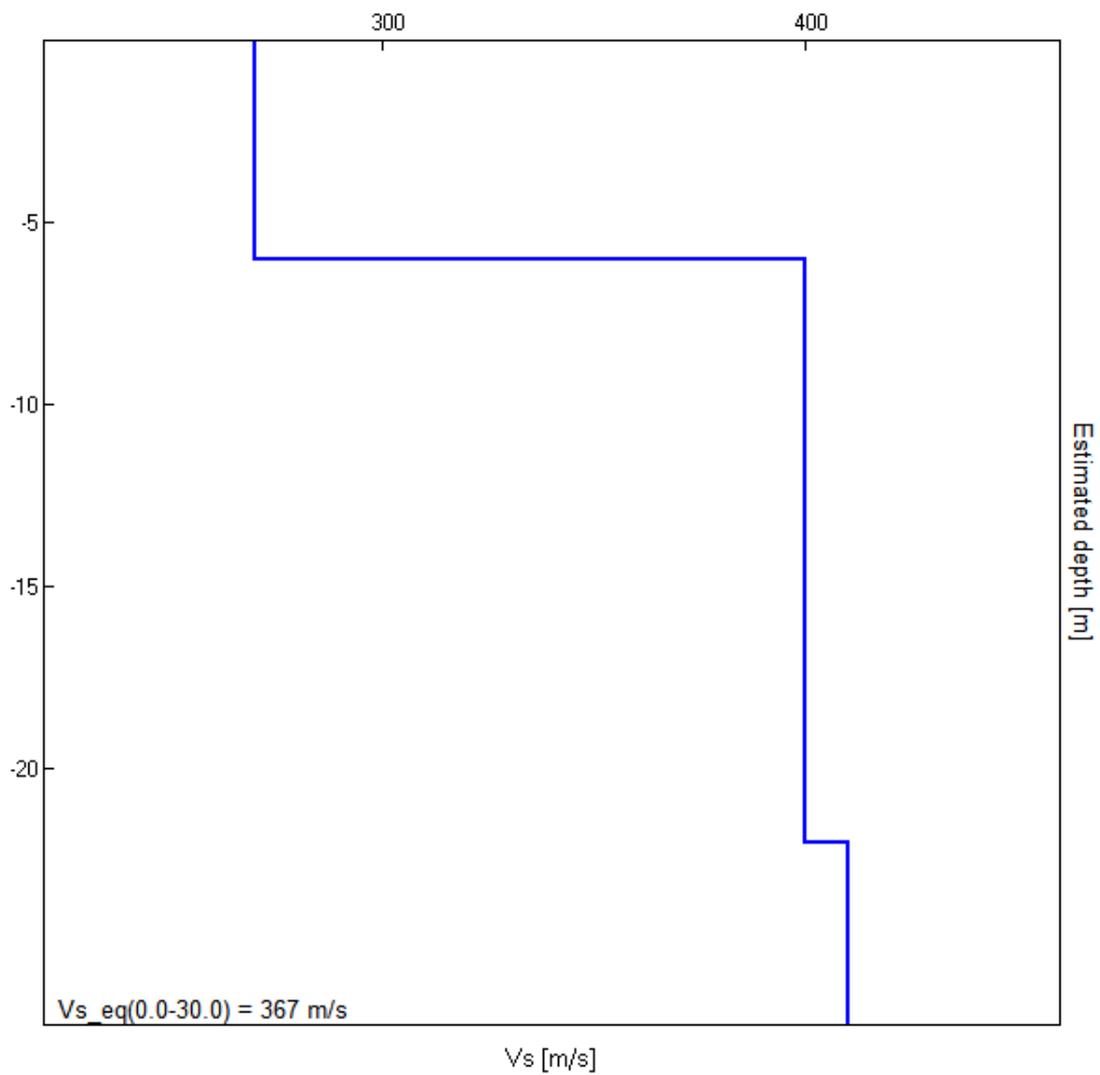
### Sondaggio tromografico T7

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 7.00	260	C	<b>B</b> (Vs,eq = 367 m/s)
7.00 – 20.00	400	B	
20.00 – 30.00	450	B	



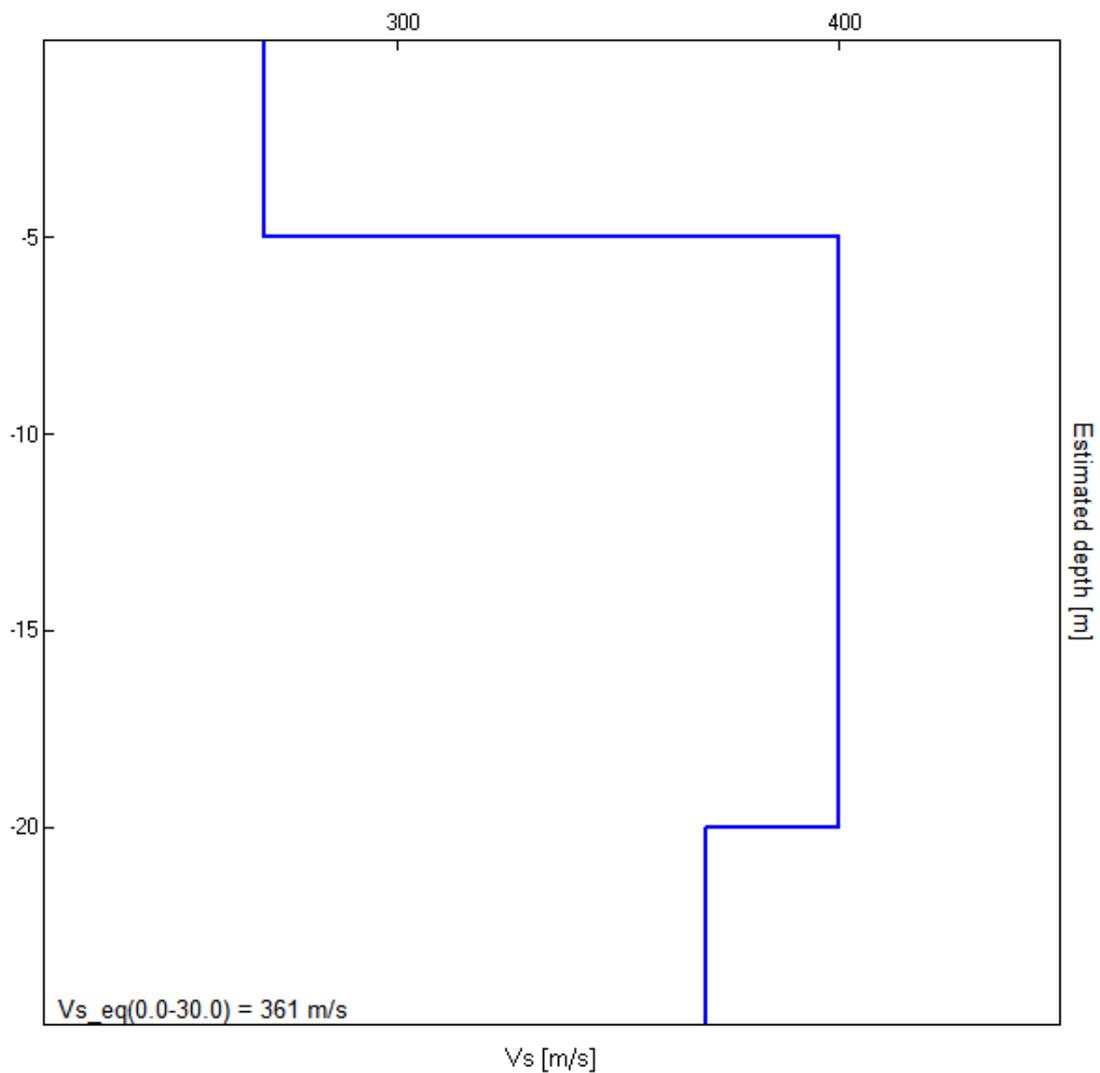
### Sondaggio tromografico T8

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 6.00	270	C	<b>B</b> (Vs,eq = 367 m/s)
7.00 – 22.00	400	B	
22.00 – 30.00	410	B	



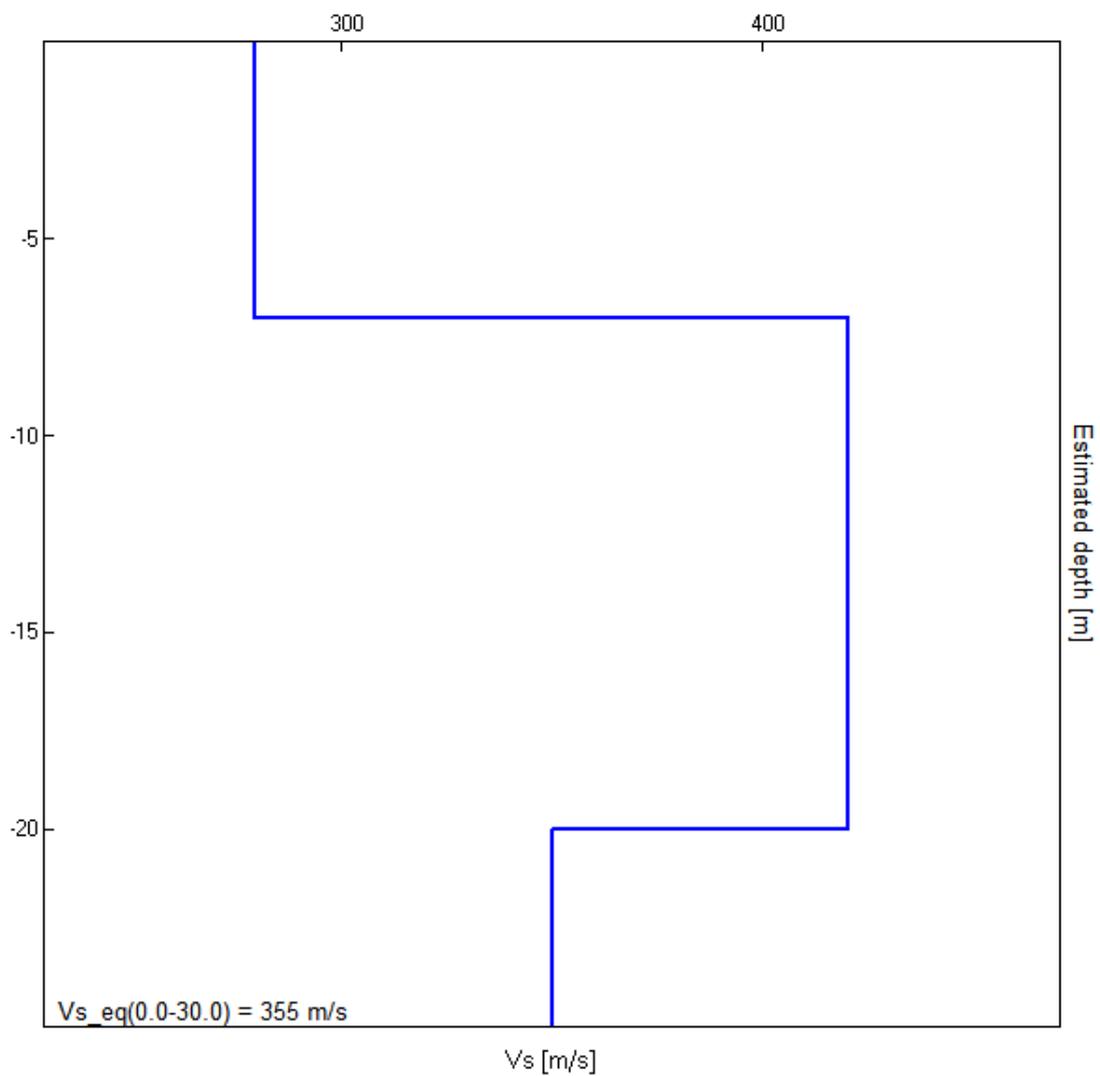
### Sondaggio tromografico T9

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 5.00	270	C	<b>B</b> (Vs,eq = 361 m/s)
5.00 – 20.00	400	B	
20.00 – 30.00	370	B	



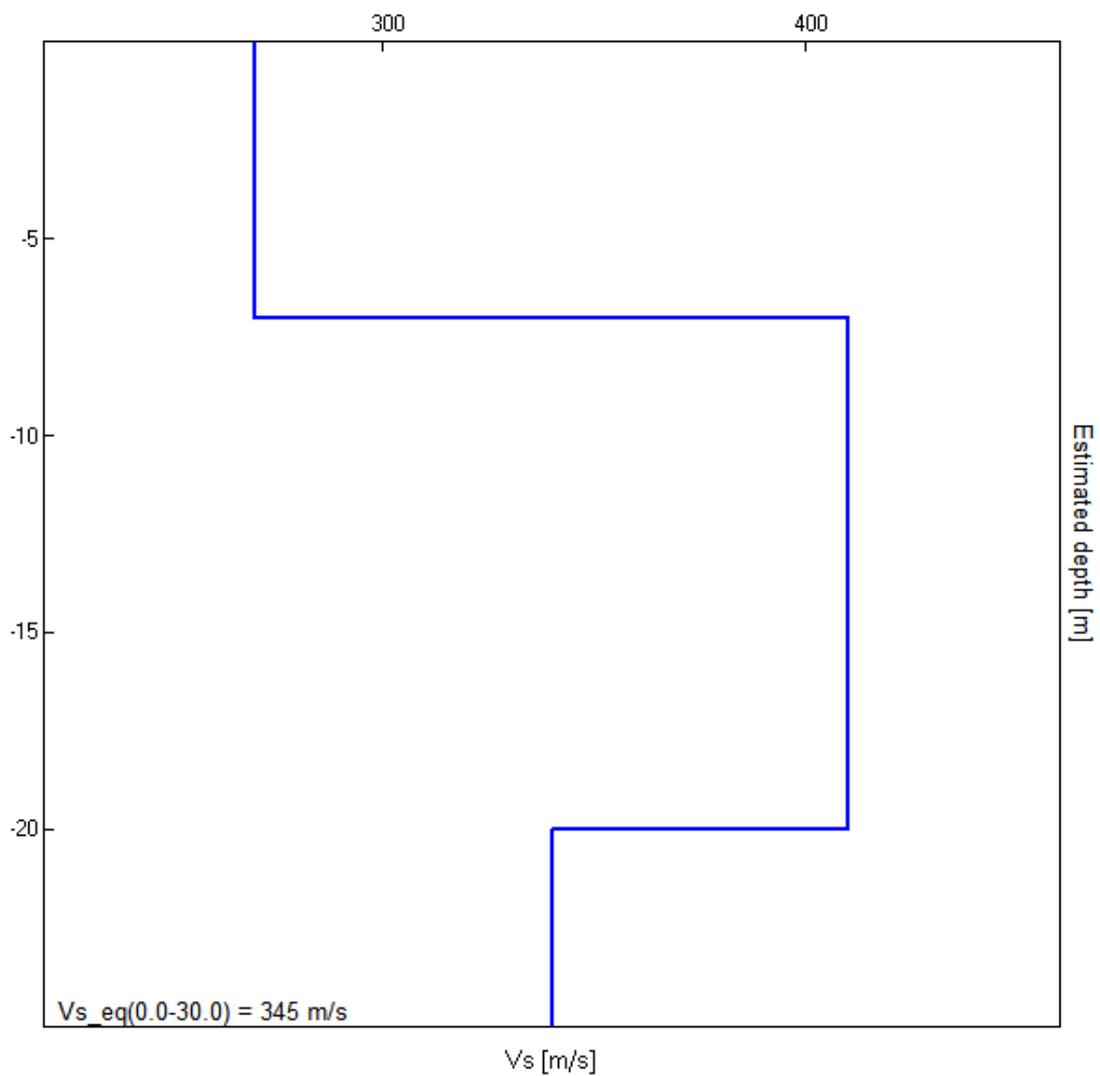
**Sondaggio tromografico T10**

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</b>	
0.00 – 7.00	280	C	<b>C</b> (Vs,eq = 355 m/s)
7.00 – 20.00	420	B	
20.00 – 30.00	350	C	



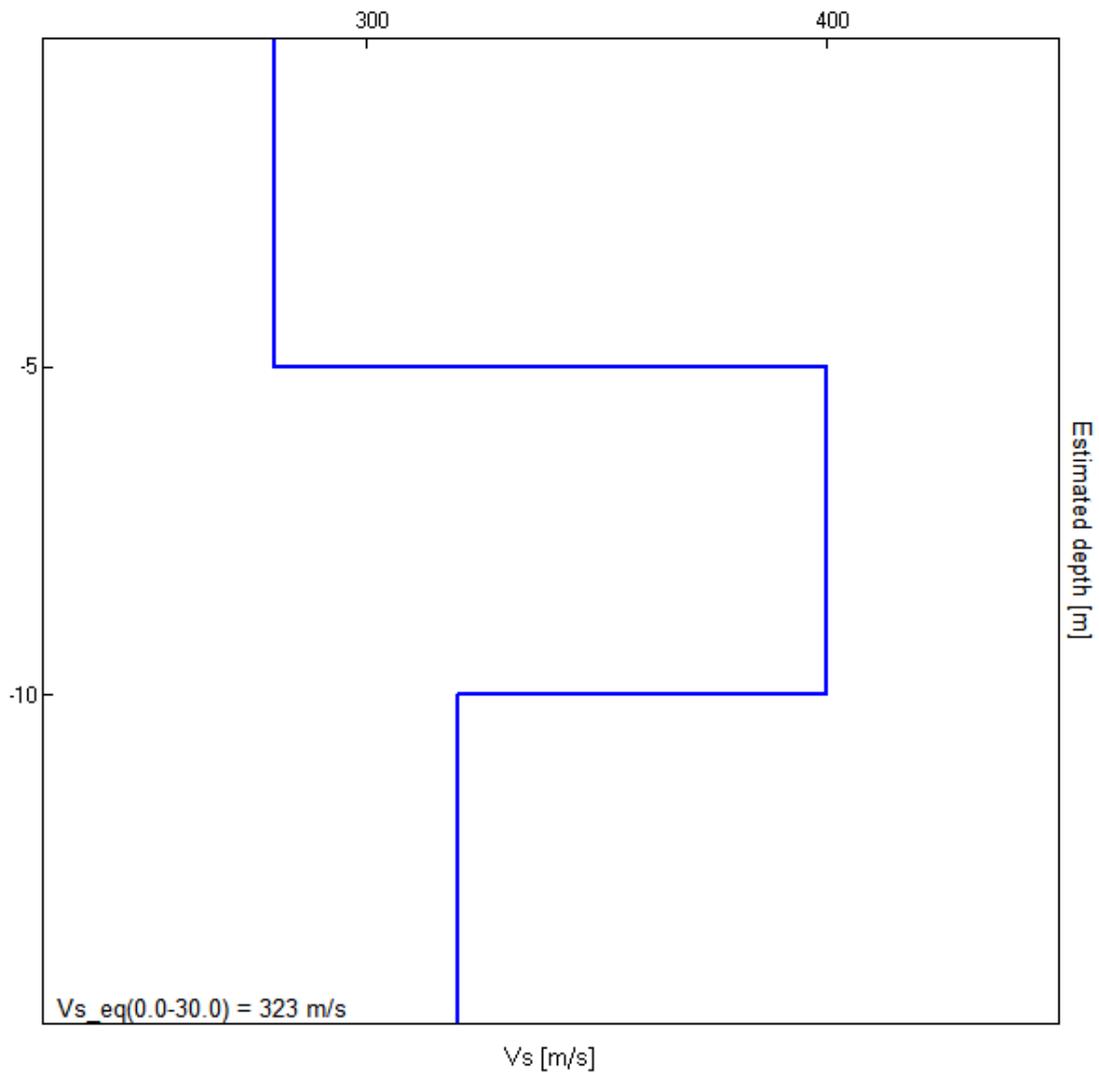
### Sondaggio tromografico T11

<i>Profondità (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>	<i>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</i>	
0.00 – 7.00	270	C	<b>C</b> (Vs,eq = 345 m/s)
7.00 – 20.00	410	B	
20.00 – 30.00	340	C	



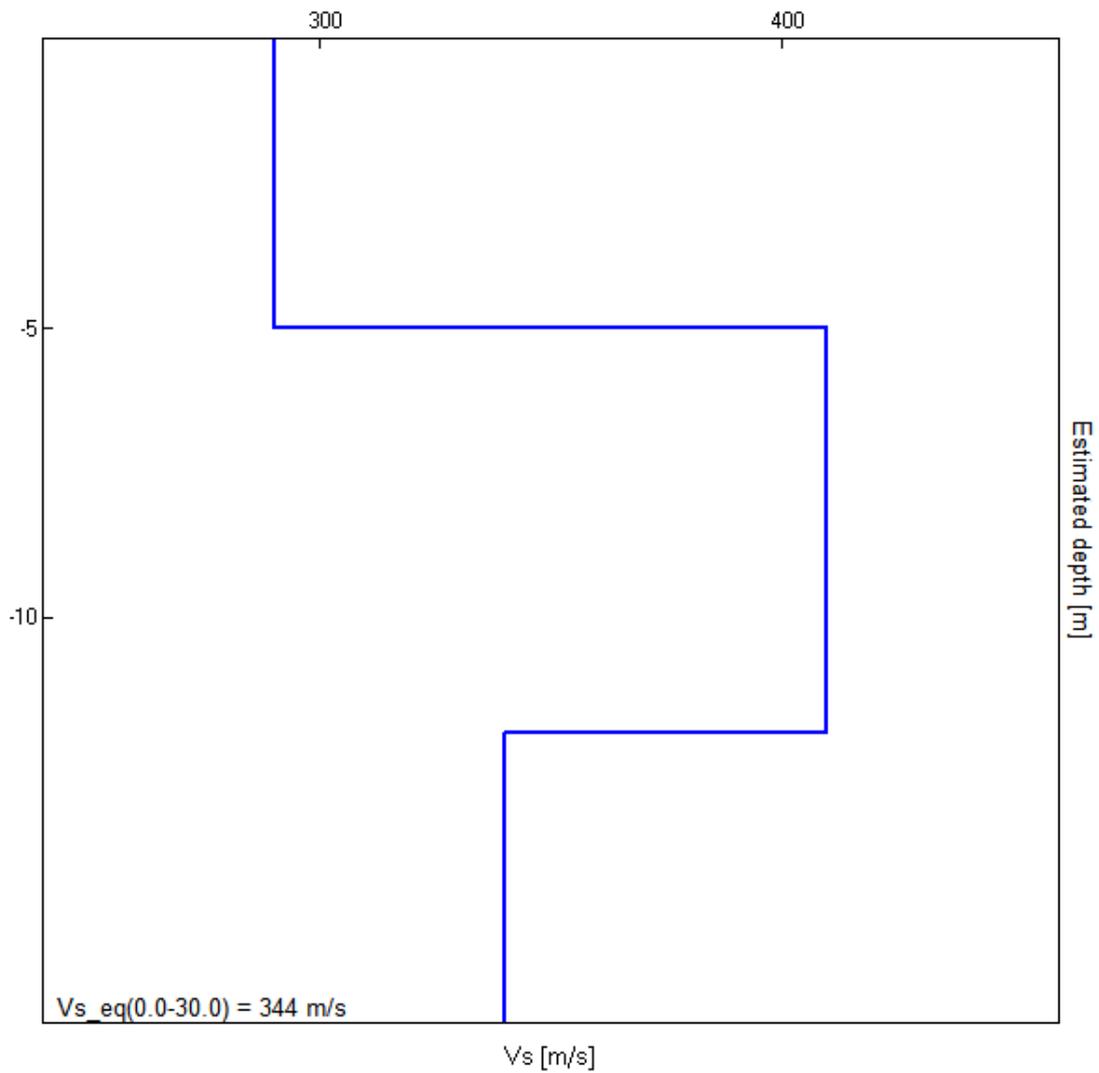
**Sondaggio tromografico T12**

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</b>	
0.00 – 5.00	280	C	<b>C</b> (Vs,eq = 323 m/s)
5.00 – 10.00	400	B	
10.00 – 30.00	320	C	



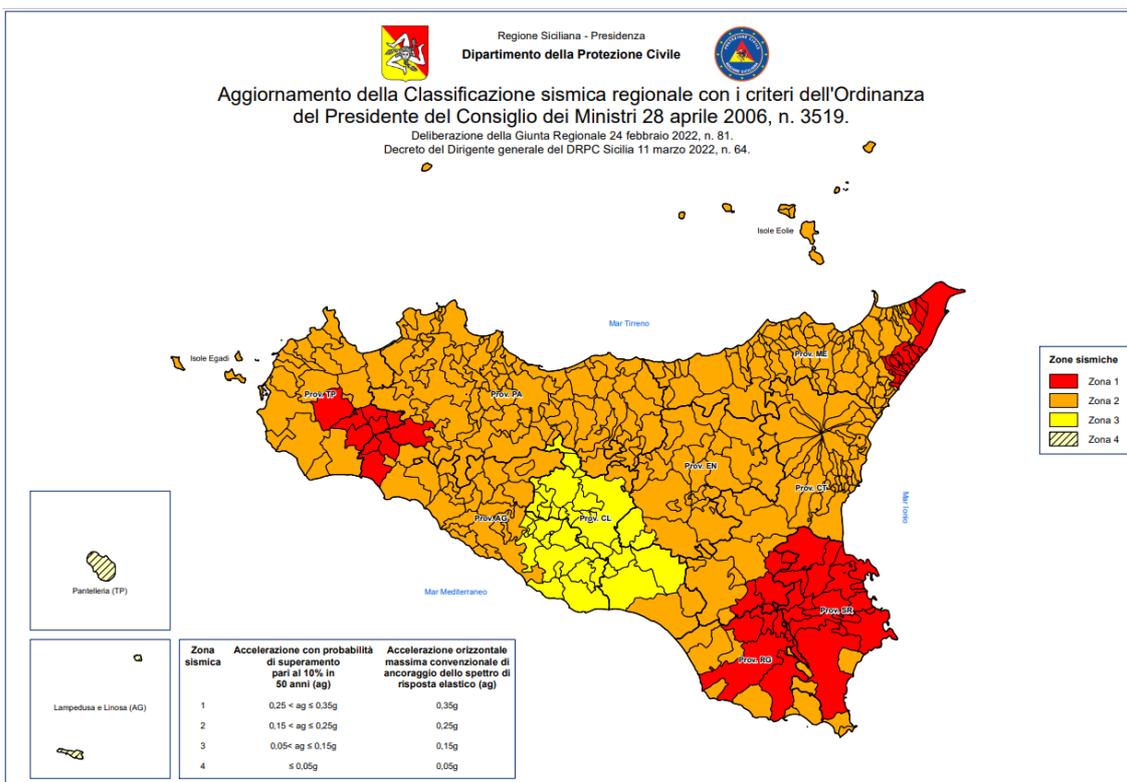
**Sondaggio tromografico T13**

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018</b>	
0.00 – 5.00	290	C	<b>C</b> (Vs,eq = 344 m/s)
5.00 – 12.00	410	B	
12.00 – 30.00	340	C	



## 6. CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO

Il territorio del Comune di Piazza Armerina e di Mazzarino, in cui si trova l'area oggetto di intervento progettuale, a seguito di aggiornamento della classificazione sismica del territorio regionale della Sicilia con Decreto del Dirigente Generale del DRPC Sicilia dell'11 marzo 2022, n. 64 ricadono rispettivamente in zona sismica 2 e 3.



Gli studi, eseguiti in Italia nelle zone dell'Irpinia e del Friuli, hanno evidenziato notevoli differenze di effetti da zona a zona nell'ambito di brevi distanze, associate a differenti morfologie dei siti o a differenti situazioni geologiche e geotecniche dei terreni.

Risulta di grande interesse, quindi, la valutazione del livello di rischio sismico regionale e locale cui sono esposti il territorio e gli insediamenti umani.

Tale valutazione non va limitata solo agli aspetti prima richiamati, ovvero morfologici, geologico-strutturali e litologici dei terreni, ma estesa ed associata alla probabilità del manifestarsi del fenomeno, alla sua intensità e distanza della sorgente sismogenetica dal sito.

Grande importanza, infine, assume la conoscenza delle tecnologie e tecniche costruttive utilizzate per la realizzazione dei manufatti e dello stato di conservazione, dai quali dipende il comportamento delle strutture nei confronti delle sollecitazioni dinamiche indotte dal sisma.

Dettagliate caratterizzazioni sismiche del territorio o, meglio, valutazioni della risposta dinamica locale, inserite nel più ampio problema della zonizzazione sismica del territorio, presentano difficoltà legate soprattutto alla quantità dei dati che tale caratterizzazione richiederebbe, al momento non disponibili, ed ai notevoli costi necessari.

Sembra opportuno soffermarsi, però, su alcuni aspetti di carattere generale riguardanti la tematica in oggetto, utili all'inquadramento del “problema sismico”.

La propagazione delle onde sismiche verso la superficie è influenzata dalla deformabilità dei terreni attraversati.

Per tale ragione gli accelerogrammi registrati sui terreni di superficie possono differire notevolmente da quelli registrati al tetto della formazione di base, convenzionalmente definita come substrato nel quale le onde di taglio, che rappresentano la principale causa di trasmissione degli effetti delle azioni sismiche verso la superficie, si propagano con velocità maggiori o uguali a 1.000 m/sec.

Si può osservare in generale che nel caso in cui la "formazione di base" sia ricoperta da materiali poco deformabili e approssimativamente omogenei (es. calcari e calcareniti) gli accelerogrammi che si registrano al

tetto della formazione di base non differiscono notevolmente da quelli registrati in superficie: inoltre in tale caso lo spessore dei terreni superficiali non influenza significativamente la risposta dinamica locale.

Nel caso in cui la formazione di base è ricoperta da materiali deformabili, gli accelerogrammi registrati sulla formazione ed in superficie possono differire notevolmente, in particolare le caratteristiche delle onde sismiche vengono modificate in misura maggiore all'aumentare della deformabilità dei terreni.

La trasmissione di energia dal bed-rock verso la superficie subisce trasformazioni tanto più accentuate quanto più deformabili sono i terreni attraversati; all'aumentare della deformabilità alle alte frequenze di propagazione corrispondono livelli di energia più bassi e viceversa a frequenze più basse corrispondono livelli di energia più alti.

Il valore del periodo corrispondente alla massima accelerazione cresce quanto la rigidità dei terreni diminuisce; nel caso di rocce sciolte tale valore aumenta anche all'aumentare della potenza dello strato di terreno.

Di particolare importanza è, inoltre, lo studio dei contatti stratigrafici in affioramento soprattutto tra terreni a risposta sismica differenziata.

Ai sensi del D.M. 17/01/2018, dai dati delle indagini sismiche in nostro possesso ed eseguite nell'ambito di questo lavoro i terreni presenti appartengono:

- in corrispondenza degli aerogeneratori WTG2, WTG3, WTG4, WTG5, WTG6, WTG10, WTG11, WTG12 e WTG13 ***Categoria C - “Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento***

***delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”.***

- in corrispondenza degli aerogeneratori WTG1, WTG7, WTG8 e WTG9 alla ***Categoria B “Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.***

Ai fini della corretta valutazione sito-specifica della categoria sismica di suolo si ritiene indispensabile che il geologo incaricato nelle successive fasi di progettazione esegua specifiche indagini sismiche per ogni singolo sub parco ai sensi del D.M. 17/01/2018.

## **7. CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE DA ESEGUIRE IN FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA**

Fermo restando che il piano di indagini sottoindicato sarà individuato in modo definitivo prima della redazione della progettazione esecutiva utile per la realizzazione dell'impianto, sulla base di un'analisi preliminare si ritiene opportuno eseguire, nelle successive fasi di progettazione, le indagini di seguito elencate.

In corrispondenza di ciascun aerogeneratore:

- ✓ n. 1 sondaggio a carotaggio continuo ciascuno di profondità pari a 40 mt. dal p.c. con installazione di piezometro a tubo aperto;
- ✓ prelievo di n. 3 campioni indisturbati, per ciascun sondaggio, sui quali eseguire le prove geotecniche in laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica;
- ✓ n. 6 S.P.T. in foro per ciascun sondaggio;
- ✓ esecuzione di n. 10 prove granulometriche in laboratorio per lo studio del potenziale di liquefazione per ciascun sondaggio;
- ✓ n. 1 indagine di sismica attiva “Masw” in ciascun aerogeneratore.

In corrispondenza della sottostazione:

- ✓ n. 1 sondaggi a carotaggio continuo ciascuno di profondità pari a 20 mt. dal p.c. con installazione di piezometro a tubo aperto;
- ✓ prelievo di n. 2 campioni indisturbati sui quali eseguire le prove geotecniche in laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica;
- ✓ n. 4 S.P.T. in foro;
- ✓ esecuzione di n. 10 prove granulometriche in laboratorio per lo studio del potenziale di liquefazione;

*Studio Gaetano Bordone*  
*Relazione geologica e di compatibilità geomorfologica– Progetto per la realizzazione di un impianto eolico denominato Parco delle Vittorie, sito nel territorio comunale di Piazza Armerina, Barrafranca (EN) e Mazzarino (CL)*

✓ n. 1 indagine di sismica attiva “Masw”.

## **8. CONCLUSIONI**

Da quanto detto precedentemente, in ordine alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e tecniche del sito si evince che:

- nell'area direttamente interessata dal progetto sono individuabili 3 situazioni geologicamente diverse ed in particolare:
  - ✓ nelle aree dove affiorano i depositi terrazzati (aerogeneratori WTG4 e WTG5) i litotipi di sedime sono prevalentemente rocce sciolte costituite da sabbie ghiaiose di colore giallastro, talora rossastro, a clasti poligenici ed eterometrici. Si presentano generalmente scarsamente addensate e sature. Lo spessore è variabile tra 3 e 8 m e sovrastano i litotipi della Marne di Geracello. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale;
  - ✓ nelle aree dove affiorano le Sabbie di Lannari (aerogeneratori WTG1, WTG7, WTG8, WTG9, WTG10, WTG11, WTG12 e WTG13) i litotipi di sedime sono sabbie di colore ocra a granulometria medio-fine talora limose, a stratificazione irregolare con intercalati livelli arenacei teneri e cementati. Lo spessore è variabile tra 10 e 30 m e sovrastano i litotipi e sovrastano i litotipi della Marne di Geracello. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale;
  - ✓ nelle aree dove affiorano le Marne di Geracello (aerogeneratori WTG2, WTG3 e WTG6) i litotipi di sedime sono argille marnose ed argille siltose di colore grigio

azzurro, talora biancastro, a stratificazione indistinta. Si presentano alterate per i primi 7-8 m di profondità. I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 1,00 e 2,00 m di terreno vegetale;

- le condizioni di stabilità dell'area sono ottime in relazione alla favorevole giacitura dei terreni presenti, nonché alla mancanza assoluta di agenti geodinamici che possano in futuro turbare il presente equilibrio;
- quanto detto prima è confermato dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) che esclude tale area da qualunque fenomenologia di dissesto e di rischio geomorfologico ed idraulico;
- le opere in progetto non rilasciano alcuna sostanza inquinante né nel suolo, né nelle acque;
- vista la natura dei terreni presenti si può affermare che il livello piezometrico della falda presente nei depositi terrazzati si attesta a una quota pari a circa 2.0 m dal p.c., ma può raggiungere il piano campagna durante i periodi di pioggia. Si tratta di una falda di poco interesse per la sua scarsa potenzialità e perché prevalentemente a carattere stagionale;
- è presente, invece, un'importante falda dove affiorano le Sabbie di Lannari. Si tratta di un adunamento idrico legato all'esteso territorio dove affiora questa formazione geologica. Il livello freatico è generalmente profondo, rispetto alle fondazioni dei manufatti in progetto ed in ogni caso questa formazione è interessata solo marginalmente ed in posizione prossima a versanti sub verticali e con elevata pendenza che drenano la falda alla loro base, per cui, in questa fase si può affermare che non è possibile alcuna interferenza

negativa tra la realizzazione/esercizio/dismissione delle opere in progetto e la falda,

- nelle aree caratterizzate dall'affioramento dei litotipi argillosi, non sono presenti falde freatiche ma nel periodo delle piogge i primi metri alterati si possono trovare in condizioni di saturazione.
- Non sono presenti *dissesti che interessano le aree di ubicazione degli aerogeneratori in progetto e ciò è confermato da PAI che non li include tra le aree a rischio/pericolosità geomorfologica;*
- *certamente alcuni tratti di cavidotto avranno alcune criticità da risolvere con opere di ingegneria naturalistica che saranno studiate una volta in possesso del tracciato definitivo;*
- si mette in evidenza che i versanti a valle degli aerogeneratori WTG 12, WTG13 e WTG14 sono caratterizzati da aree elevate pendenza interessate da un'attività geodinamica piuttosto spinta. Per questi aerogeneratori lo studio di dettaglio che sarà eseguito in una seconda fase ci consentirà di verificare l'eventuale necessità di prevedere alcune opere di consolidamento. *Sin da subito si può dire che sarebbe preferibile allontanare i sopra indicati aerogeneratori dai limiti dei dissesti di almeno 50 m dal ciglio della parete sabbiosa-calcarenitica;*
- *un'altra criticità geomorfologica riguarda il WTG 09 che si trova ubicato su un "promontorio calcarenitico-sabbioso" molto stretto di larghezza massima pari a circa 20-30 m delimitato da pareti molto alte (circa 15-20 mt.) e da versanti argillosi con scarse condizioni di stabilità. Anche in questo caso uno spostamento di un centinaio di metri potrebbe essere la soluzione ideale;*

- ai sensi del D.M. 17/01/2018, dai dati delle indagini sismiche in nostro possesso ed eseguite nell'ambito di questo lavoro i terreni presenti appartengono:
  - ⇒ in corrispondenza degli aerogeneratori WTG 2, WTG 3, WTG 4, WTG 5, WTG 6, WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13 ***Categoria C - “Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”.***
  - ⇒ in corrispondenza degli aerogeneratori WTG 1, WTG 7, WTG 8 e WTG 9 alla ***Categoria B “Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.***
- per quanto riguarda il problema della liquefazione si evince che dove sono presenti terreni di natura prevalentemente argillosa sono soddisfatte le condizioni di cui alla normativa vigente e può essere esclusa la possibilità che avvengano fenomeni di liquefazione dei terreni, mentre dove affiorano i litotipi sabbiosi, in questa fase, sono stati eseguiti i primi preliminari calcoli sulla base delle indagini geofisiche eseguite che ci confortano in base alla notevole presenza di materiali a granulometria media e per la presenza di livelli e strati variamente cementati che inibiscono l'istaurarsi di tale fenomeno per cui si può dire che in generale il problema non sussiste, come

peraltro la serie storica dei terremoti che si sono avvertiti in zona dimostra. Infatti, in tutta la storia recente, pur in presenza di terremoti anche di magnitudo importante non si sono osservati fenomeni di liquefazione in sito.

- non esistono pericolosità geologiche e sismiche che possano ostare la realizzazione del progetto fatti salvi i necessari approfondimenti per gli aerogeneratori menzionati nel capitolo geomorfologica
- in ordine alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e tecniche del sito si evince che, coerentemente con il D.M. 17/01/2018 cap. 6 comma 12 e 12.1, gli studi geologici e la caratterizzazione geotecnica sono stati estesi a tutta la zona di possibile influenza degli interventi previsti ed idonei ad accertare che la destinazione d'uso è perfettamente compatibile con il territorio in esame. In particolare, le indagini e gli studi hanno caratterizzato la zona di interesse in termini vulnerabilità ambientale, per processi geodinamici interni (sismicità, vulcanismo,...) ed esterni (stabilità dei pendii, erosione, subsidenza,...) ed hanno consentito di individuare l'assenza di limiti imposti al progetto (ad esempio: modifiche del regime delle acque superficiali e sotterranee, subsidenza per emungimento di fluido dal sottosuolo) ed in particolare:
  - ✓ la destinazione d'uso è compatibile con il territorio in esame;
  - ✓ non ci sono problemi di subsidenza per emungimento di fluido dal sottosuolo;
  - ✓ non si impongono modifiche del regime delle acque superficiali e sotterranee;

- si ritiene indispensabile eseguire, in fase di progettazione esecutiva e dei calcoli delle strutture, una campagna di indagini ai sensi del D.M. 17/01/2018, come sopra descritta.