



REGIONE SICILIA

COMUNE DI SAN CIPIRELLO

COMUNE DI MONREALE

PROGETTO:

Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto agrovoltaico denominato "PV San Cipirello" di Pn pari a 50,298 MW e sistema di accumulo di capacità pari a 24 MWh, da realizzarsi nei Comuni di San Cipirello e Monreale (PA)

Progetto Definitivo

PROPONENTE:

DREN SOLARE 11 s.r.l.

SORESINA (CR)
VIA PIETRO TRIBOLDI 4 CAP 26015
PIVA 01785240191



ELABORATO:

RELAZIONE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E GEOMORFOLOGICA

STUDI AMBIENTALI



VAMIRGEOIND S.r.l.

PALERMO (PA)
VIA TEVERE 9 CAP 90144
PIVA 01698240197

VAMIRGEOIND
AMBIENTE GEOLOGIA E GEOFISICA s.r.l.
Direttore Tecnico
Dott.ssa MARINO MARIA ANTONIETTA

Scala:

Tavola:

R-202

Data:

31-07-2023

Rev. Data Revisione

00 31-07-2023

Descrizione

emissione

VAMIRGEOIND Ambiente Geologia e Geofisica s.r.l.
Relazione Geologica e di Compatibilità geomorfologica – Progetto per la realizzazione di un
impianto agro-voltaico denominato “PV San Cipirello”, sito nel territorio comunale di San
Cipirello (PA) e Monreale (PA)

REGIONE SICILIA
COMUNE DI SAN CIPIRELLO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO
AGROVOLTAICO E RELATIVE OPERE CONNESSE DENOMINATO
“PV SAN CIPIRELLO”

RELAZIONE GEOLOGICA E SULLA COMPATIBILITA’
GEOMORFOLOGICA

SOMMARIO

1. PREMESSE	3
2. CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE	8
3. CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE ED IDROGEO-LOGICHE	12
4. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA (TROMOGRAFIA)	21
5. CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO	39
6. LIQUEFAZIONE DEI TERRENI	42
7. CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA DEI TERRENI INTERESSATI DALLE OPERE IN PROGETTO	49
8. CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE DA ESEGUIRE IN FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA	52
9. CONCLUSIONI	54

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 acquisiti nell'ambito di altri lavori redatti dal sottoscritto nelle vicinanze 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 derivanti 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 dai seguenti elaborati:

- n. 2 carte geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche in scala 1/10.000 fuori testo;
- n. 4 carte 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”, con l’ubicazione delle aree interessate delle opere in progetto (fuori testo);
- n. 2 carte del Piano Regionale di Gestione del Rischio Alluvioni (PRGRA) fuori testo
- n. 4 carte del Piano di Gestione del Distretto Idrografico fuori testo;
- n. 1 carta del Piano di Tutela delle Acque fuori testo;
- n. 2 carte geomorfologiche di dettaglio con l’ubicazione delle frane e delle opere di ingegneria naturalistica
- n. 5 colonne stratigrafiche tipo dell’area;

□ 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

Lo studio geologico, di insieme e di dettaglio, 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 direttamente nell'area strettamente interessata dallo studio.

L'insieme dei terreni presenti, delle relative aree di affioramento e dei rapporti stratigrafici e strutturali è riportato nella carta geologica allegata alla presente relazione.

I tipi litologici affioranti nell'area studiata sono riferibili ad un ampio periodo di tempo che va dall'Olocene al Messiniano inferiore e che distinguiamo dal più recente al più antico:

- **DEPOSITI ALLUVIONALI (Olocene):** si tratta prevalentemente di rocce sciolte costituite da limi, silt, ghiaie, sabbie e sabbie limose con inclusi sporadici blocchi con giacitura sub-orizzontale. Le sabbie presentano granulometria variabile da fine a grossolana. Le ghiaie sono caratterizzate da sporadici clasti calcarei arrotondati di dimensioni da millimetriche a decimetriche. Interessano alcuni limitati tratti del cavidotto.
- **DETRITO DI FALDA (Olocene):** è costituito da limi e limi sabbiosi di colore bruno-rossiccio, provenienti dalla progressiva alterazione chimico-fisica dei versanti posti a monte, con inclusi elementi lapidei di dimensioni da centimetriche a decimetriche di natura quarzarenitica. Detti terreni interessano una porzione limitata del parco fotovoltaico.

- **FORMAZIONE CASTELLANA SICULA (Serravaliano sup.-Tortoniano inf.):** si tratta di argille giallo-rossastre e peliti sabbiose di colore grigio-azzurre e giallastre, con foraminiferi bentonici e rari planctonici, a cui si intercalano lenti di arenarie e sabbie quarzose micacee. Detti terreni interessano tratti del cavidotto e del parco fotovoltaico.
- **FORMAZIONE TAVERNOLA (Aquitano sup. - Langhiano):** si tratta di marne e peliti grigio-verdastre. La frazione alterata prevalentemente costituita da limi argillosi si presenta scarsamente consistente e mediamente plastica mentre le marne e marne argillose consistenti costituiscono la frazione inalterata. Si trovano intercalati banchi plurimetrici di arenarie quarzose giallastre e verdastre. Detti terreni interessano una porzione dell’impianto, parte del cavidotto e della sottostazione.
- **FLYSCH NUMIDICO (Oligocene sup.-Miocene inf.):** In generale, questa formazione geologica è data, in tutta la sua estensione verticale da un’alternanza di argille e di quarzareniti gradate di colore grigio-giallastre o rossastre. In generale nella parte bassa della formazione predominano le argille brune, nella parte mediana le quarzareniti mentre la parte superiore è caratterizzata da argille siltose o marnose grigio-azzurre con intercalazioni di livelli sabbiosi e quarzarenitici. Le argille brune di base sono a struttura scagliosa, con superfici lucide e con striature dovute a sforzi tettonici. La stratificazione non è evidente, la giacitura è caotica e sono presenti intercalazioni di livelli sabbiosi. Le quarzareniti sono, invece, a grana medio-grossolana fortemente cementate da cemento siliceo secondario. Tra i vari banchi si ritrovano intercalazioni di argille siltose grigio scure sottilmente

stratificate. Le argille siltose o marnose che costituiscono la parte terminale del deposito sono, generalmente, omogenee, compatte, prive di stratificazione evidente. Nella formazione flyscoidale sono, inoltre, presenti estesi fenomeni di slumpings intraformazionali e corrugamenti disarmonici.

In particolare, si tratta di peliti ed argilliti brune mangesifere dove si alternano banchi di arenarie quarzose con giaciture canalizzate. Detti terreni interessano tratti del cavidotto e del parco fotovoltaico.

In conclusione, nell'area direttamente interessata dal progetto sono state individuate cinque situazioni geologicamente diverse, rappresentate dettagliatamente nelle colonne stratigrafiche tipo allegate.

In particolare:

- Tipo 1 (Area impianto) – Argille a struttura rimaneggiate, plastiche e scarsamente consistenti di spessore pari a circa 3,5 m che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Flysch Numidico.
- Tipo 2 (Area impianto) – Sabbie limose e limi sabbiosi scarsamente addensati afferenti al detrito di falda di spessore pari a circa 4-5 m che sovrastano la Fm. Castellana. La frazione alterata di quest'ultima formazione geologica, di spessore pari a circa 3-4 m, è costituita da argille e peliti sabbiose scarsamente consistenti che diventano consistenti in profondità (frazione inalterata).
- Tipo 3 (Area impianto) – Argille ed argille plastiche e scarsamente consistenti per i primi 4-6 m (frazione alterata) che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti

a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Flysch Numidico.

- Tipo 4 (Area impianto) – Argille e peliti sabbiose scarsamente consistenti per i primi 3-4 m (frazione alterata) che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Castellana.
- Tipo 5 (Sottostazione e stazione di utenza) – Argille alterate scarsamente consistenti di spessore variabile tra 5-7 m che poggiano sulle argille da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Tavernola.

I terreni sopra descritti sono ricoperti da uno spessore variabile tra 0,50 e 2,00 m di terreno vegetale e sovrastano i litotipi (alterati ed inalterati) dei complessi precedentemente descritti.



COLONNA STRATIGRAFICA TIPO 1 AREA IMPIANTO - DISSESTO FRANOSO

Stratigrafia	Profondità	Descrizione
		<p>Terreno vegetale (spessore variabile da 0.50 a 2.00 m)</p>
		<p>Depositi rimaneggiati - Argille rimaneggiate (Frana) (spessore pari a 3.50-4.00 m)</p> <p style="text-align: center;">$\varphi' = 17^\circ, C' = 00,0 \text{ kN/m}^2, = 17 \text{ kN/m}^3.$</p>
		<p>Argille Flysch Numidico - Frazione inalterata</p> <p style="text-align: center;">$\varphi' = 25^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 20 \text{ kN/m}^3.$</p>



COLONNA STRATIGRAFICA TIPO 2 (Area impianto)

Stratigrafia	Profondita'	Descrizione
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓		Terreno vegetale (spessore variabile tra 1.00 - 2.00 m)
		Sabbie limose e limi sabbiosi - Detrito di falda (spessore variabile tra 4-5 m) $\varphi' = 24^\circ, C' = 00,0 \text{ kN/m}^2, = 17 \text{ kN/m}^3.$
		Argille e peliti sabbiose - Frazione alterata - Fm. Castellana (spessore variabile tra 3-4 m) $\varphi' = 21^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 19 \text{ kN/m}^3.$
		Argille - Frazione inalterata - Fm. Castellana $\varphi' = 23^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 20 \text{ kN/m}^3.$



COLONNA STRATIGRAFICA TIPO 3 (Area impianto)

Stratigrafia	Profondita'	Descrizione
		<p>Terreno vegetale (spessore variabile tra 1.00 - 2.00 m)</p>
		<p>Argille ed argille limose - Frazione alterata - Fm. Fylsch Numidico (spessore variabile tra 4-6 m)</p> <p style="text-align: center;">$\varphi' = 20^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 19 \text{ kN/m}^3.$</p>
		<p>Argille - Frazione inalterata - Fm. Fylsch Numidico</p> <p style="text-align: center;">$\varphi' = 25^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 20 \text{ kN/m}^3.$</p>



COLONNA STRATIGRAFICA TIPO 4 (Area impianto)

Stratigrafia	Profondita'	Descrizione
		Terreno vegetale (spessore variabile tra 1.00 - 2.00 m)
		Argille e peliti sabbiose - Frazione alterata - Fm. Castellana (spessore variabile tra 3-4 m) $\varphi' = 21^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 19 \text{ kN/m}^3.$
		Argille - Frazione inalterata - Fm. Castellana $\varphi' = 23^\circ, C' = 20,0 \text{ kN/m}^2, = 20 \text{ kN/m}^3.$



COLONNA STRATIGRAFICA TIPO 5 SOTTOSTAZIONE

Stratigrafia	Profondita'	Descrizione
		Terreno vegetale (spessore variabile da 0.50 a 2.00 m)
		Argille alterate - Fm. Tavernola (spessore variabile tra 5.00 - 7.00 m) $\varphi' = 28^\circ, c' = 25 \text{ kN/m}^2, \gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3.$
		Argille inalterate - Fm. Tavernola $\varphi' = 30^\circ, c' = 30 \text{ kN/m}^2, \gamma = 20,0 \text{ kN/m}^3.$

3. CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE

Da un punto di vista geomorfologico, l'area vasta in cui sono ubicate le opere in progetto è caratterizzata da habitus geomorfologico delineato da rilievi dolci e mammellonati con frequenti fenomeni geodinamici sia attivi che quiescenti anche di notevoli proporzioni.

Come visibile nelle carte allegate si tratta generalmente di movimenti rotazionali, flow e soliflussi, quest'ultimi molto importanti per i cavidotti interrati perchè nel tempo tendono a romperli a causa di movimenti lenti ma continui verso valle

I processi morfodinamici prevalenti nel sistema morfoclimatico attuale vedono 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 infiltrazione e modifica delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni argillosi e sabbiosi che una volta saturi tendono a muoversi verso valle.

Per quanto riguarda i processi fluviali, il reticolato idrografico risulta organizzato in maniera abbastanza indipendente da discontinuità iniziali, con un pattern molto articolato in relazione all'affioramento di materiali fini da poco permeabili ad impermeabili.

Per quanto concerne le forme di dissesto legate ai movimenti franosi 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 e dall'analisi del PAI, non sono state individuate aree di progetto coinvolte da fenomeni geodinamici eccetto un'area ubicata nel settore centrale dell'impianto ed una limitrofa al sottocampo posto a sud

(come visibile nella carta geomorfologica di dettaglio allegata a fine capitolo).

In particolare, si tratta di due dissesti riferibili a “Scivolamenti” inattivi o quiescenti con grado di pericolosità P2 (Livello medio) – Rischio R2 (Rischio medio).

Si mette in evidenza che l’area limitrofa al sottocampo posto a sud dell’impianto è interessata da un dissesto riferibile a franosità diffusa, attiva con grado di pericolosità medio (P2).

Nelle aree limitrofe a nord all’impianto si rinvencono n. 4 dissesti, così come cartografate dal P.A.I. e presenti nella “Carta dei dissesti” allegata fuori testo” classificati come:

- a) n. 3 scivolamenti, inattivo con pericolosità media (P2);
- b) n. 1 colata lenta, inattiva con pericolosità modesta (P1);

Detti dissesti non possono interessare le aree dell’impianto in quanto le prime sono localizzate sul versante opposto separato dallo spartiacque e la seconda appare stabilizzata e confluisce sull’impluvio limitrofo.

Dal rilievo geomorfologico di dettaglio eseguito lungo il tracciato del cavidotto scelto durante la prima ipotesi di progetto, sono state individuate n. 4 frane cartografate dal P.A.I. e riconducibili a:

- 1) Colamenti lenti, attivi con pericolosità media (P2);
- 2) Frana complessa, quiescente con pericolosità moderata (P1);
- 3) Scivolamento, attivo con pericolosità elevata (P3);
- 4) Area a franosità diffusa, attiva con pericolosità media (P2).

Inoltre, sono stati mappati n. 9 dissesti di cui alcuni di una certa entità riferibili a scivolamenti, scorrimenti, deformazioni superficiali attivi come visibile dallo stralcio e dalle foto allegate.

Sulla base di questi dati il Committente ha deciso di cambiare il tracciato del cavidotto non interessando in alcun modo aree in dissesto.

I dissesti sopra descritti sono legati esclusivamente all'azione delle acque ed alla pendenza medio-bassa dei versanti in quanto la coltre superficiale si imbibisce durante i periodi di piogge prolungate e tende a muoversi sia pure con movimenti di massa lenti.

Per quanto riguarda gli “Scivolamenti” inattivi e quiescenti con grado di pericolosità P2 (Livello medio) – Rischio R2 (Rischio medio) si rappresenta che tale classificazione non è ostativa alla realizzazione dell'impianto in progetto come meglio specificato dalle Norme Tecniche di Attuazione del PAI - Capitolo 11 all'Articoli 22 e 23.

Infatti ai sensi di detti articoli l'intervento è fattibile; riportiamo di seguito il testo integrale degli articoli su citati:

Articolo 22

Aree a pericolosità media (P2)

22.1. Nelle aree a pericolosità media (P2) oltre agli interventi di cui all'articolo 21, è consentita, previa verifica di compatibilità, l'attuazione delle previsioni degli strumenti urbanistici, generali, attuativi, e di settore, sia per gli elementi esistenti sia per quelli di nuova realizzazione, purché corredati da indagini geologiche e geotecniche effettuate ai sensi della normativa vigente ed estese ad un ambito morfologico o ad un tratto di versante significativi, individuabili nel contesto del bacino idrografico di ordine inferiore in cui ricade l'intervento.

22.2. Gli studi geologici di cui al precedente comma devono tener conto degli elaborati cartografici del P.A.I., onde identificare le interazioni fra le opere previste e le condizioni geomorfologiche dell'area. Tali

studi devono individuare gli interventi di mitigazione compatibili con il livello di criticità dell’area anche al fine di attestare che le opere non aggravino le condizioni di pericolosità dell’area o ne aumentino l’estensione, secondo quanto definito dal precedente articolo 20.

Articolo 23

Aree a pericolosità moderata (P1) e bassa (P0)

23.1. Nelle aree a pericolosità moderata (P1) e bassa (P0), oltre agli interventi di cui ai precedenti articoli 21 e 22, sono ammessi, previa verifica di compatibilità, tutti gli interventi di carattere edilizio e infrastrutturale che non aggravino le condizioni di pericolosità dell’area o ne aumentino l’estensione, in accordo con quanto previsto dagli strumenti urbanistici e Piani di Settore vigenti, conformemente alle prescrizioni generali del presente provvedimento.

Si mette in evidenza che in questa fase sono state eseguite le necessarie indagini geomorfologiche ed aerofotogeologiche di dettaglio accompagnate da indagini geofisiche che ci confortano sulla fattibilità del progetto e nelle successive fasi di progettazione si eseguiranno le opportune indagini geognostiche e geotecniche che serviranno alla definizione e calcolo delle opere di ingegneria naturalistica per il completo consolidamento dei fenomeni geodinamici che interessano l’area in studio.

Nell’eventualità che le indagini programmate dovessero evidenziare spessori più elevati di quelli oggi indicati dai risultati delle indagini geofisiche eseguite in questa fase, le opere di ingegneria naturalistica saranno accompagnate da opere di consolidamento tradizionali (paratie di pali).

Per preservare il sito da fenomeni di erosione superficiale verranno adottati tecniche utili alla stabilizzazione della porzione più superficiale di suolo che hanno il vantaggio di essere molto elastiche e in grado di adattarsi alla presenza dei pannelli fotovoltaici, alle irregolarità del terreno ed a ulteriori movimenti di assestamento del terreno dopo la messa in opera.

In tal modo il consolidamento ed il ripristino delle condizioni ambientali sarà raggiunto impiegando opere relativamente leggere per non sovraccaricare il terreno, assicurando la massima protezione antierosiva.

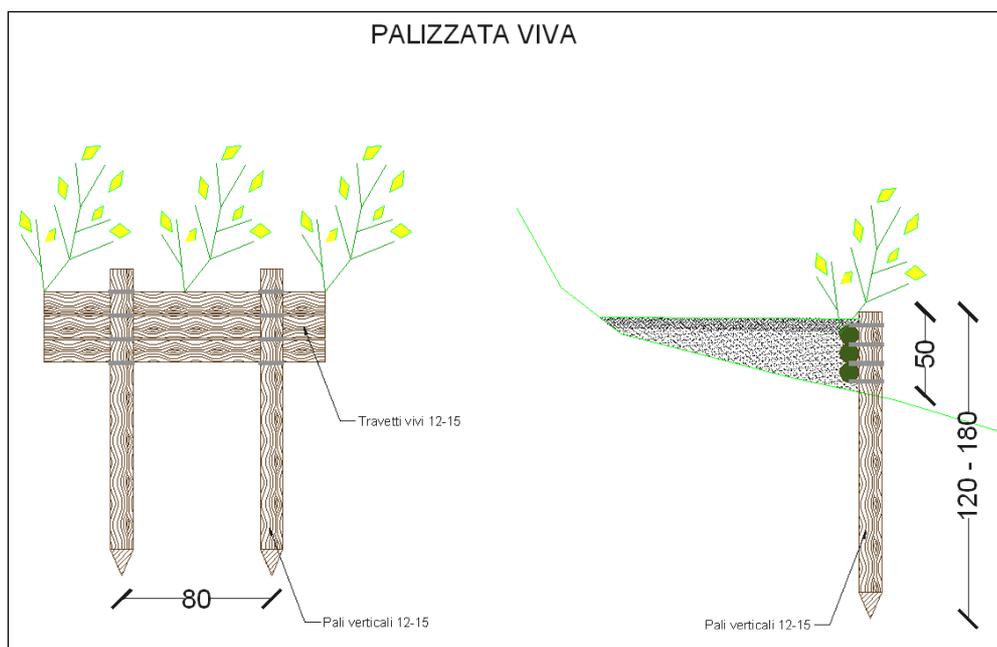
Nello specifico del nostro caso, le aree interessate da questi interventi sono tutte quelle individuate da fenomeni geodinamici dove è prevista l'installazione dei pannelli fotovoltaici.

Nello specifico del nostro caso riteniamo di prevedere:

- **Palizzate vive.** La tecnica della palizzata in legname con talee e/o piantine unisce l'impiego di talee con strutture fisse in legno per la stabilizzazione di pendii e scarpate, naturali o artificiali.

Con questo sistema si tende a rinverdire le scarpate attraverso la formazione di piccoli gradoni lineari, sostenuti dalle strutture di legno, che corrono lungo le curve di livello del pendio e dove, a monte, si raccoglie del materiale terroso.

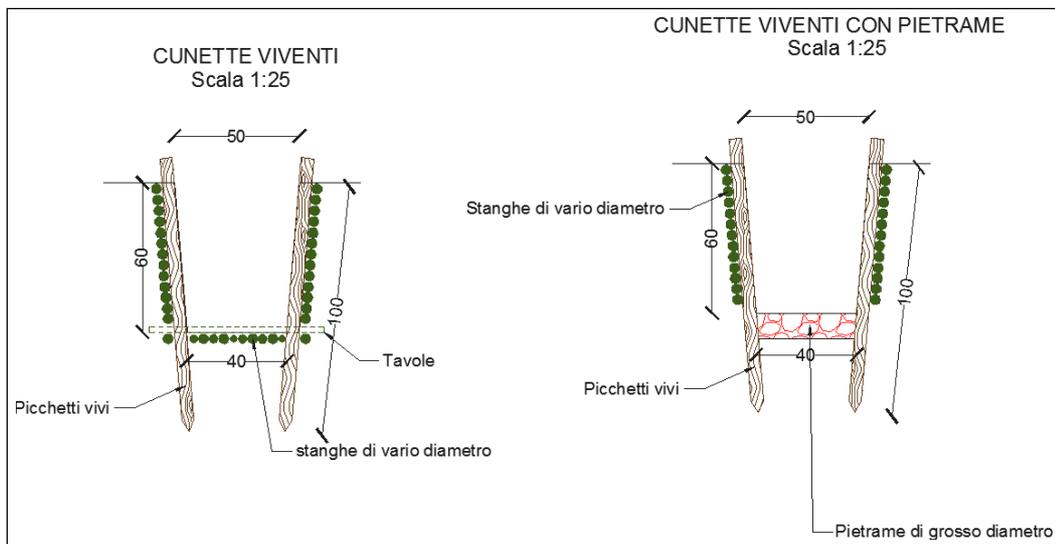
Le piante, una volta che la vegetazione si sarà sviluppata, garantiranno un consolidamento del terreno con l'apparato radicale e una resistenza all'erosione superficiale, con la loro parte epigea.



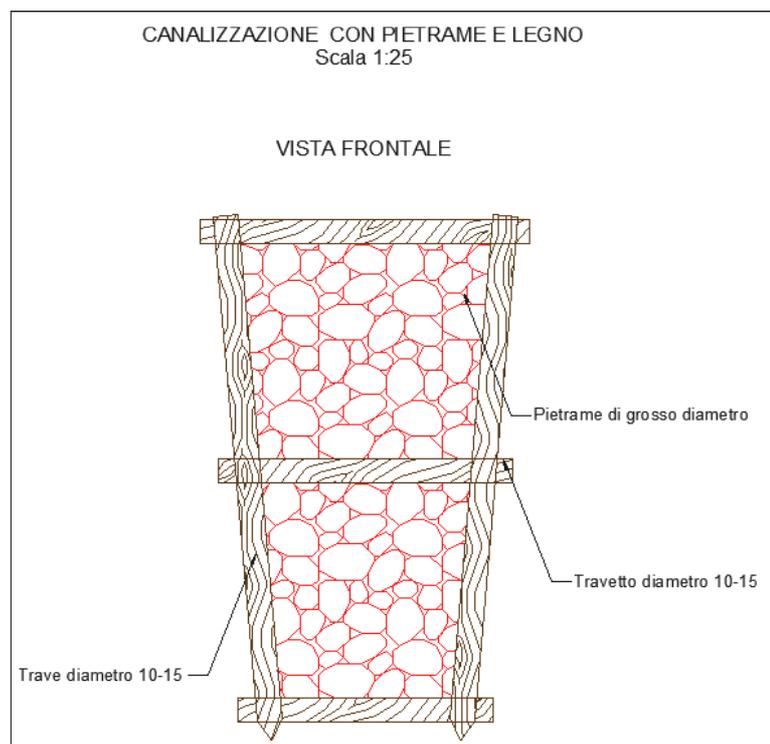
- **Cunetta vivente.** Le cunette sono di norma pensate in terra. E' però importante sottolineare che nei tratti di maggiore pendenza l'acqua può destabilizzare la cunetta e con essa la strada. Pertanto si suggerisce l'adozione di cosiddette cunette viventi, maggiormente resistenti all'azione erosiva dell'acqua.

Sarà la fase cantieristica ed anche osservazionale ad indicare i tratti ove è opportuno realizzarle cunette “vive” al posto delle cunette in terra.

Esecuzione del lavoro: in un fosso a sezione trapezoidale vengono sistemati sul letto e sulle pareti del fosso, uno accanto all'altro, dei rami o delle stanghe vive in modo serrato, tenendoli fermi con pali vivi infissi nel terreno, ad intervalli da 2 a 4 m per mezzo di sagome in legno preparate in precedenza, oppure ad intervalli da 0,5 m fino ad 1 m uno dall'altro posti lungo le pareti del fosso. Nel caso di portata idrica permanente si può consolidare il letto e la parte inferiore della parete del fosso con tavoloni.



- **Canalizzazioni in pietrame e legno.** Nei casi di piccoli impluvi naturali che intercettano la viabilità di progetto causando spesso solchi ed erosione puntuale si può prevedere la costruzione di canalizzazioni in legname e pietrame, di sezione trapezia avente lo scopo di convogliare le acque nei punti di recapito.



Inoltre si prevede di realizzare su tutta l’area prati armati e a valle una paratia di pali.

Dal punto di vista idrogeologico l’area in studio è caratterizzata dall’affioramento di terreni diversi che, da un punto di vista idrogeologico, abbiamo suddiviso in 2 tipi di permeabilità prevalente:

- **Rocce permeabili per porosità:** Si tratta di rocce incoerenti e coerenti caratterizzate da una permeabilità per porosità che varia al variare del grado di cementazione e delle dimensioni granulometriche dei terreni presenti.

In particolare la permeabilità risulta essere media nella frazione sabbiosa fine mentre tende ad aumentare nei livelli sabbiosi grossolani e ghiaiosi.

Di conseguenza la circolazione idrica sotterranea è discontinua con livelli acquiferi sospesi.

Rientrano in questo complesso i terreni afferenti ai depositi alluvionali.

- **Rocce impermeabili:** Questo complesso è costituito dalle argille che presentano fessure o pori di piccole dimensioni in cui l’infiltrazione si esplica tanto lentamente da essere considerate praticamente impermeabili.

Si mette in evidenza, però, che l’acqua, riuscendo a permeare la frazione alterata superficiale ed aumentare le pressioni neutre, tende a destrutturare la frazione alterata azzerando la coesione e rendendola soggetta a possibili movimenti gravitativi lungo i versanti.

Rientrano in questo complesso i terreni afferenti la frazione argillosa delle Formazioni Flysch Numidico, Tavernola e Castellana.

Vista la presenza di litotipi argillosi su gran parte dell’impianto e della sottostazione non è presente una vera e propria falda freatica ma solo lo strato alterato si presenta saturo nei periodi in intense piogge, i rilievi eseguiti in campo hanno confermato tale affermazione vista la mancanza di pozzi e sorgenti di interesse.

Da quanto detto sopra è possibile alcuna interferenza negativa tra la realizzazione/esercizio/dismissione delle opere in progetto e la falda, anche in considerazione del fatto che non è possibile alcun impatto sulla circolazione idrica sotterranea e anche vista la profondità limitatissima dei pali e la loro distanza relativa per cui non è possibile alcun effetto diga.

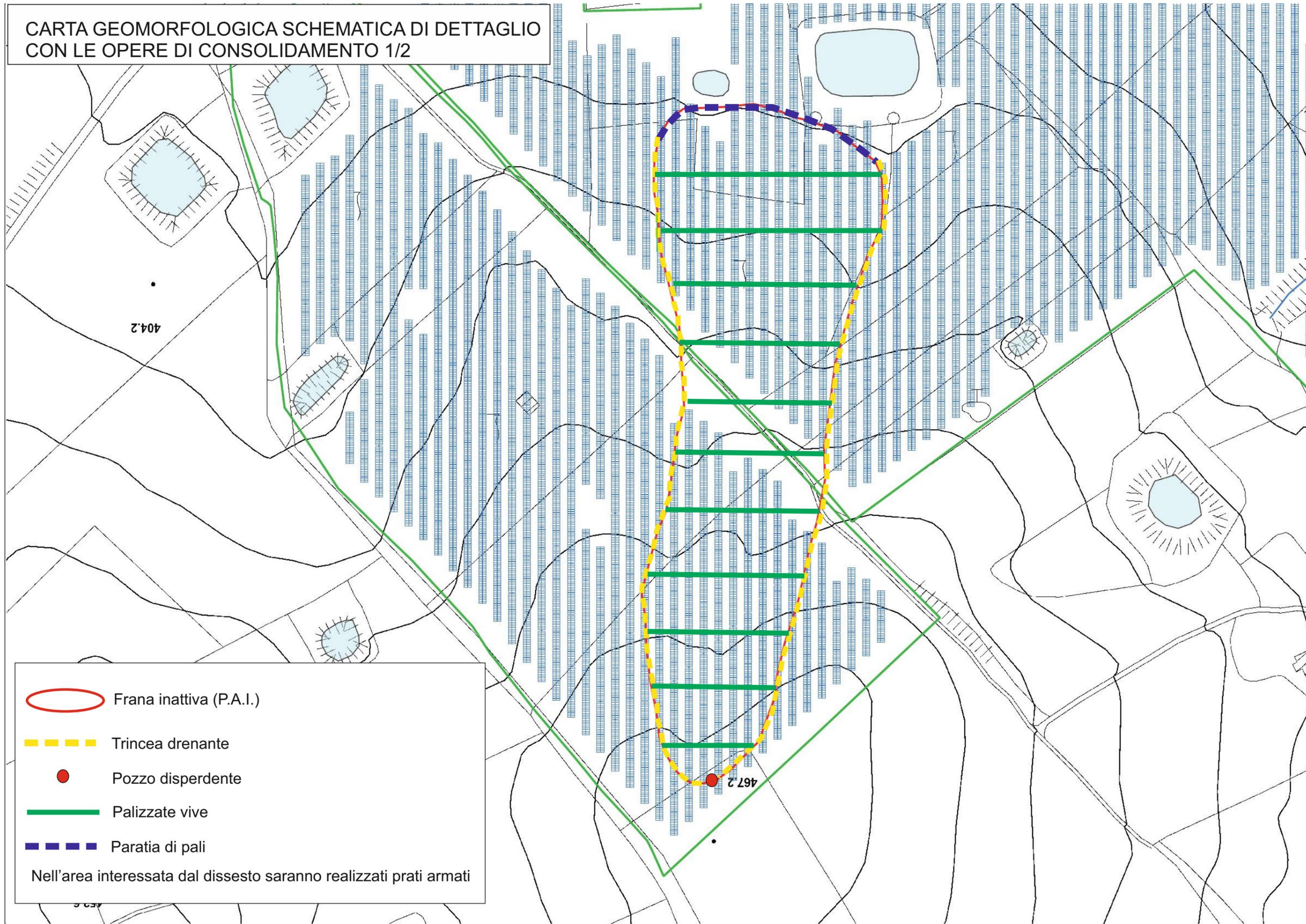
Inoltre, le opere in progetto non rilasciano alcuna sostanza inquinante né nel suolo, né nelle acque.

Si mette inoltre in evidenza che l’area non rientra all’interno di acquiferi considerati dalla Regione come significativi mentre la stazione di consegna ricade parzialmente all’interno del bacino idrico sotterraneo “Cozzo dell’Aquila - Cozzo della Croce ma tale opera non può minimamente interferire con l’alimentazione e la qualità dell’acquifero.

Le fondazioni dei pannelli vista la loro limitata profondità non interferiscono con le falde freatiche presenti, né con il loro deflusso sotterraneo.

Infine, si evidenzia che le aree dell’impianto non sono interessate da a rischio e pericolosità idraulica come indicato dal P.A.I. e dal P.G.R.A.

CARTA GEOMORFOLOGICA SCHEMATICA DI DETTAGLIO
CON LE OPERE DI CONSOLIDAMENTO 1/2



 Frana inattiva (P.A.I.)

 Trincea drenante

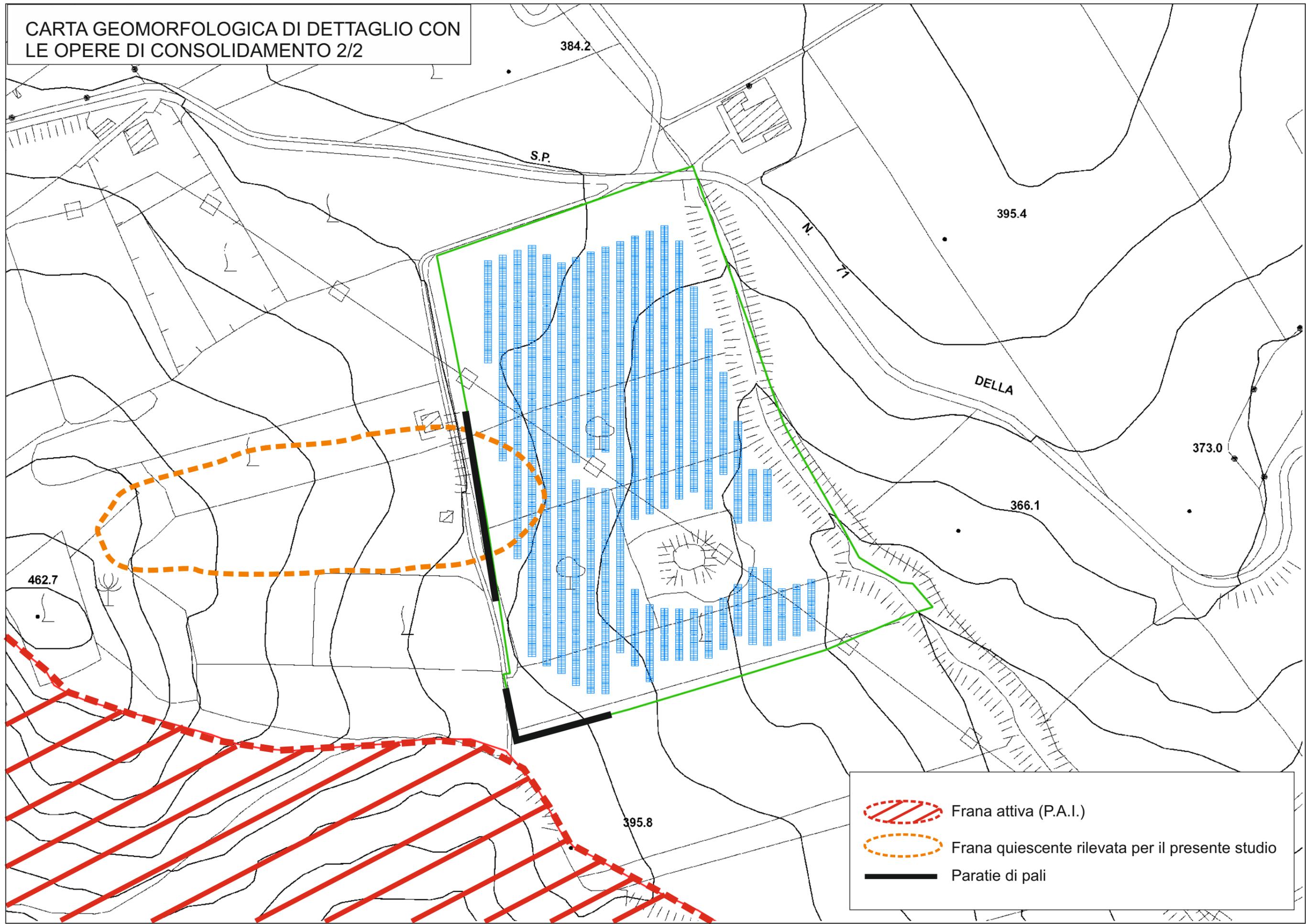
 Pozzo disperdente

 Palizzate vive

 Paratia di pali

Nell'area interessata dal dissesto saranno realizzati prati armati

CARTA GEOMORFOLOGICA DI DETTAGLIO CON
LE OPERE DI CONSOLIDAMENTO 2/2



-  Frana attiva (P.A.I.)
-  Frana quiescente rilevata per il presente studio
-  Paratie di pali

4. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA (TROMOGRAFIA)

Si è ritenuto necessario l'utilizzo della tecnica di sismica passiva a stazione singola HVSR (tomografia) allo scopo di determinare le velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni presenti, in corrispondenza delle opere progettate.

In particolare sono state eseguite n. 6 misure di microtremore ambientale, con un tromografo digitale progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico (vedi planimetria ubicazione tromini allegata di seguito).

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.

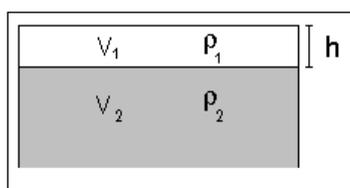
I primi studi su questa tecnica sono da attribuire a Kanai (1957) e da allora diversi metodi sono stati proposti per estrarre utili informazioni sul sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in sito.

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 sotto riportata si osserva che sono presenti due strati (1 e 2) che si differenziano per le densità (ρ_1 e ρ_2) e le velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2).



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 (λ) 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:

$$f_r = VP1/(4 H) \quad [1]$$

mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = VS1/(4 H). \quad [2]$$

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 a 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;
- ad un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.);
- ν la frequenza fondamentale di risonanza.

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

Le ubicazioni dei sondaggi che sono stati eseguiti sono visibili nelle planimetrie allegate mentre di seguito sono riportate, in dettaglio, le interpretazioni dei dati sperimentali ottenuti.

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

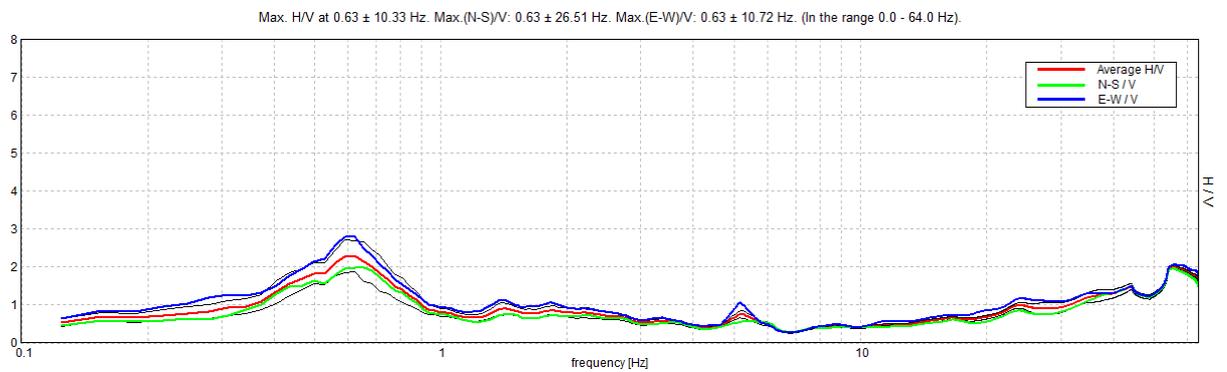
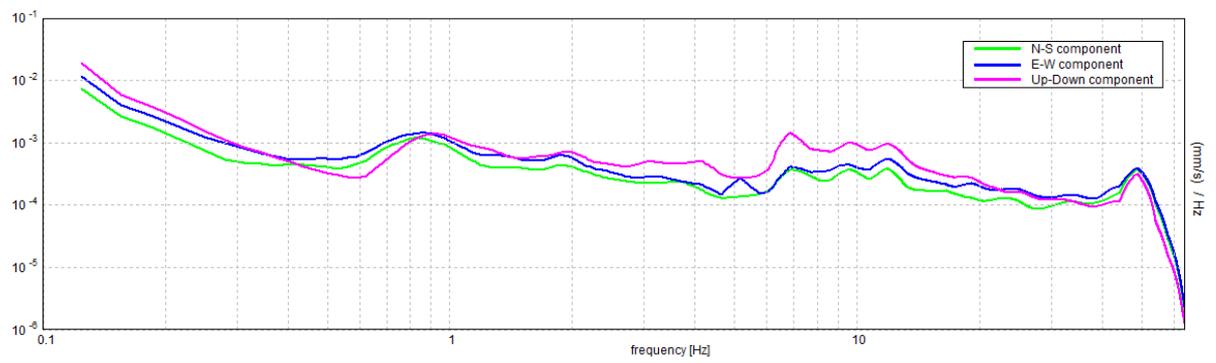
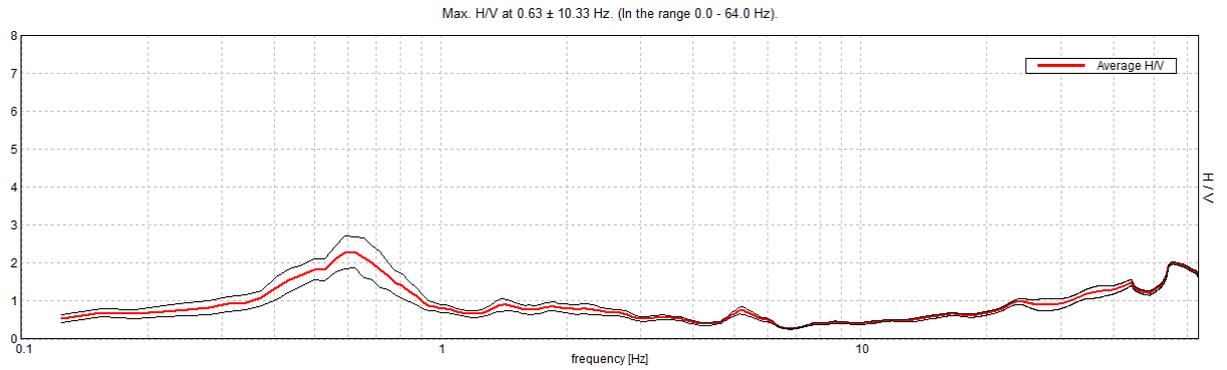
$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

da cui si ricava

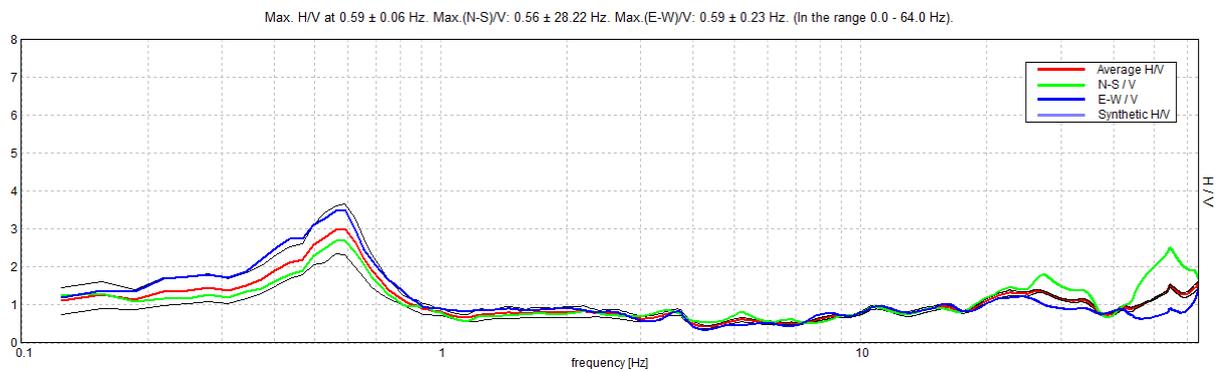
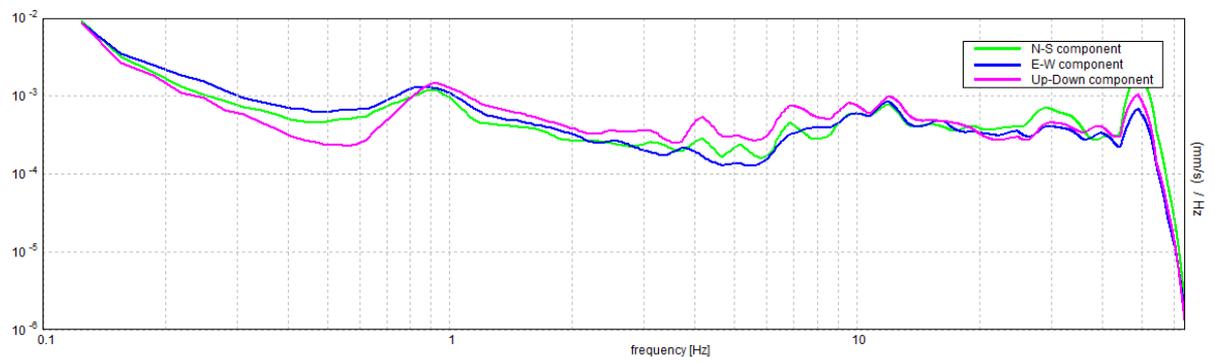
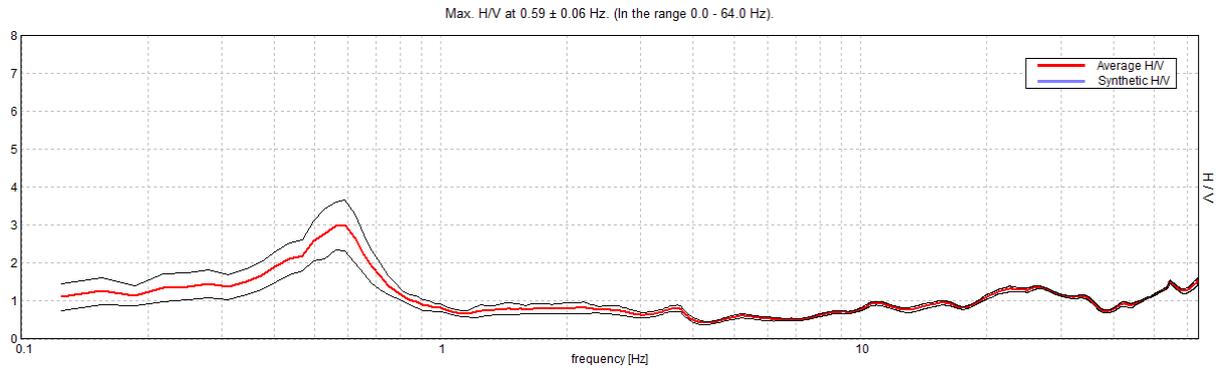
$$V = 4 f_r h$$

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

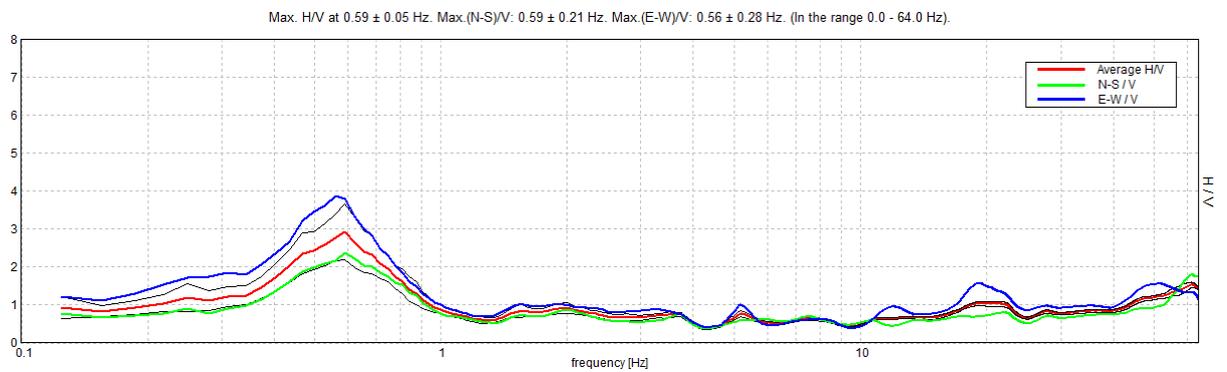
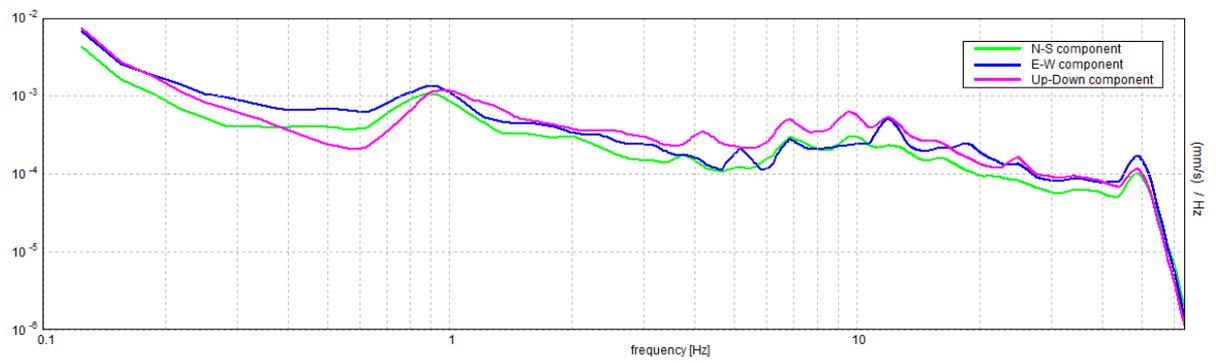
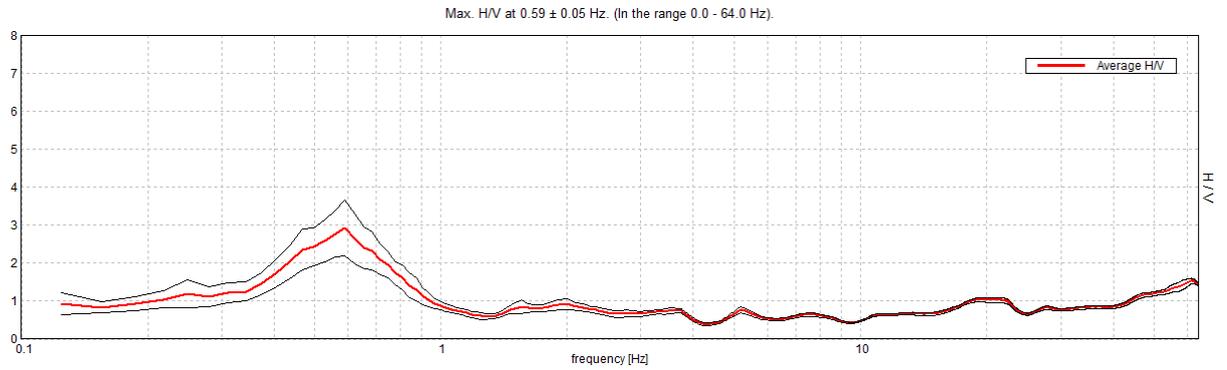
Sondaggio tromografico T1



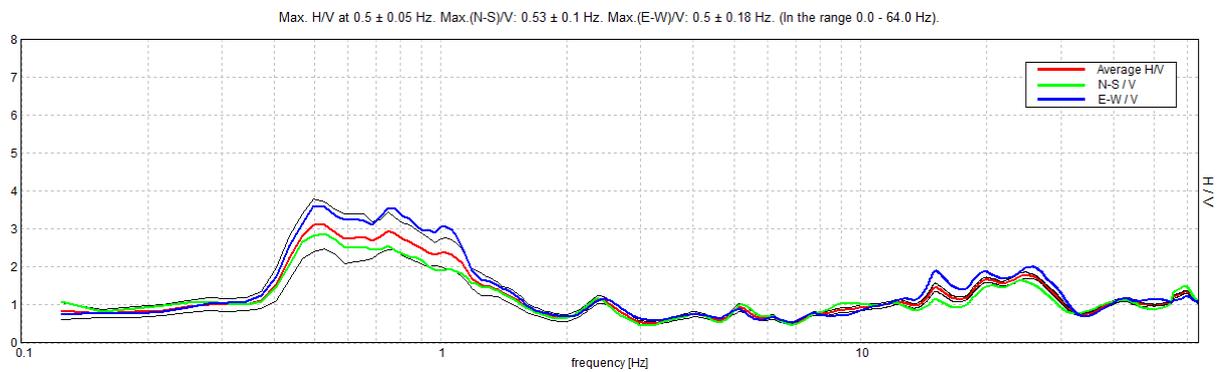
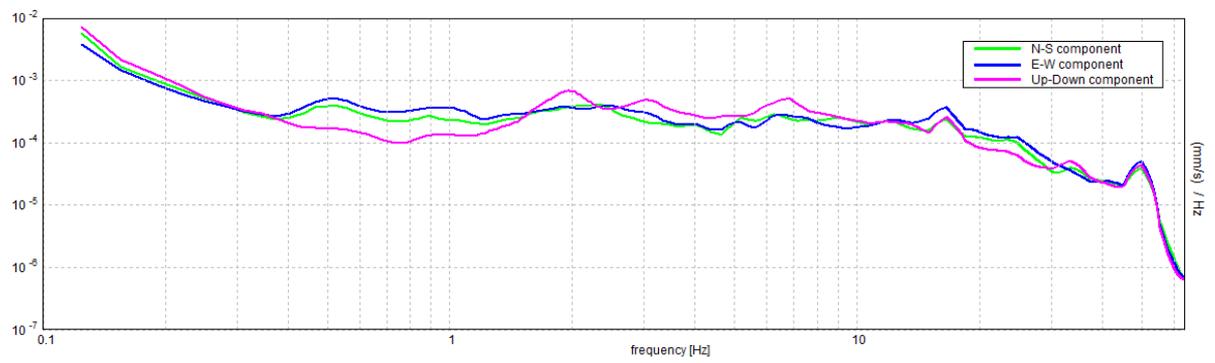
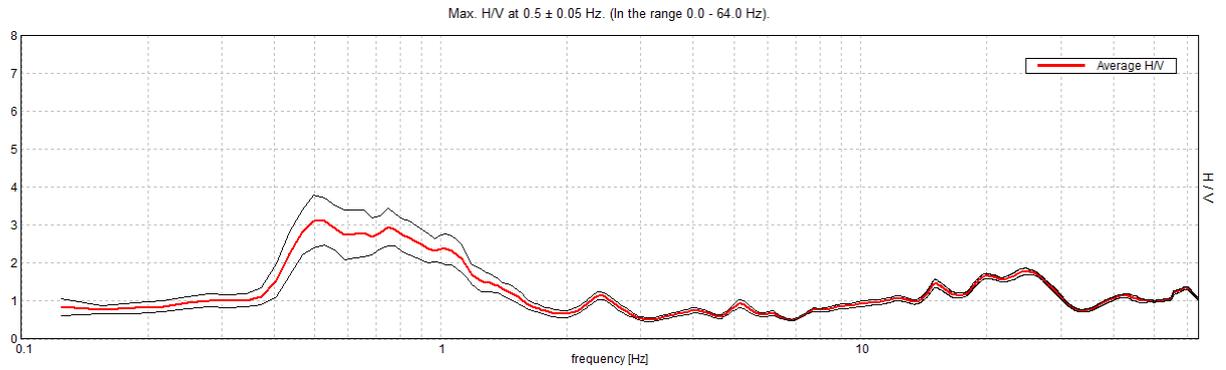
Sondaggio tromografico T2



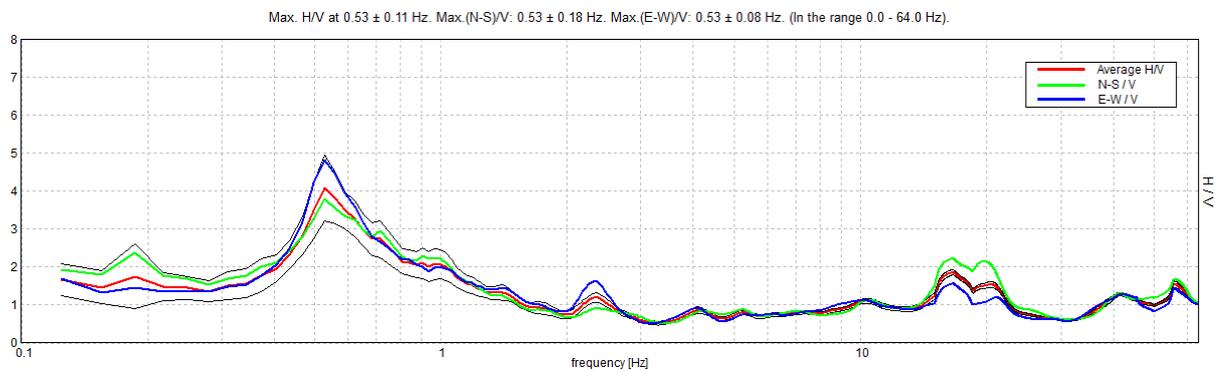
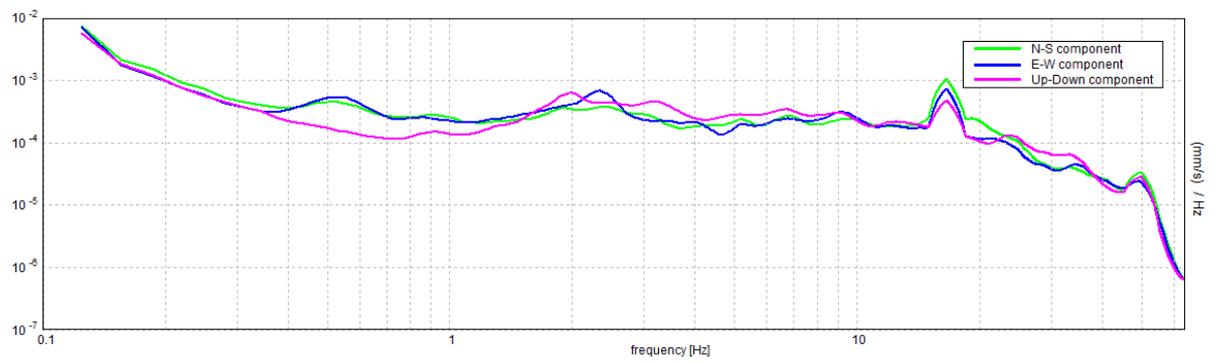
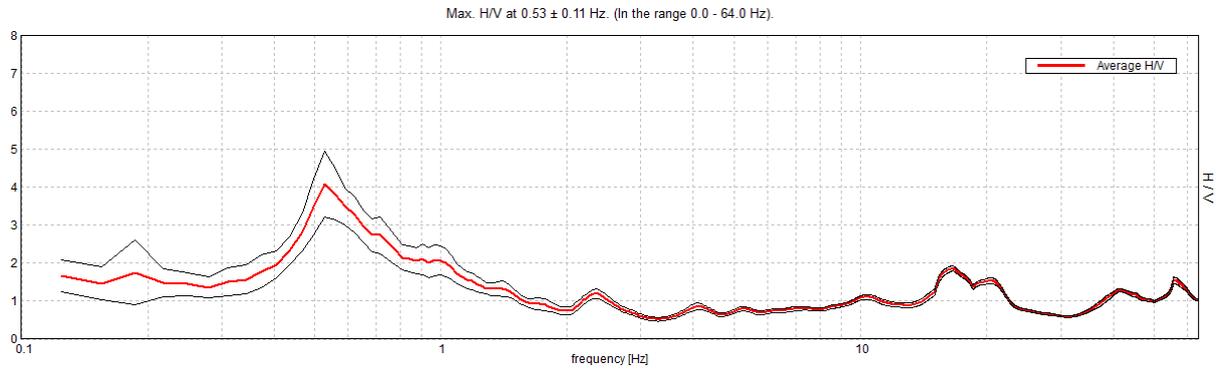
Sondaggio tromografico T3



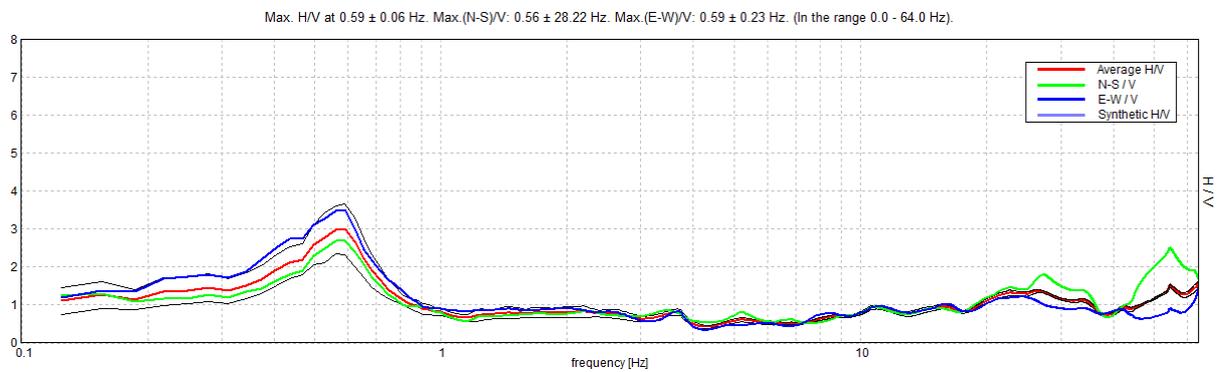
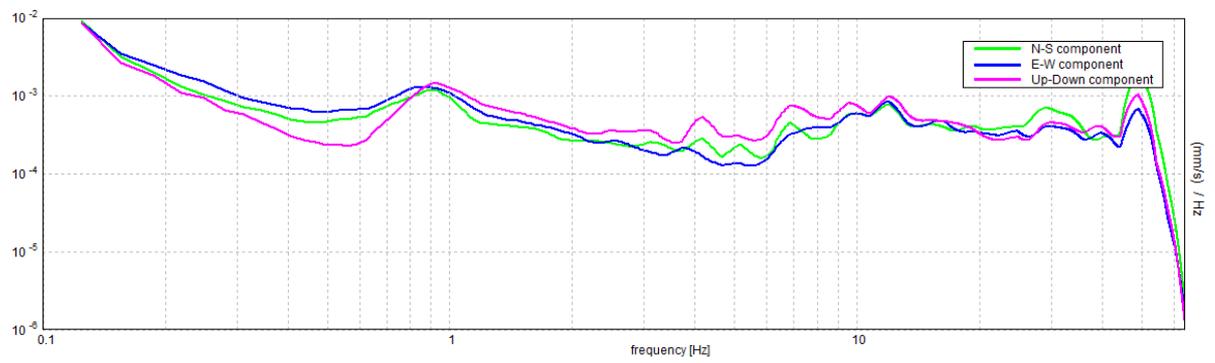
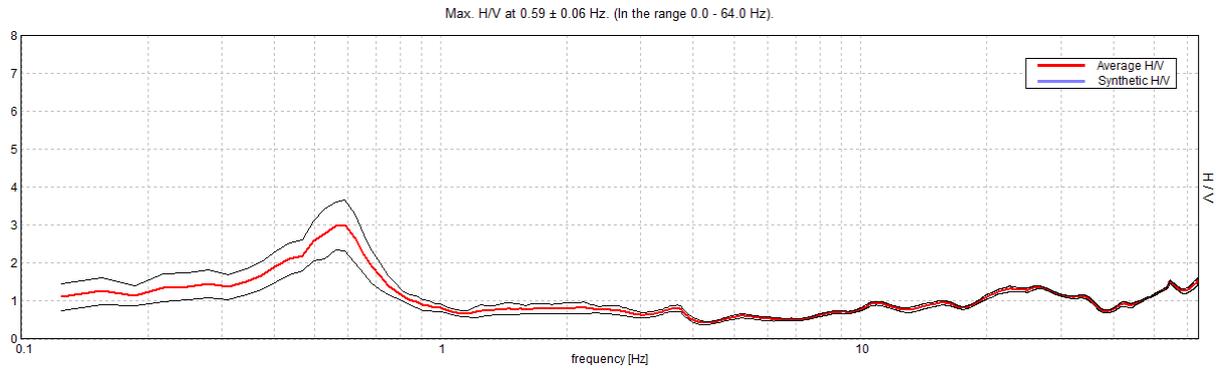
Sondaggio tromografico T4



Sondaggio tromografico T5



Sondaggio tromografico Tsott (Sottostazione)



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

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

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

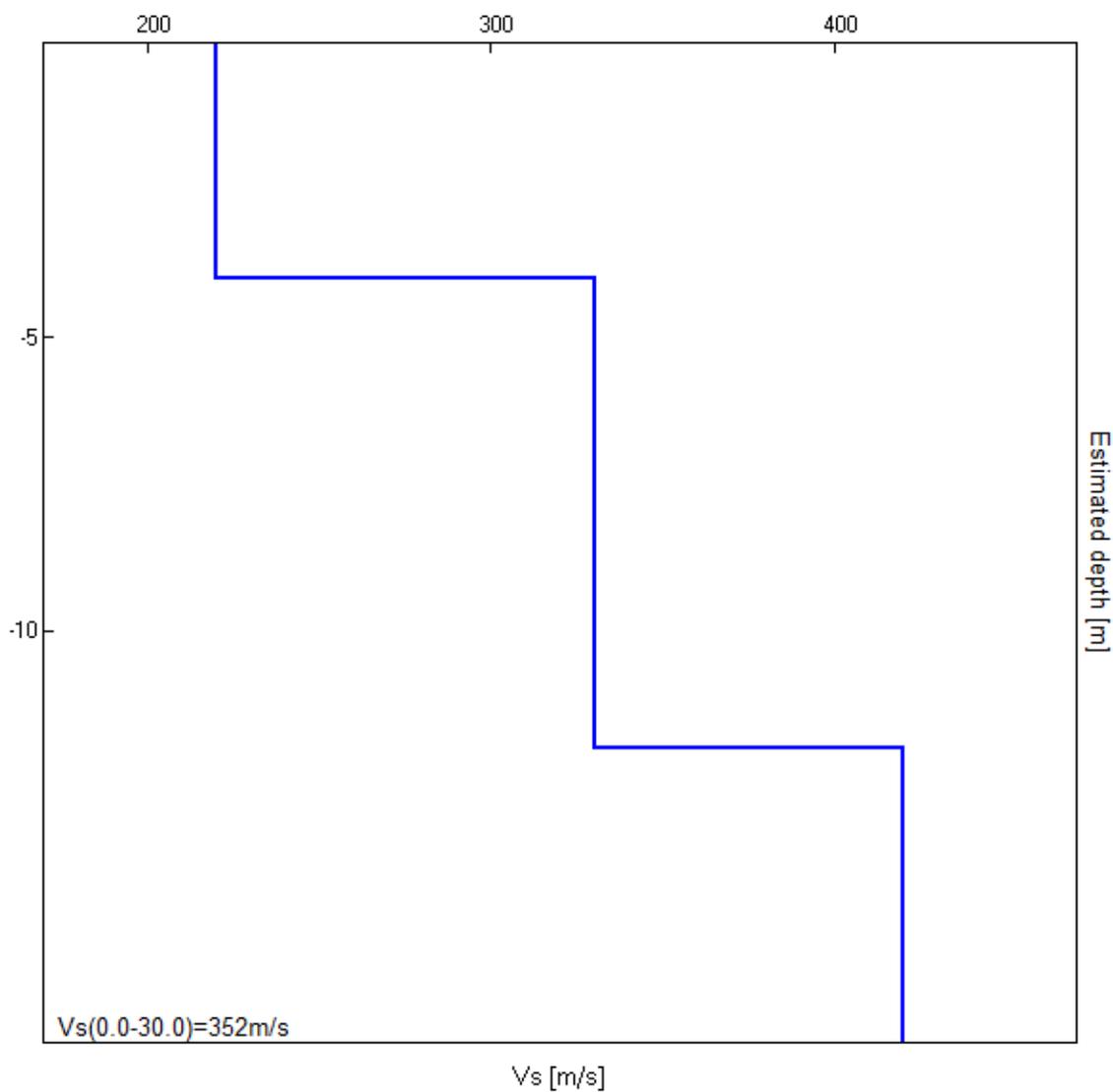
da cui si ricava

$$V = 4 f_r h$$

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

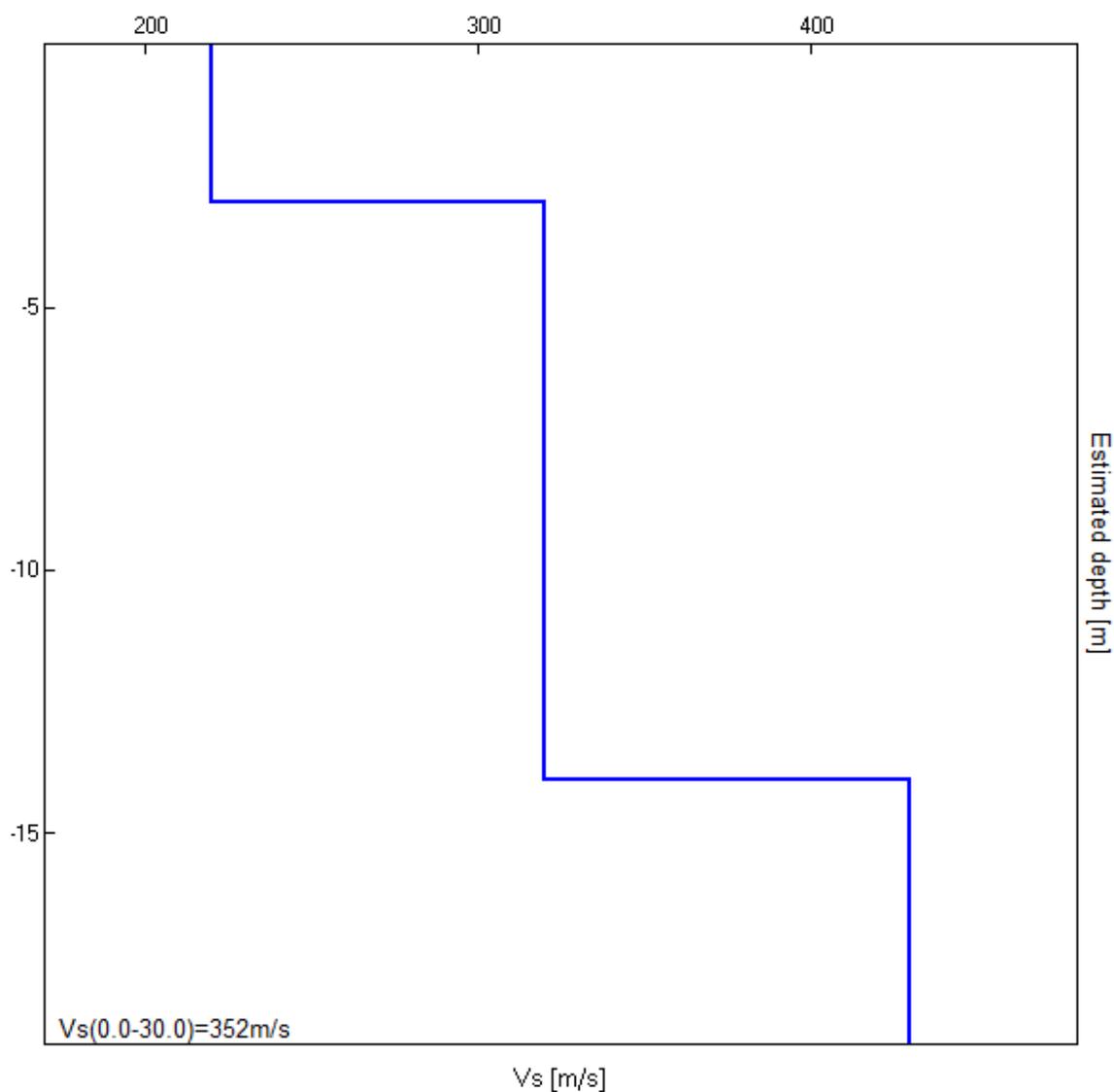
Sondaggio tromografico T1

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2008	
0.00 – 4.00	220	C	C (Vs,eq=352 m/s)
4.00 – 12.00	330	C	
12.00 – 30.00	420	B	



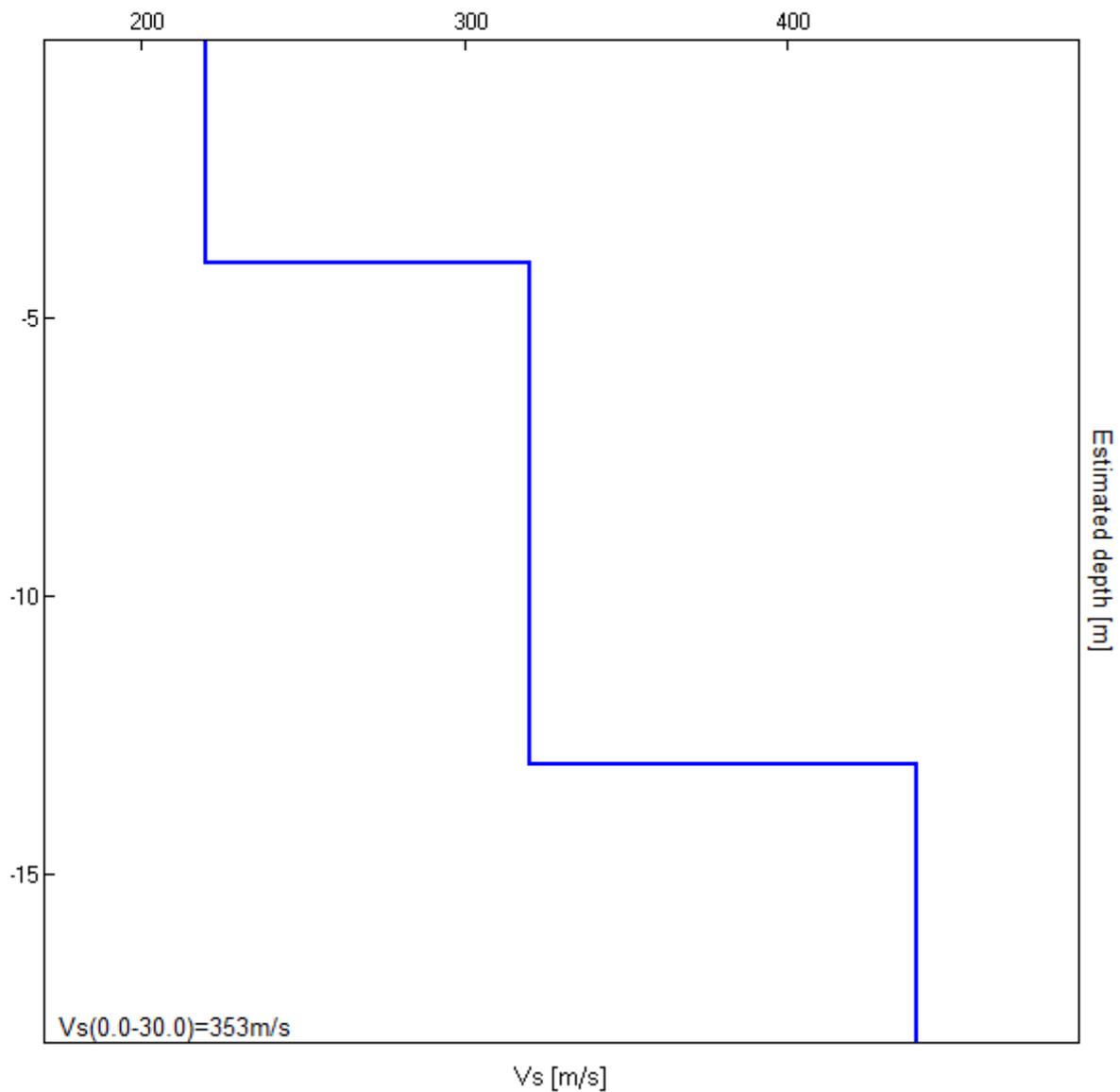
Sondaggio tromografico T2

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2008	
0.00 – 3.00	220	C	C (Vs,eq =352 m/s)
3.00 – 14.00	320	C	
19.00 – 30.00	430	B	



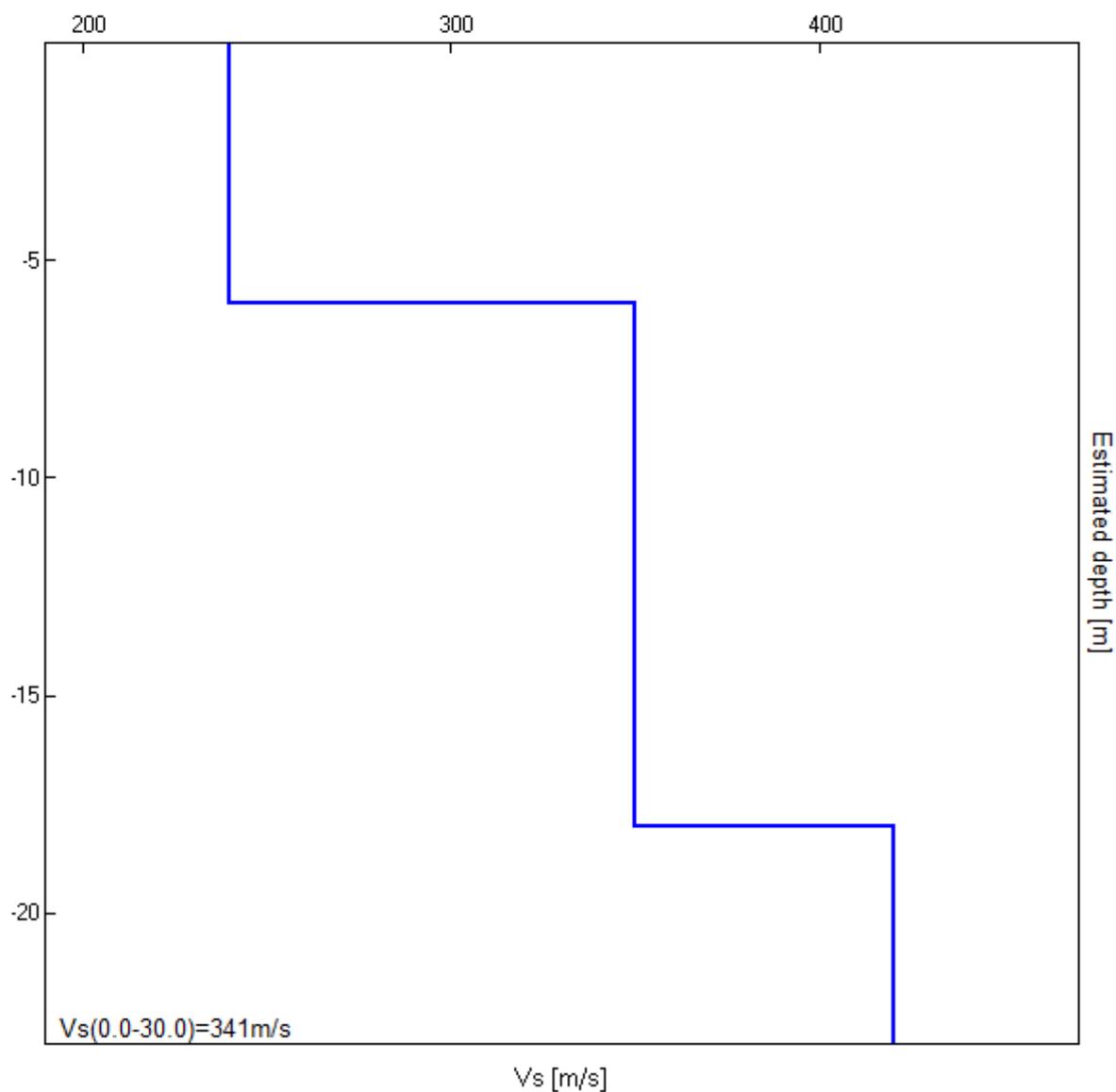
Sondaggio tromografico T3

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2008	
0.00 – 4.00	220	C	C (Vs,eq =353 m/s)
4.00 – 13.00	320	C	
13.00 – 30.00	440	B	



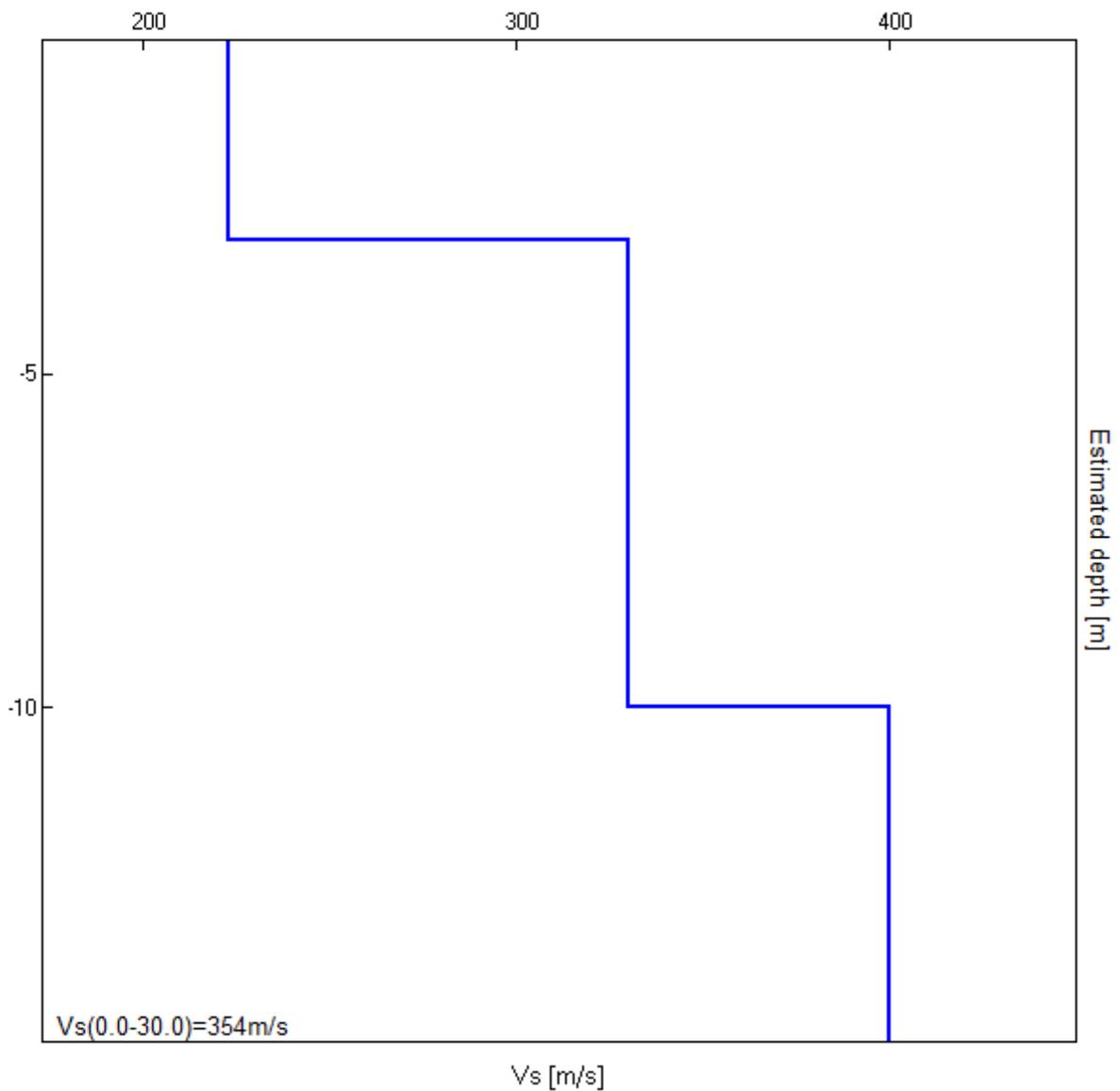
Sondaggio tromografico T4

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2008	
0.00 – 6.00	240	C	C (Vs,eq =341 m/s)
6.00 – 18.00	350	C	
18.00 – 30.00	420	B	



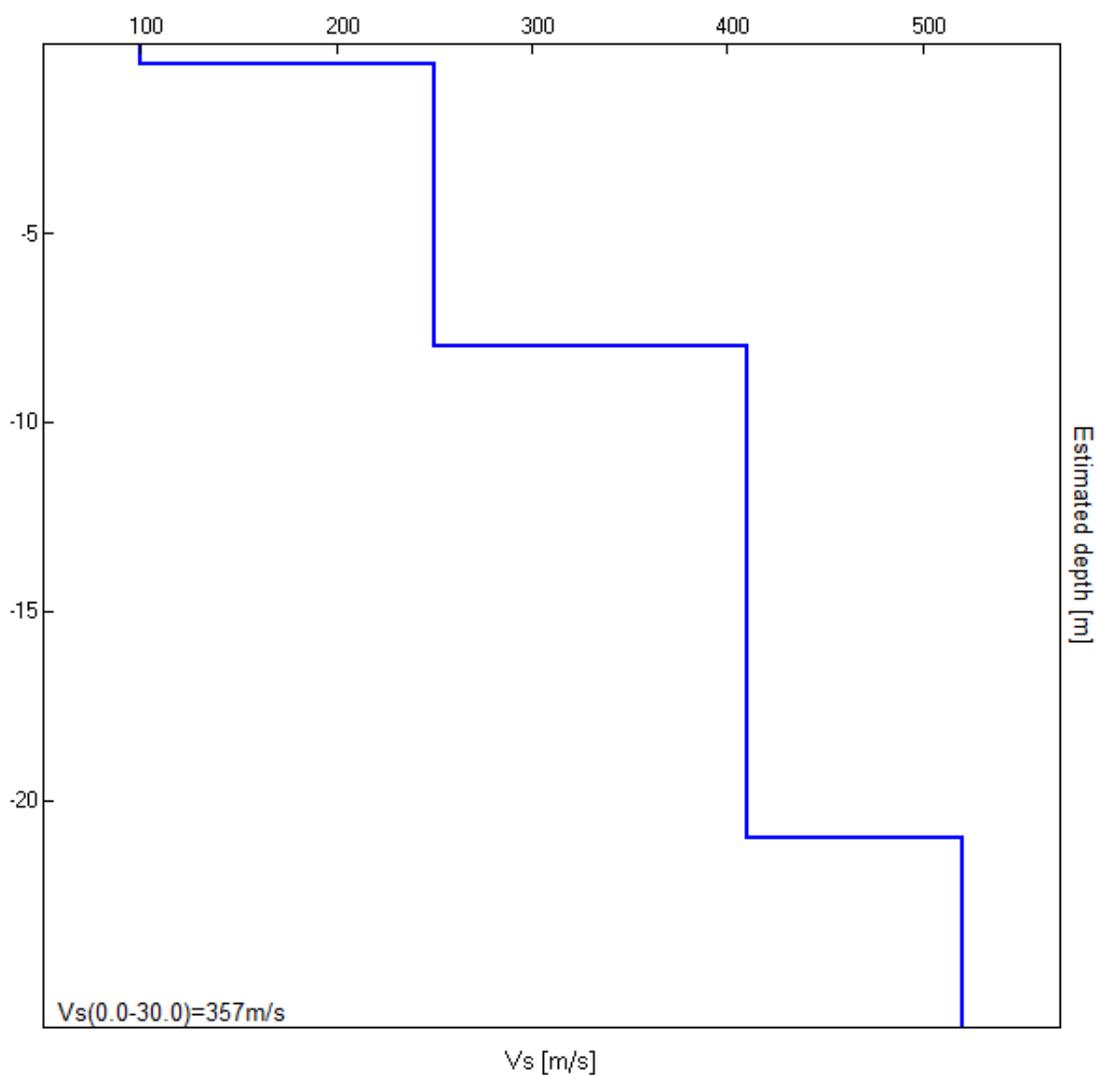
Sondaggio tomografico T5

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2008	
0.00 – 3.00	220	C	C (Vs,eq =354 m/s)
3.00 – 10.00	330	C	
10.00 – 30.00	400	B	



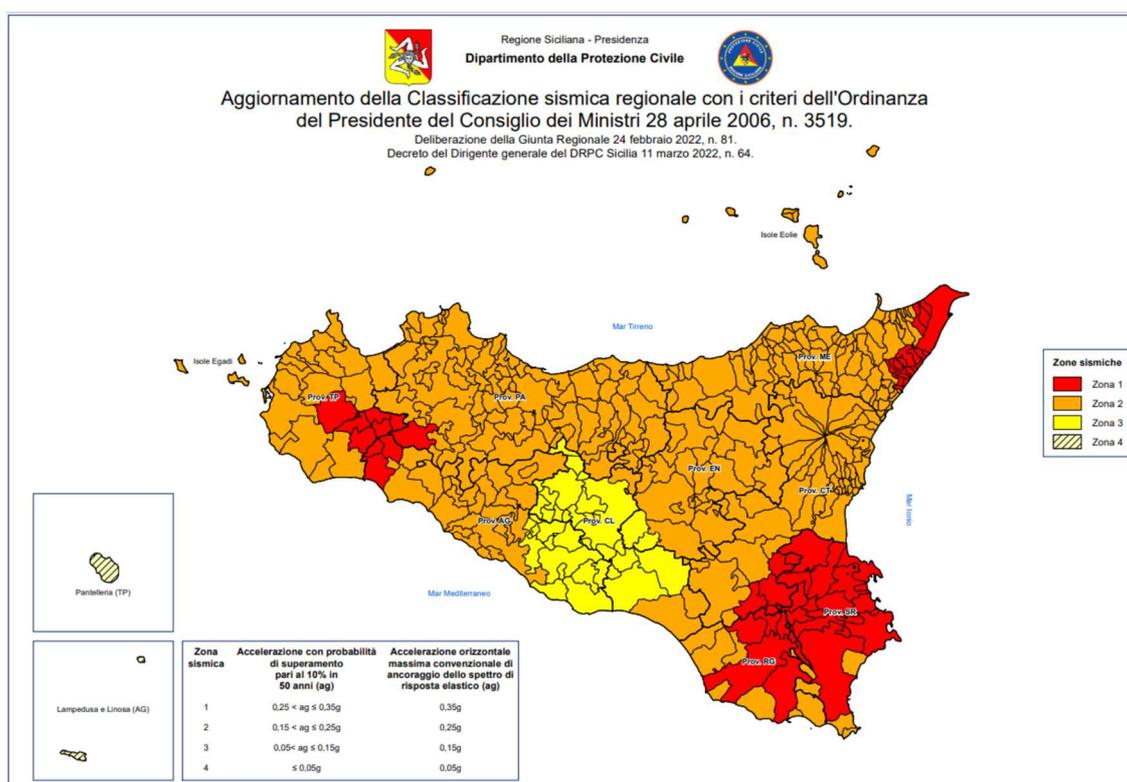
Sondaggio tromografico Tsott

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-0.50	100	D	C (Vs30=357 m/s)
0.50-6.00	250	C	
6.00-21.00	410	B	
21.00-30.00	520	B	



5. CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO

I territori comunali di San Cipirello e Monreale, in cui si trovano le aree 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 in zona sismica 2.



In questo quadro trova conferma la classificazione sismica dell’area e la necessità di studiare le eventuali modificazioni che dovessero subire le sollecitazioni sismiche ad opera dei fattori morfologici, strutturali e litologici.

Tali studi, eseguiti anche in Italia nelle zone dell'Irpinia, del Friuli, dell’Umbria e più recentemente di Palermo e del Molise, 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.

In tal senso sembra opportuno soffermarsi 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 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 *bedrock* 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 rigidezza 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 eseguite i terreni presenti appartengono alla 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.*

6. 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 Vs30.

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:

<i>Categoria suolo</i>	<i>Spettri di Tipo 1- S (M > 5,5)</i>	<i>Spettri di Tipo 2 - S (M < 5,5)</i>
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:

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

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:

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

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

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

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

Attrezzatura	C_E
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 \bullet e \bullet , invece, dipendono dalla frazione fine (FC):

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

$$V_{S1} = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,25}$$

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

$$CRR = 0,03 \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 0,9 \left[\frac{1}{(V_{S1})_{cs} - V_{S1}} - \frac{1}{(V_{S1})_{cs}} \right]$$

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 sotto falda, 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):

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

Nello specifico del nostro lavoro si evince che in corrispondenza dell'impianto e la sottostazione la serie stratigrafica locale è data in prevalenza dalle formazioni argillose.

Viste le caratteristiche litologiche dei terreni può essere esclusa la possibilità che si possano instaurare fenomeni di liquefazione.

A vantaggio della sicurezza, in questa fase sono stati eseguiti i primi preliminari calcoli, simulando la presenza di falda, che ci confortano in base alla notevole presenza di materiali a granulometria fine che inibiscono l'istaurarsi di tale fenomeno per cui si può dire che in generale il problema non sussiste, come peraltro dimostra la serie storica dei terremoti che si sono avvertiti in zona.

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 di verifica delle su esposte ipotesi geologiche.

7. CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA DEI TERRENI INTERESSATI DALLE OPERE IN PROGETTO

Da quanto desumibile dalle indagini eseguite in questa prima fase, i terreni che costituiscono il volume geotecnicamente significativo delle opere in progetto sono riferibili alle seguenti litologie: **a) Depositi alluvionali, b) Detriti di falda; c) Fm. Castellana Sicula, d) Fm. Tavernola, e) Fm. Flysch Numidico.**

Ne descriviamo singolarmente le caratteristiche litologiche e meccaniche così come desumibili dalle pubblicazioni scientifiche e dall'esperienza maturata su questi terreni, tenendo conto che in fase di progettazione esecutiva e di calcolo delle strutture fondali sarà necessario integrare le indagini eseguite di questa fase come descritto in premessa.

a) Depositi alluvionali (Area impianto): si tratta prevalentemente di rocce sciolte costituite da limi, silt, ghiaie, sabbie e sabbie limose con inclusi sporadici blocchi con giacitura sub-orizzontale. Le sabbie presentano granulometria variabile da fine a grossolana. Le ghiaie sono caratterizzate da sporadici clasti calcarei arrotondati di dimensioni da millimetriche a decimetriche.

Per la caratterizzazione fisico-meccanica di tale complesso, il progettista può fare riferimento ai seguenti valori desunti dall'esperienza maturata su questo litotipo:

$$\varphi' = 28^\circ, c' = 0 \text{ t/mq}, \gamma = 1,8 \text{ t/mc}$$

b) Detriti di falda (Area impianto): si tratta prevalentemente di sabbie limose e limi sabbiosi scarsamente addensate di spessore pari a circa 4-5 m che sovrastano la Fm. Castellana. Per la caratterizzazione fisico-

meccanica di tale complesso, il progettista può fare riferimento ai seguenti valori desunti dall’esperienza maturata su questo litotipo:

$$\varphi' = 26^\circ, c' = 0 \text{ t/mq}, \gamma = 1,8 \text{ t/mc}$$

- c) Fm Castellana Sicula (Area impianto):** Argille e peliti sabbiose scarsamente consistenti per i primi 3-4 m circa (frazione alterata) che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata. Per la caratterizzazione fisico-meccanica di tale complesso, il progettista può fare riferimento ai seguenti valori desunti dall’esperienza maturata su questo litotipo:

$$\text{Frazione alterata: } \varphi' = 21^\circ, c' = 2 \text{ t/mq}, \gamma = 1,9 \text{ t/mc}$$

$$\text{Frazione inalterata: } \varphi' = 23^\circ, c' = 2 \text{ t/mq}, \gamma = 2,0 \text{ t/mc}$$

- d) Fm. Tavernola (area sottostazione):** si tratta di argille, argille limose e limi argillosi. La frazione alterata, prevalentemente costituita da limi argillosi, si presenta scarsamente consistente e mediamente plastica, di spessore variabile tra 5-7 m, mentre la frazione inalterata costituita da argille ed argille limose si presenta consistente. Per la caratterizzazione fisico-meccanica di tale complesso, il progettista può fare riferimento ai seguenti valori desunti dall’esperienza maturata su questo litotipo:

$$\text{Frazione alterata: } \varphi' = 20^\circ, c' = 1,5 \text{ t/mq}, \gamma = 1,9 \text{ t/mc}$$

$$\text{Frazione inalterata: } \varphi' = 25^\circ, c' = 2,0 \text{ t/mq}, \gamma = 2,0 \text{ t/mc}$$

- e) Fm. Flysch Numidico (area impianto):** si tratta argille ed argille limose plastiche e scarsamente consistenti per i primi 4-6 m (frazione alterata) che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata. Si mette in

evidenza che in corrispondenza dei dissesti franosi la frazione rimaneggiata è costituita da argille plastiche e scarsamente consistenti di spessore pari a 3,5 m. Per la caratterizzazione fisico-meccanica di tale complesso, il progettista può fare riferimento ai seguenti valori desunti dall'esperienza maturata su questo litotipo:

Frazione rimaneggiata: $\varphi' = 17^\circ$, $c' = 0,0 \text{ t/mq}$, $\gamma = 1,7 \text{ t/mc}$

Frazione alterata: $\varphi' = 20^\circ$, $c' = 2,0 \text{ t/mq}$, $\gamma = 1,9 \text{ t/mc}$

Frazione inalterata: $\varphi' = 25^\circ$, $c' = 2,0 \text{ t/mq}$, $\gamma = 2,0 \text{ t/mc}$

8. CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE DA ESEGUIRE IN FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA

Fermo restando che il piano di indagini sotto indicato 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 sottocampo:

- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo di profondità pari a 15 m dal p.c.;
- prelievo di n. 2 campioni indisturbati sui quali eseguire le prove geotecniche in laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica;
- 5 prove penetrometriche DPSH;
- n. 10 S.P.T. in foro;
- esecuzione di n. 20 prove granulometriche in laboratorio per lo studio del potenziale di liquefazione;
- n. 1 indagine di sismica attiva “Masw”;

In corrispondenza della sottostazione:

- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo di profondità pari a 15 m dal p.c.;
- prelievo di n. 2 campioni indisturbati per ogni sondaggio sui quali eseguire le prove geotecniche in laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica;
- n. 5 S.P.T. in foro;

VAMIRGEOIND Ambiente Geologia e Geofisica s.r.l.
Relazione Geologica e di Compatibilità geomorfologica – Progetto per la realizzazione di un
impianto agro-voltaico denominato “PV San Cipirello”, sito nel territorio comunale di San
Cipirello (PA) e Monreale (PA)

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

9. CONCLUSIONI

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

- in generale le aree direttamente interessate dal progetto sono costituite dai depositi alluvionali terrazzati, dai Detriti di Falda, dalla Fm. Castellana Sicula, dalla Fm. Tavernola e dalla Fm. Flysch Numidico. In particolare sono state individuate 5 situazioni geologicamente diverse, dettagliatamente rappresentate nelle colonne stratigrafiche tipo allegate.
- Tipo 1 (Area impianto) – Argille a struttura rimaneggiata, plastiche e scarsamente consistenti di spessore pari a circa 3,5 m che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Flysch Numidico.
- Tipo 2 (Area impianto) – Sabbie limose e limi sabbiosi scarsamente addensate afferenti al detrito di falda di spessore pari a 4-5 m che sovrastano la Fm. Castellana. La frazione alterata, di spessore pari a circa 3-4 m, è costituita da argille e peliti sabbiose scarsamente consistenti che diventano consistenti in profondità (frazione inalterata).
- Tipo 3 (Area impianto) – Argille ed argille plastiche e scarsamente consistenti per i primi 4-6 m circa (frazione alterata) che poggiano sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Flysch Numidico.
- Tipo 4 (Area impianto) – Argille e peliti sabbiose scarsamente consistenti per i primi 3-4 m circa (frazione alterata) che poggiano

sulle argille di colore grigio, da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Castellana.

- Tipo 5 (Sottostazione e stazione di utenza) – Argille alterate scarsamente consistenti di spessore variabile tra 5 e 7 m che poggiano sulle argille da mediamente consistenti a consistenti riferibili alla porzione inalterata della Fm. Tavernola.
- per quanto concerne le forme di dissesto legate ai movimenti franosi eventualmente 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 e dall’analisi del PAI, non sono state individuate aree di progetto coinvolte da fenomeni geodinamici eccetto un’area ubicata settore centrale dell’impianto ed una limitrofa al sottocampo posto a sud;
- in particolare, si tratta di dissesti riferibili a “Scivolamenti” inattivi e quiescenti con grado di pericolosità P2 (Livello medio) – Rischio R2 (Rischio medio) e sono legati esclusivamente all’azione delle acque ed alla pendenza medio-bassa dei versanti che permette alla coltre superficiale di imbibirsi durante i periodi di piogge prolungate, tendendo a muoversi sia pure con movimenti di massa lenti;
- tale previsione non è ostativa alla realizzazione dell’impianto in progetto come meglio specificato dalle Norme Tecniche di Attuazione del PAI - Capitolo 11 all’Articoli 22 e 23 e come confermato dallo studio geomorfologico eseguito in questa sede;
- si mette in evidenza che nelle successive fasi di progettazione si eseguiranno le opportune indagini geognostiche e geotecniche che serviranno alla definizione e calcolo delle opere di ingegneria naturalistica per il completo consolidamento dei limitati fenomeni

geodinamici che interessano l’area in studio. Nell’eventualità che le indagini programmate dovessero evidenziare spessori più elevati di quelli oggi indicati dai risultati delle indagini geofisiche eseguite in questa fase, le opere di ingegneria naturalistica saranno accompagnate da opere di consolidamento tradizionali;

- vista la presenza di litotipi argillosi su gran parte dell’impianto e della sottostazione e dai rilievi eseguiti in campo si evince che non è presente una vera e propria falda freatica ma solo lo strato alterato si presenta saturo nei periodi in intense piogge;
- non è possibile alcuna interferenza negativa tra la realizzazione/ esercizio/dismissione delle opere in progetto e la falda, anche in considerazione del fatto che non vi è alcun impatto sulla circolazione idrica sotterranea sia perché i pali di fondazione non raggiungono il livello freatico, sia perché in ogni caso, vista la distanza relativa tra i pali, non è possibile alcun effetto diga;
- le opere in progetto non rilasciano alcuna sostanza inquinante né nel suolo, né nelle acque.
- ai sensi del D.M. 17/01/2018 i terreni presenti appartengono alla **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*”.
- non esistono pericolosità geologiche e sismiche che possano ostare la realizzazione del progetto;
- in relazione al problema della liquefazione in questa fase sono stati eseguiti i primi preliminari calcoli, simulando la presenza di falda, che ci

confortano in base alla notevole presenza di materiali a granulometria fine che inibiscono l'istaurarsi di tale fenomeno per cui si può dire che in generale il problema non sussiste, come peraltro dimostra la serie storica dei terremoti che si sono avvertiti in zona;

- i terreni presenti non danno luogo a fenomeni di amplificazione di sisma;
- 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.

Dott. Geo. ~~Guattiere~~ Bellomo

