

Regione Autonoma
della Sardegna



Provincia di Sassari



Comune di Ittiri (SS)



Comune di
Villanova Monteleone (SS)



Committente:

RWE

RWE RENEWABLES ITALIA S.R.L.
via Andrea Doria, 41/G - 00192 Roma
P.IVA/C.F. 06400370968

Titolo del Progetto:

PARCO EOLICO "ALAS 2"

- Comuni di Ittiri e Villanova Monteleone (SS) -

Documento:

PROGETTO DEFINITIVO

N° Documento:

PEALAS2-RC13

ID PROGETTO:

PEALAS2

SEZIONE:

C

TIPOLOGIA:

FORMATO:

A4

Elaborato:

RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

FOGLIO:

SCALA:

Nome file:

PEALAS2-RC13 - Relazione geologica e geotecnica

A cura di:

 **iat** CONSULENZA
E PROGETTI
www.iatprogetti.it



I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l.
Dott. Ing. Giuseppe Frongia

Gruppo di progettazione:

Ing. Giuseppe Frongia
(coordinatore e responsabile)
Ing. Marianna Barbarino
Ing. Enrica Batzella
Pian. Terr. Andrea Cappai
Ing. Gianfranco Corda
Ing. Paolo Desogus
Pian. Terr. Veronica Fais
Ing. Gianluca Melis
Dott. Ing. Fabrizio Murru
Ing. Andrea Onnis
Pian. Terr. Eleonora Re
Ing. Elisa Roych
Ing. Marco Utzeri

Contributi specialistici:

Ing. Antonio Dedoni (Acustica)
Dott.ssa Florinda Corrias (Archeologia)



**Studi geologici, agronomici e
ambientali a cura di:**



Redattori Studi Ambientali:

Dott.ssa Biol. Maria Antonietta Marino
Dott. Geol. Gualtiero Bellomo
Dott. Agr. Fabio Interrante
Dott. Geol. Massimo Pernicari

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

Rev:	Data Revisione	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	24/10/2023	PRIMA EMISSIONE	VAMIRGEOIND	GF	RWE

REGIONE SARDEGNA

COMUNE DI VILLANOVA MONTELEONE e ITTIRI (SS)

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
DENOMINATO ALAS 2**

Committente: RWE RENEWABLES ITALIA S.R.L.

**RELAZIONE GEOLOGICA E DI COMPATIBILITÀ
GEOMORFOLOGICA**

SOMMARIO

1. <i>PREMESSE</i>	2
2. <i>CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE</i>	9
2.1. <i>GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELL'AREA VASTA (SARDEGNA SETTENTRIONALE)</i>	9
2.2. <i>GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELL'AREA INTERES-SATA DAL PROGETTO</i>	12
2.3. <i>CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE</i>	51
3. <i>INDAGINI ESEGUITE</i>	55
3.1. <i>INDAGINI GEOGNOSTICHE</i>	56
3.2. <i>INDAGINI SPT</i>	58
3.3. <i>CALCOLO DELLA MISURA DELL'RQD</i>	68
3.4. <i>PROVE DI LABORATORIO</i>	70
3.5. <i>INDAGINI DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA (TROMOGRAFIA)</i>	74
4. <i>CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO</i>	94
5. <i>LIQUEFAZIONE DEI TERRENI</i>	96
6. <i>CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICHE DEI TERRENI INTERESSATI DALLE OPERE IN PROGETTO</i>	103
7. <i>CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE, SISMICHE E GEOTECNICHE DA ESEGUIRE IN FASE DI PROGETTA-ZIONE ESECUTIVA</i>	106
8. <i>CONCLUSIONI</i>	107

1. PREMESSE

Su incarico di RWE Renewables Italia S.r.l. è stato eseguito il presente studio geologico-tecnico per il progetto definitivo indicato in epigrafe che, 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 esecutiva.

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 caratterizzazione della serie stratigrafica locale, per l'individuazione delle profondità del livello piezometrico e per la definizione delle

problematiche sismiche delle aree in studio, in questa prima fase di lavoro si fa riferimento alle indagini eseguite per lo studio geologico del “Progetto per la realizzazione di un parco eolico denominato Alas” in un sito adiacente a quello del presente studio di proprietà dello stesso proponente; in particolare, sono stati realizzati/installati.

- ⇒ n. 1 sondaggio meccanico a carotaggio continuo denominato “S3” di profondità pari a 30 m. in corrispondenza dell’aerogeneratore WTG03;
- ⇒ n. 1 sondaggio meccanico a carotaggio continuo denominato “S6” di profondità pari a 30 mt. in corrispondenza dell’aerogeneratore WTG06;
- ⇒ n. 1 piezometro a tubo aperto in corrispondenza dell’aerogeneratore WTG03;
- ⇒ n. 1 piezometro a tubo aperto in corrispondenza dell’aerogeneratore WTG06;
- ⇒ n. 7 sondaggi di sismica passiva (tomografia) per definire le velocità delle onde sismiche Vs nei primi 30 m di profondità dal p.c. in corrispondenza degli aerogeneratori WTG01, WTG02, WTG03, WTG04, WTG05, WTG06 e WTG07.

Per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni sono state, inoltre, eseguite prove in laboratorio su n. 3 campioni indisturbati sulla porzione piroclastica/cineritica, n. 2 campioni rimaneggiati sempre sulla porzione piroclastica/cineritica molto consistente e n. 1 campione di roccia, nonché n. 3 prove penetrometriche "SPT" in situ.

I risultati sono visibili negli allegati riportati nei capitoli successivi.

Il presente progetto prevede la realizzazione di:

- a. Parco eolico** costituito da n. 7 aerogeneratori;

b. Cavidotto di collegamento tra gli aerogeneratori;

c. Sottostazione elettrica.

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

- ✓ corografia con l'ubicazione delle opere in progetto in scala 1/25.000;
- ✓ n. 2 carte geologiche, in scala 1/10.000 (fuori testo);
- ✓ n.7 carte idrogeologiche di dettaglio dei bacini idrogeologici più vicini agli aerogeneratori in scala 1/10.000 e relative sezioni idrogeologiche a scale varie;
- ✓ n. 2 carte della pericolosità da frana – PAI (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte del rischio da frana – PAI (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte della pericolosità idraulica – PAI (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte della pericolosità da alluvione – aree cleopatra – PGRA (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte del rischio di alluvione – PGRA (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte PSFF – PAI (fuori testo);
- ✓ n. 2 carte della rete idrografica (fuori testo);
- ✓ colonne stratigrafiche dei sondaggi geognostici S3 ed S6 eseguiti per il limitrofo parco Alas con relativa documentazione fotografica;
- ✓ elaborati delle prove geotecniche eseguite per il limitrofo parco Alas;
- ✓ elaborati interpretativi delle prove S.P.T. eseguite per il limitrofo parco Alas;

- ✓ elaborati relativi ai sondaggi di sismica passiva a stazione singola (tromografia) denominati T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7 eseguite per il presente studio.

I risultati ed i dati delle indagini e dei sopralluoghi eseguiti sono certamente esaustivi per la verifica della fattibilità del progetto e per valutare in piena scienza e coscienza tutti gli impatti che le opere possono imporre alle componenti ambientali coinvolte.

Nella fase di progettazione esecutiva e di calcolo delle strutture in cemento armato, attività che impongono un approfondimento di carattere geologico-tecnico di maggiore dettaglio, si prevede l'esecuzione delle indagini indicate nell'apposito capitolo.

Si ritiene, infatti, che in fase di progetto esecutivo e di calcolo delle strutture di fondazione si renderà necessario integrare le indagini con la realizzazione di un sondaggio e relative prove geotecniche in situ ed in laboratorio in corrispondenza di ciascun aerogeneratore nell'esatta posizione in cui, a valle dell'iter autorizzativo, saranno effettivamente realizzati ed alcuni pozzetti esplorativi in corrispondenza dei tracciati dei cavidotti.

Ciò al solo scopo di poter progettare con il necessario dettaglio le strutture in c.a. non già perché le suddette indagini potranno fornire indicazioni sulla componente ambientale diverse da quelle che sono oggi in nostro possesso ai fini della valutazione degli impatti ambientali.

A tal proposito si evidenzia che le indagini (geologiche, geognostiche, geotecniche), per quanto effettuate nell'area di progetto del vicino parco eolico ALAS, forniscono un quadro esaustivo e completo delle problematiche ambientali relative agli aspetti geologici, geomorfologici ed idrogeologici, vista l'omogeneità degli affioramenti geologici, permettendo di avere ampia e sufficiente conoscenza delle componenti ambientali,

coerentemente alle Linee Guida SNPA del 2020 sulla redazione degli studi di impatto ambientale, che, come è noto, prevede la realizzazione di un numero di indagini sufficienti per delineare i connotati della componente ambientale ma non chiede certamente un dettaglio da spingere fino alle conoscenze utili per la calcolazione delle strutture in cemento armato, tanto che per la procedura di VIA il progetto allegato è del livello pari alla progettazione definitiva.

2. CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE

2.1.GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELL'AREA VASTA (SARDEGNA SETTENTRIONALE)

L'area interessata dalle opere è ubicata nella Sardegna Settentrionale che, da un punto di vista geologico/idrogeologico, si estende per 5402 Km², pari al 23% del territorio regionale; in esso sono presenti nove opere di regolazione in esercizio e cinque opere di derivazione.

I corsi d'acqua principali sono i seguenti:

- Rio Mannu di Porto Torres, sul quale confluiscono, nella parte più montana, il Rio Bidighinzu ed il Rio Funtana Ide (detto anche Rio Binza 'e Sea).
- Rio Minore che si congiunge al Mannu in sponda sinistra.
- Rio Carrabusu affluente dalla sinistra idrografica.
- Rio Mascari, affluente del Mannu di Portotorres in sponda destra, si innesta nel tratto mediano del rio presso la fermata San Giorgio delle Ferrovie Complementari.
- Fiume Temo, regolato dall'invaso di Monteleone Roccadoria, riceve i contributi del Rio Santa Lughia, Rio Badu 'e Ludu, Rio Mulino, Rio Melas, affluenti di sinistra che si sviluppano nella parte montana del bacino. Negli ultimi chilometri il Temo, unico caso in Sardegna, è navigabile con piccole imbarcazioni; il suo sbocco al mare, sulla spiaggia di Bosa Marina, avviene tramite un ampio estuario.

In particolari situazioni meteomarine il deflusso del Temo viene fortemente condizionato causando non rari allagamenti della parte bassa dell'abitato di Bosa; per gli stessi motivi riveste particolare

rilevanza il reticolo idrografico che circonda il centro urbano, il cui torrente principale è rappresentato dal Rio Sa Sea.

- Rio Sa Entale, che si innesta nel Temo in destra idrografica, e il Rio Ponte Enas, in sinistra, costituiscono gli affluenti principali per estensione del rispettivo bacino.
- Fiume Coghinas, il cui bacino occupa una superficie di 2.453 Km² ed è regolato da due invasi, riceve contributi dai seguenti affluenti: Rio Mannu d'Ozieri, Rio Tilchiddesu, Rio Butule, Rio Su Rizzolu, Rio Puddina, Rio Gazzini, Rio Giobaduras.

È da annoverare, inoltre, una serie di rii minori che si sviluppa nella Nurra e nell'Anglona, e, segnatamente:

- ✓ Rio Barca.
- ✓ Fiume Santo.
- ✓ Rio Frigiano.
- ✓ Mannu di Sorso.

L'assetto geologico della porzione definita dal *Piano per l'Assetto Idrogeologico della Regione Autonoma della Sardegna* come sub-bacino Coghinas-Mannu-Temo, che più direttamente interessa il sito di progetto, può essere suddiviso in tre grandi sottoinsiemi:

- 1) il settore Orientale e Sud-Orientale è prevalentemente paleozoico; una sequenza vulcano-sedimentaria permiana ricopre i terreni paleozoici ed i depositi detritici quaternari delimitano ad ovest il corpo intrusivo suddetto. La sequenza stratigrafica dell'area è chiusa dai depositi alluvionali del fiume Coghinas, da sabbie litorali e localizzati depositi eluvio-colluviali e di versante. Le alluvioni del Coghinas sono presenti con continuità tra i rilievi di Badesi - La Tozza – Monte Ruiu - Monte Vignola e la linea di costa. Lungo la

costa i depositi francamente alluvionali lasciano il posto ad eolianiti e sabbie litorali. I depositi eluvio-colluviali, prodotti dal disfacimento delle litologie presenti nell'area, localmente pedogenizzati, rivestono, con sottili spessori i versanti e localmente lasciano il posto a detrito di versante;

- 2) il settore Centrale è prevalentemente terziario. Il potente complesso vulcanico oligo-miocenico, che occupa quasi interamente e senza soluzione di continuità il settore centrale, costituisce il substrato della regione e poggia in parte sulla piattaforma carbonatica mesozoica della Nurra, ribassata di circa 2000 m dal sistema di faglie che ha dato origine alla "fossa sarda", ed in parte sul basamento cristallino paleozoico. Il Complesso vulcanico oligo-miocenico è stato ricoperto dalla "Serie sedimentaria miocenica (un complesso lacustre di transizione ai depositi marini calcareo-arenacei e marnoso-arenacei). Infine, i prodotti del vulcanismo plio-quadernario e i depositi detritici quadernari in corrispondenza delle incisioni vallive ed in prossimità dei corsi d'acqua;
- 3) il settore Nord-Occidentale è costituito dallo zoccolo cristallino dell'horst della Gallura paleozoico e dalle formazioni carbonatiche mesozoiche che culminano con i rilievi del Doglia e del sistema di Punta Cristallo e di Capo Caccia. Le intrusioni granitiche ercini-che affiorano solo nella propaggine settentrionale, costituita dall'isola dell'Asinara.

2.2. GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELL'AREA INTERESSATA DAL PROGETTO

Entrando nello specifico dell'area vasta intorno al sito di progetto (vedi carta geologica allegata fuori testo), sono affioranti le formazioni geologiche di origine vulcanica di seguito elencate, che non sono interessate dalle opere in progetto.

In particolare:

- ✓ UNITÀ DI VILLANOVA MONTELEONE (Burdigaliano): si tratta di depositi piroclastici in facies ignimbrítica, a chimismo riodaticito, da saldati a mediamente saldati, localmente argillificati per spessori anche superiori ad una decina di metri. La frazione saldata si presenta tenace, mediamente fratturata, di colore rossastro e/o grigio. L'unità in oggetto presenta anche livelli, che talvolta diventano prevalenti, di piroclastiti e cineriti da cementate a poco cementate, talvolta del tutto incoerenti ma sempre molto addensate.
- ✓ UNITÀ DEL CUGA (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrítica, saldati, con fiamme nerastre;
- ✓ UNITÀ DI MONTE FRUSCIU (Burdigaliano): Daciti ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Sa, Bt, Am, Mag; in cupole di ristagno e locali versamenti laterali;
- ✓ UNITÀ DI MONTE SA SILVA (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrítica, pomiceo-cineritici, bianco-grigiastri, non saldati;
- ✓ UNITÀ DI MONTE LONGOS (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrítica, pomiceo-cineritici, saldati, di colore nerastro.

- ✓ UNITÀ DI ROMANA. Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica a chimismo riodacitico, pomiceo-cineritici, mediamente saldati, ricchi in pomici e cristalli liberi di Pl, San, Bt, e subordinato Px.
- ✓ UNITÀ DI SU SUERZU (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, saldati, di colore rossastro, con fiamme grigiastre.
- ✓ UNITÀ DI PALA MANTEDDA (Aquitaniense-Burdigaliano): Si tratta di lave da andesitiche a dacitiche talora scoriacee ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Cpx, in domi e colate separate da livelli conglomeratici.
- ✓ UNITÀ DI MONTE SAN PIETRO (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, pomiceo-cineritici, non saldati, di colore bianco-rosato, a chimismo riolitico-riodacitico.
- ✓ UNITÀ DI NURAGHE VITTORE (Burdigaliano): Andesiti e daciti porfiriche per fenocristalli di Pl, Px e Ol; in colate.
- ✓ UNITÀ DI URI (Burdigaliano): Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, variamente saldati, grigiastri, ricchi in frammenti litici e cristalli liberi.

A queste si aggiungono le formazioni geologiche sedimentarie:

- FORMAZIONE DI MONTE SANTO (Serravalliano – Tortoniano). Calcari bioclastici di piattaforma interna, con rare intercalazioni silicoclastiche ed episodi biohermali; calcareniti.
- FORMAZIONE DI MORES (Burdigaliano Sup.): Calcareniti, calcari bioclastici fossiliferi. Calcari nodulari a componente terrigena, variabile, con faune a gasteropodi (Turrillidi), ostreidi ed echinidi (Scutella, Amphiope).

Dette formazioni sono parzialmente ricoperte da:

- ❖ Depositi antropici;
- ❖ Depositi di versante costituiti da detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati (Olocene);
- ❖ Depositi alluvionali che comprendono i depositi ubicati lungo gli alvei dei corsi d'acqua. Si tratta di rocce prevalentemente sciolte costituite da ghiaie, sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi con intercalazioni di sabbie grossolane e ghiaie (Olocene).
- ❖ Coltri eluvio-colluviali costituiti da detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica (Olocene).

Per quanto riguarda la specifica area interessata dalla realizzazione del progetto, 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, è stata utilizzata la campagna di rilievi effettuati, per il progetto del parco eolico "ALAS", ubicata in un'area limitrofa a quella interessata dal presente studio.

Entrando nel particolare, la situazione litostratigrafica locale è caratterizzata, dall'alto verso il basso, dall'affioramento di:

- ⇒ **UNITÀ DI VILLANOVA MONTELEONE (Burdigaliano):** Questa formazione geologica è quella che interessa direttamente tutti i 7 aerogeneratori del presente progetto e parte del cavidotto.
- ⇒ **UNITÀ DI SU SUERZU (Burdigaliano):** Questa formazione geologica è quella che interessa parte del cavidotto.

⇒ **UNITÀ DI PALA MANTEDDA (Aquitaniense-Burdigaliano):**

Questa formazione geologica è quella che interessa parte del cavidotto.

Le ignimbriti della Fm. Villanova Monteleone macroscopicamente si presentano con la tipica struttura fiammata o di tipo listato dovuta a livelli di minerale di neo-formazione e talora con fessurazioni colonnari e nastriformi prodotte dal raffreddamento. Esse presentano in genere tonalità di colore degradanti dal violaceo al rosso, al rosa antico.

Al microscopico si distinguono per una pasta di fondo prevalente quarzoso-feldspatica (con abbondanza di quarzo) ed immersi fenocristalli prevalentemente plagioclasici.

La giacitura è in genere in bancate sub-orizzontali o poco inclinate con potenza oscillante fra 20 e 40 m. e con tipiche intercalazioni tufacee. Alla base sono assenti i livelli scoriacei che confermano il carattere ignimbrico delle coltri. I banchi compatti presentano frequenti fratturazioni verticali, in contrasto con l'uniformità della morfologia degli orizzonti tufacei intercalati, che si presentano levigati e arrotondati dagli agenti atmosferici.

I tufi piroclastici e le cineriti sono in genere di colore variabile dal grigio-biancastro al grigio-verdastro e stratificazione ben definita solo localmente.

In conclusione, i litotipi che affiorano in gran parte dell'area ed in particolare in quella in cui verranno realizzati gli aerogeneratori denominati WTG1, WTG2, WTG3, WTG4, WTG5, WTG6, WTG7, sono riferibili all'Unità di Villanova Monteleone che nell'area abbiamo suddiviso da un punto di litologico in tre distinte porzioni:

⇒ la prima, certamente la più spessa, è costituita da ignimbriti saldate, tenaci e fratturate;

⇒ la seconda è costituita da depositi piroclastici e/o cineritici litologicamente costituiti da sabbie generalmente fini e limi sabbiosi. Generalmente si ritrova intercalata alla prima ma localmente diventa predominante;

⇒ la terza è costituita da depositi vulcanici argillificati di spessore generalmente limitato ma che può raggiungere anche una decina di metri e più.

Tutti i suddetti terreni sono ricoperti da uno spessore variabile tra 0.5 e 2.00 m di terreno vegetale con inclusi elementi lapidei eterometrici.

Per maggiori dettagli si rimanda alle stratigrafie allegate.

Dal punto di vista idrogeologico l'area direttamente interessata dallo studio è caratterizzata dall'affioramento di terreni diversi che, da un punto di vista idrogeologico, abbiamo suddiviso in 3 tipi di permeabilità prevalente:

❖ **Rocce permeabili per porosità:** Si tratta di rocce incoerenti 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. Di conseguenza la circolazione idrica sotterranea è discontinua con livelli acquiferi sospesi. Rientrano in questo complesso i terreni afferenti alle piroclastiti ed alle cineriti sciolte.

❖ **Rocce impermeabili:** Si tratta di rocce pseudocoerenti dove la permeabilità risulta essere tanto bassa in relazione alla granulometria da essere considerati praticamente impermeabili. Rientrano in questo complesso i terreni afferenti ai depositi vulcanici argillificati che fungono da substrato del sistema multifalde presente nell'area vasta.

❖ **Rocce permeabili per fessurazione e fratturazione:** Si tratta di rocce coerenti che presentano un sistema di fessurazioni e fratture di dimensioni tali da rappresentare vie di veloce infiltrazione per le acque meteoriche. Sono compresi in questa categoria le lave e la frazione ignimbratica non alterata. In generale il grado di permeabilità è medio basso.

Si mette in evidenza, infine, che il territorio direttamente interessato dal progetto non è significativamente ricco di corsi d'acqua e sono tutti a carattere torrentizio, con consistenti quantità di acque nei brevi periodi di piogge e scarsi d'acqua o pressoché asciutti nel restante periodo dell'anno.

Il sistema idrografico nella zona settentrionale è caratterizzato dalle aste idrografiche di primo e secondo ordine che confluiscono nel lago di Temo ed il relativo bacino idrografico.

Nell'area vasta è presente, inoltre, un importante lago artificiale, il Cuga, alimentato dal rio Cuga-Barca. È stato costruito nel 1965 e si trova solo in parte nel territorio di Ittiri ed è destinato a scopi irrigui.

Per quanto riguarda invece gli acquiferi sotterranei, il Piano di Tutela delle Acque individua 37 acquiferi per tutta la Sardegna, con caratteristiche idrogeologiche omogenee.

Il sito di progetto è ubicato nell'Unità Idrografica Omogenea del Temo ed in particolare nell'ambito del vasto areale dell'Acquifero delle Vulcaniti Oligo-Mioceniche della Sardegna Nord-Occidentale caratterizzato da una generale permeabilità medio-bassa e da sistemi multifalda dovuti all'alternanza di litotipi piroclastici e/o lavici saldati a permeabilità media, intercalati alle porzioni piroclastiche sabbiose finì a permeabilità bassa ed a strati anche di notevole spessore di vulcaniti argillificate praticamente impermeabili.

Nell'ambito di tale acquifero si registra una notevole presenza di manifestazioni sorgentizie, generalmente di modesta portata, non sempre continua, spesso di carattere stagionale.

Questo è dovuto in maniera predominante alla geologia dell'area, costituita da elementi granitici e tufacei a bassissima permeabilità e dalla presenza di alternanze di strati impermeabili che suddividono gli affioramenti vulcanici in piccoli bacini di alimentazione di limitate falde sotterranee testimoniate dalla presenza di modeste venute d'acqua.

Si riporta di seguito un elenco delle emergenze più significative presenti nell'ambito di tale Acquifero che ha un'estensione enorme di oltre **2.500 km²**:

- Funtana Abbauddu (2,9 l/sec);
- Postos Alvos (0,8 l/sec), di importanza storica in quanto utilizzata come fonte idrica pubblica per l'abitato di Villanova Monteleone);
- Abbaia Cantaru Pala (4,8 l/sec);
- Funtana Sa Entale (1,5 l/sec);
- Sas Benas (4,50 l/sec);
- Funtana Santu Bainzu (1,3 l/sec).

Nessuna di queste si trova nell'ambito dell'areale interessato dalle opere in progetto e non potrà essere interferita dalla realizzazione dell'impianto eolico in quanto ubicato sempre all'esterno dei rispettivi bacini di alimentazione.

Importante da segnalare la presenza di manifestazioni termali, con le due importanti sorgenti di Mattagiana e di Abbarghente, **anch'esse fuori dall'areale interessato dal progetto.**

Queste sorgenti, con temperatura al di sopra di 22°C, sono dotate di

un chimismo particolare. La prima sorgente ha un chimismo tale da non farla iscrivere nella categoria di quelle termominerali e molto simile a quelle delle vicine sorgenti fredde che scaturiscono dalle formazioni ignimbriche.

Si ipotizza che l'elevata temperatura sia dovuta principalmente ad un bacino di alimentazione profondo che scaturisce in superficie tramite una faglia.

La seconda sorgente è situata a 5 Km dall'abitato di Romana e pure questa trova la sua via d'emergenza nelle successioni ignimbriche dell'area, tramite la faglia che, con direzione Sud-Nord, condiziona tutto il tracciato del Temo.

A queste, che sono le sorgenti più importanti, se ne aggiungono una moltitudine che sono venute a giorno durante i lavori di scavo della galleria per derivare le acque dall'invaso di Monteleone Roccadoria fino al bacino del Cuga.

Come le precedenti, anche queste hanno la loro origine nella formazione ignimbrica.

Questo sistema termale, per ubicazione, distanza del bacino di alimentazione dalle aree di progetto e profondità del livello freatico non potrà essere interferito dalla realizzazione delle opere che sono completamente esterne al circuito termale.

Da quanto sopra esposto emerge una permeabilità generale dell'acquifero molto bassa, in quanto le successioni geologiche che la compongono sono molto compatte e non offrono grandi vie all'acqua per la sua emergenza.

Ne risulta, quindi, un sistema complesso costituito da numerosi bacini di alimentazione molto frammentati, di estensione limitata, non in collegamento tra loro e che danno luogo ad un gran numero di sorgenti

ma tutte di portata molto bassa e ciascuna afferente ad un proprio limitato bacino di alimentazione.

Nel comune di Villanova Monteleone, tra i 500 e i 200 metri di altitudine nascono numerose sorgenti ma di scarsa portata e generalmente di carattere stagionale, legate ai modesti affioramenti permeabili che poggiano sulla frazione piroclastica argillificata della Formazione geologica.

Le più significative sono:

- ✓ Funtana Cantaro; a sud dell'abitato;
- ✓ Funtana Paradisu;
- ✓ Fontana Idda, a sud-est del parco in progetto;
- ✓ Fontana sa Pittigaia, a nord-ovest del parco;

Nessuna di queste sorgenti interessa il sito dove verranno realizzate le opere in progetto anche se alcune sono abbastanza vicine ma afferiscono a bacini di alimentazione esterni all'areale dove verranno realizzati gli aerogeneratori o questi si trovano a quote molto più elevate rispetto al livello freatico.

Nessuna di queste, infatti, si trova nell'ambito dell'areale interessato dalle opere in progetto (500 mt. dagli aerogeneratori) e non potranno essere interferite dalle opere in progetto perché il cavidotto necessita di scavi modestissimi, poco superiori al metro, e gli aerogeneratori che sono ubicati nelle rocce vulcaniche saranno fondati su tipologia diretta tramite platea e, quindi, interessano solo i primi metri dal p.c.

Gli aerogeneratori che saranno fondati su pali sono solo quelli che interessano i terreni argillosi che, quindi, per propria intrinseca natura non possono contenere falde freatiche.

Queste sorgenti formano abbeveratoi nell'agro o fontane nell'abitato e servono prevalentemente agli usi agricoli.

Quelle sotto indicate saranno oggetto di opere di monitoraggio nella fase di realizzazione degli aerogeneratori e di opere di compensazione atte a migliorarne la fruizione e per creare aree umide a beneficio della biodiversità.

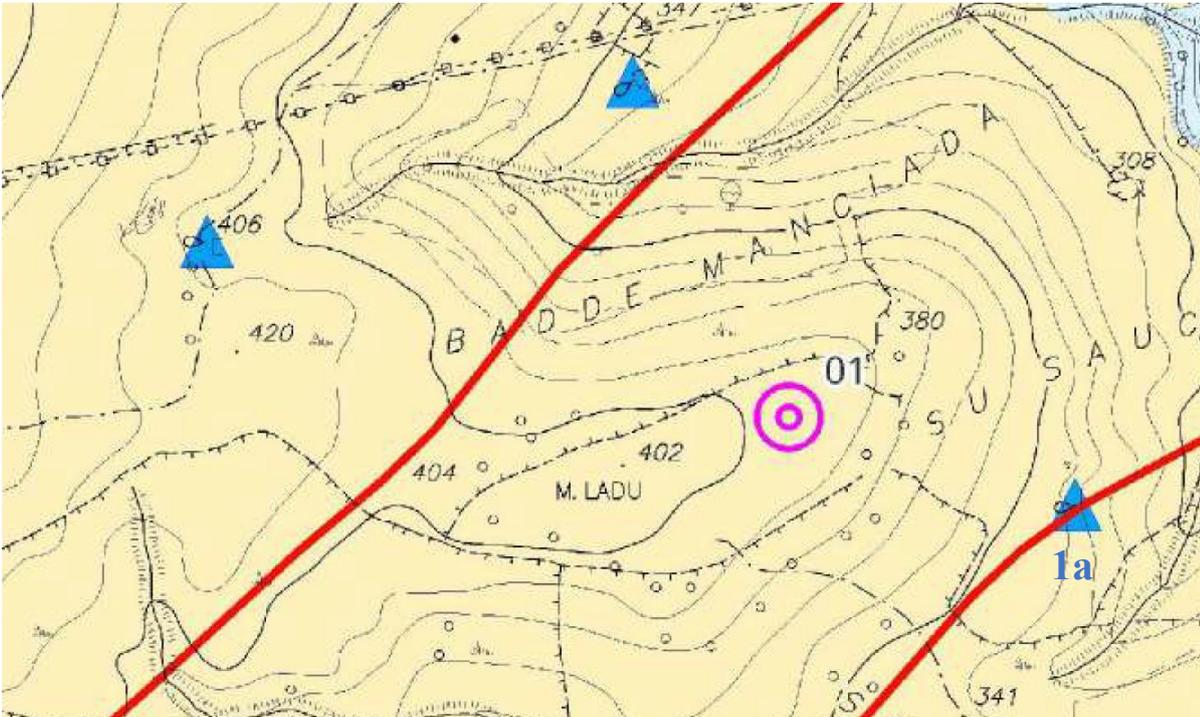
Sono state censite, tramite rilievi in situ e ricerca bibliografica, altre sorgenti molto più modeste non rientranti né nell'ambito del PTA, né nel Piano Regolatore degli Acquedotti ma che abbiamo ritenuto di riportare perché indicative di un acquifero caratterizzato da tante piccole falde superficiali, spesso a carattere stagionale legate alla notevole variabilità della permeabilità anche all'interno della stessa formazione.

Sono a carattere stagionale e, comunque, la realizzazione e l'esercizio dell'impianto non può avere alcun impatto negativo e significativo sulla circolazione idrica sotterranea.

Vista l'importanza che per il territorio rivestono queste piccole fonti idriche, comunque utilizzate per l'agricoltura e la pastorizia in un ambito regionale caratterizzato da una generale penuria di falde utilizzabili, si è ritenuto necessario eseguire uno studio di grande dettaglio su tutte le sorgenti presenti nelle vicinanze degli aerogeneratori al fine di scongiurare qualunque sia pure minima interferenza con le stesse.

Gruppo Sorgenti vicine all'aerogeneratore 1

Sono tre sorgenti dislocate a quote diverse con differenze anche di oltre 50 metri tra loro.



Sorgente 1a





Si tratta di un affioramento roccioso da cui fuoriesce una limitatissima quantità di acqua.

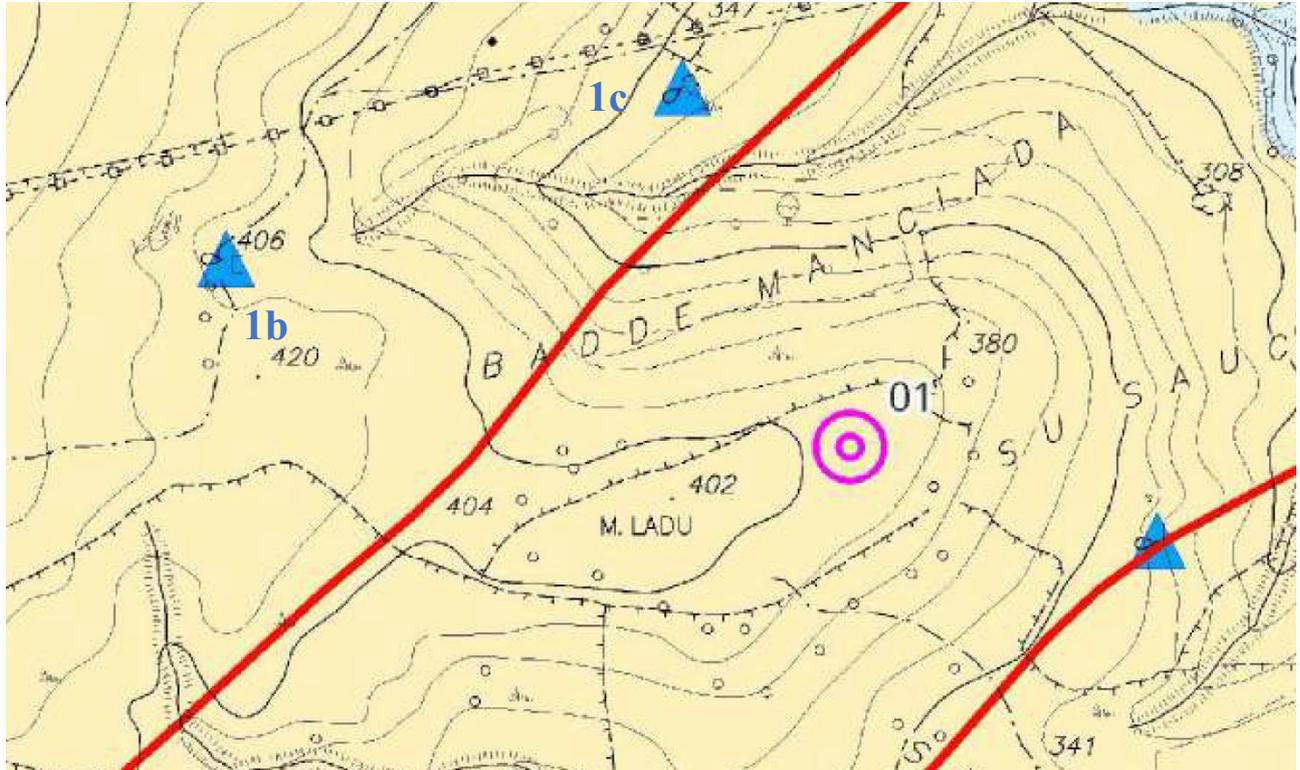
Non è presente alcuna opera di presa e non è utilizzata.

L'acqua inumidisce il terreno circostante e si infiltra rapidamente.

La portata è limitata (<1l/min) ed è ubicata ad una quota di oltre 60 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore che ricordiamo sarà fondato su fondazioni dirette.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente che comunque si ricorda non è utilizzata per la stagionalità e la scarsissima portata che la caratterizza

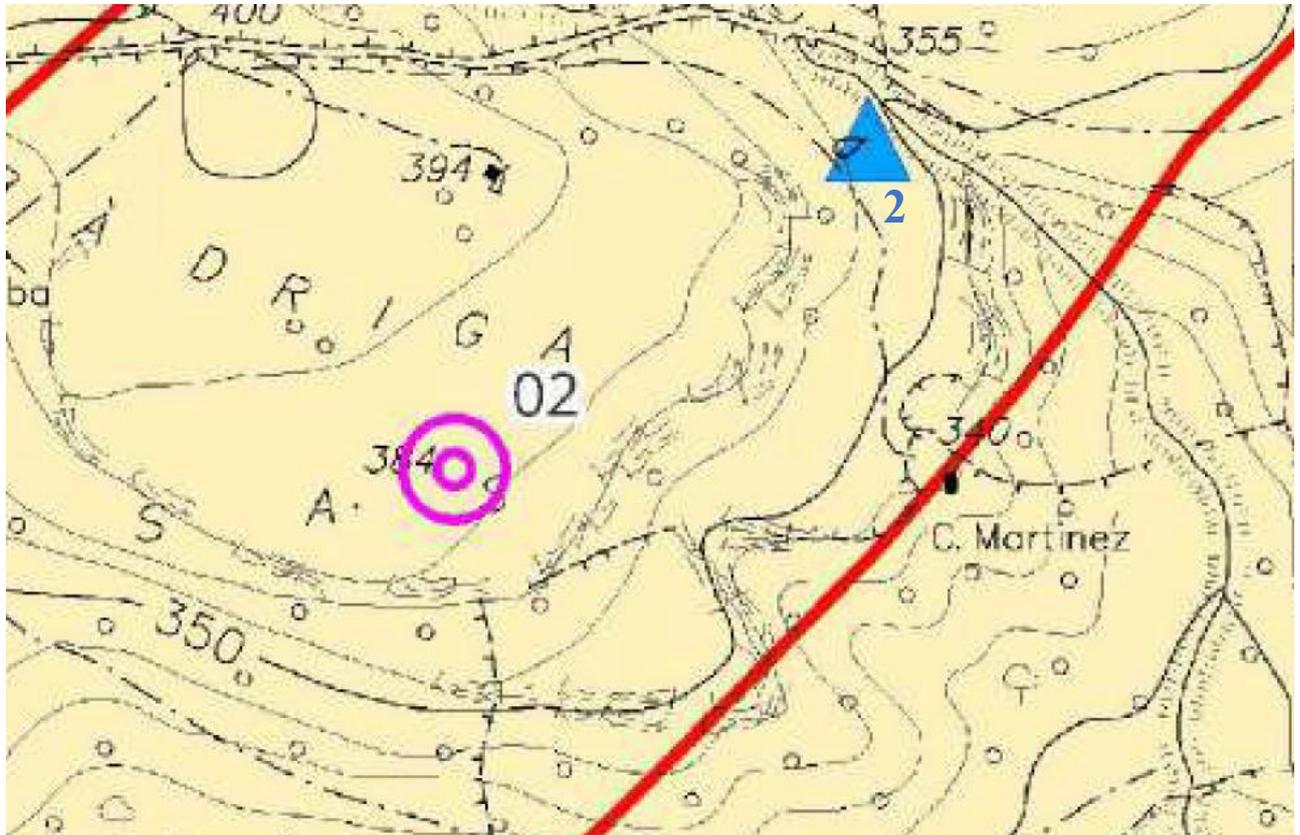
Sorgenti 1b e 1c



Non è stato possibile raggiungerle per la presenza di folta vegetazione ma si possono fare le seguenti considerazioni:

- ❖ la sorgente 1b si trova ad una quota superiore a quella dell'aerogeneratore 1 e, quindi, nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente;
- ❖ la sorgente 1c è ubicata ad una quota di oltre 60 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore che ricordiamo sarà fondato su fondazioni dirette. Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente che comunque si ricorda non è utilizzata per la stagionalità e la scarsissima portata che la caratterizza.

Sorgente vicina all'aerogeneratore 2



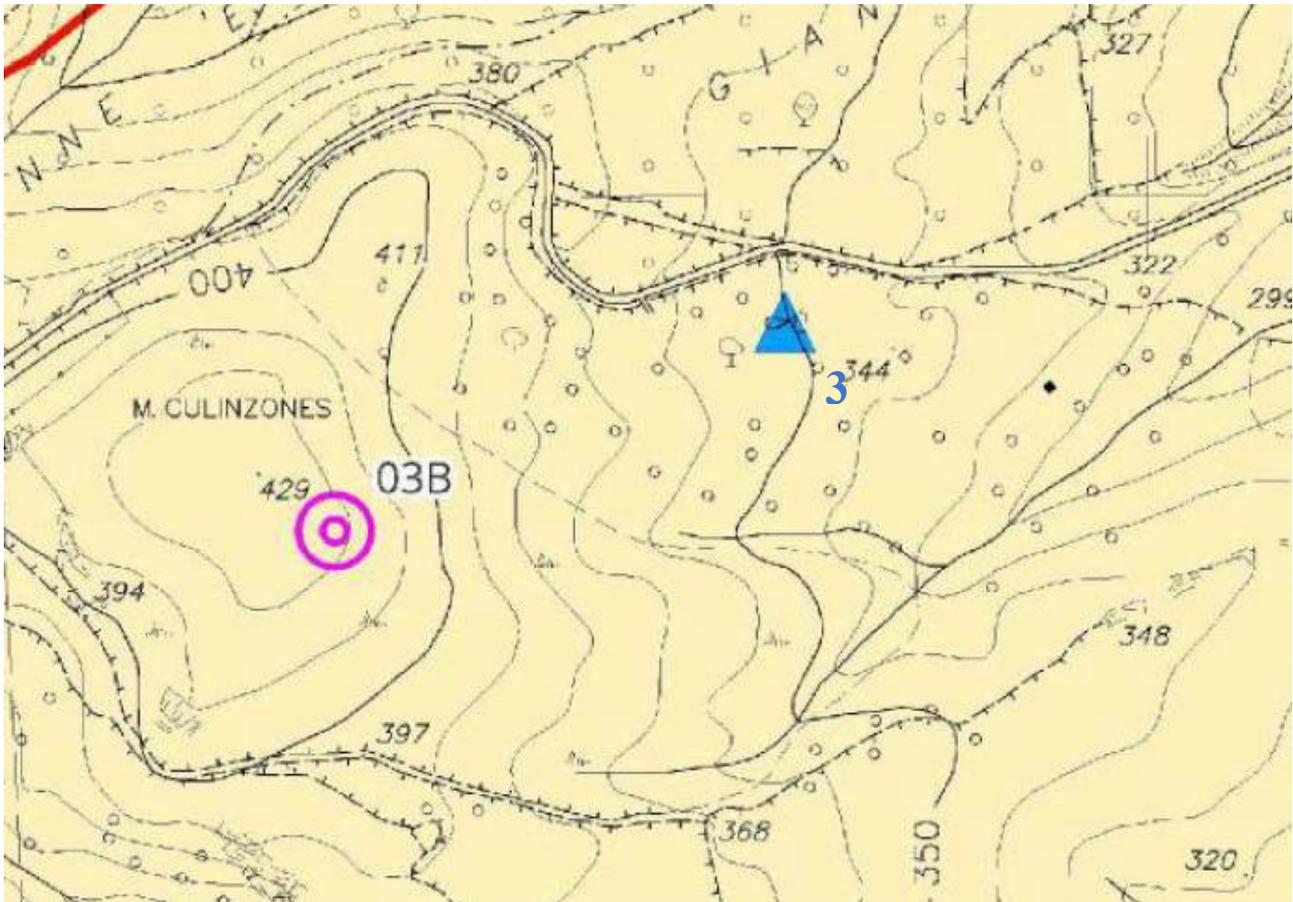
E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca a servizio del bestiame.

Si tratta di un drenaggio superficiale costituito da un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30 cm.

La portata è limitata (<1l/min) ed è ubicata ad una quota di oltre 30 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore che ricordiamo sarà fondato su fondazioni dirette.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente.

Sorgente vicina all'aerogeneratore 3





E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca a servizio del bestiame.

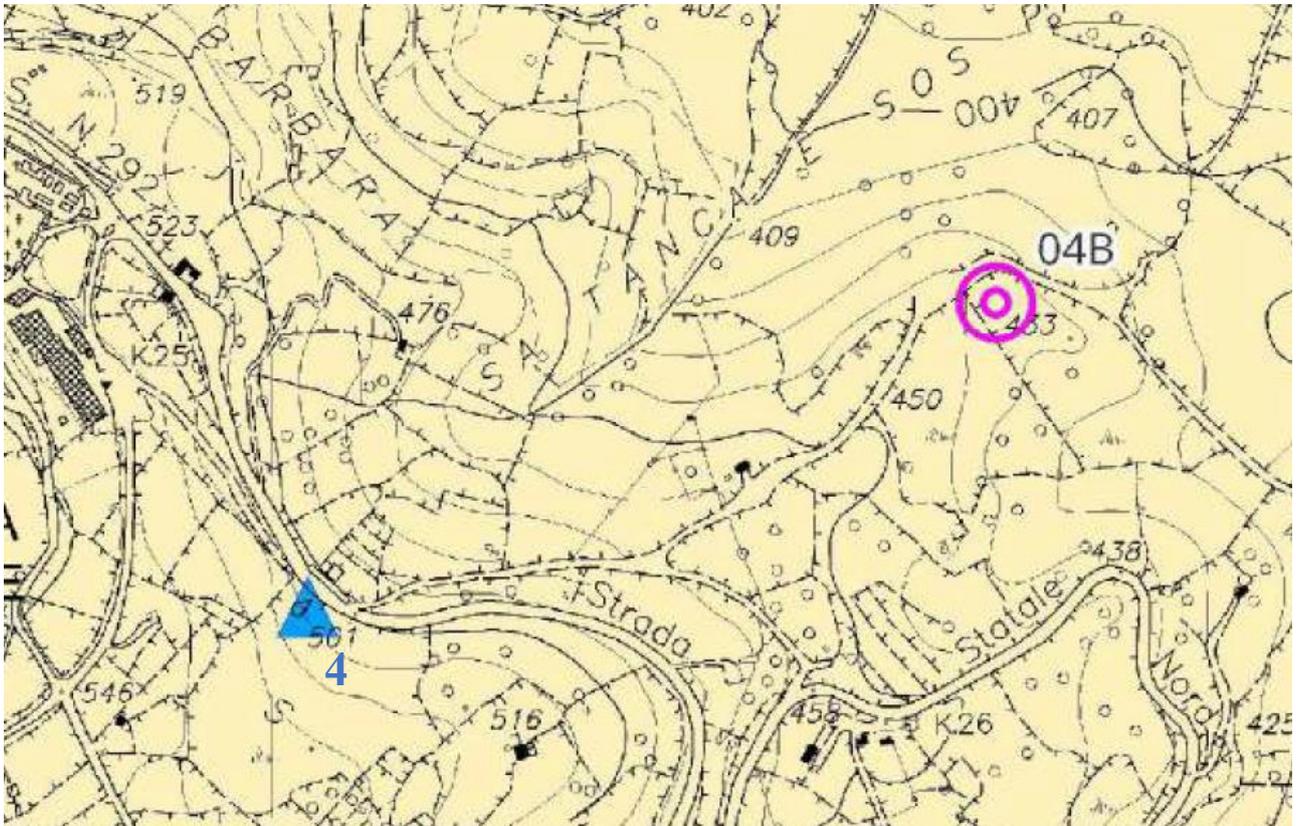
Si tratta di un drenaggio superficiale costituito da un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30-50 cm.

Alla data del sopralluogo non si osserva alcuna fuoriuscita di acqua.

E' ubicata ad una quota di oltre 70 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente anche se fondato su fondazioni indirette.

Sorgente vicina all'aerogeneratore 4





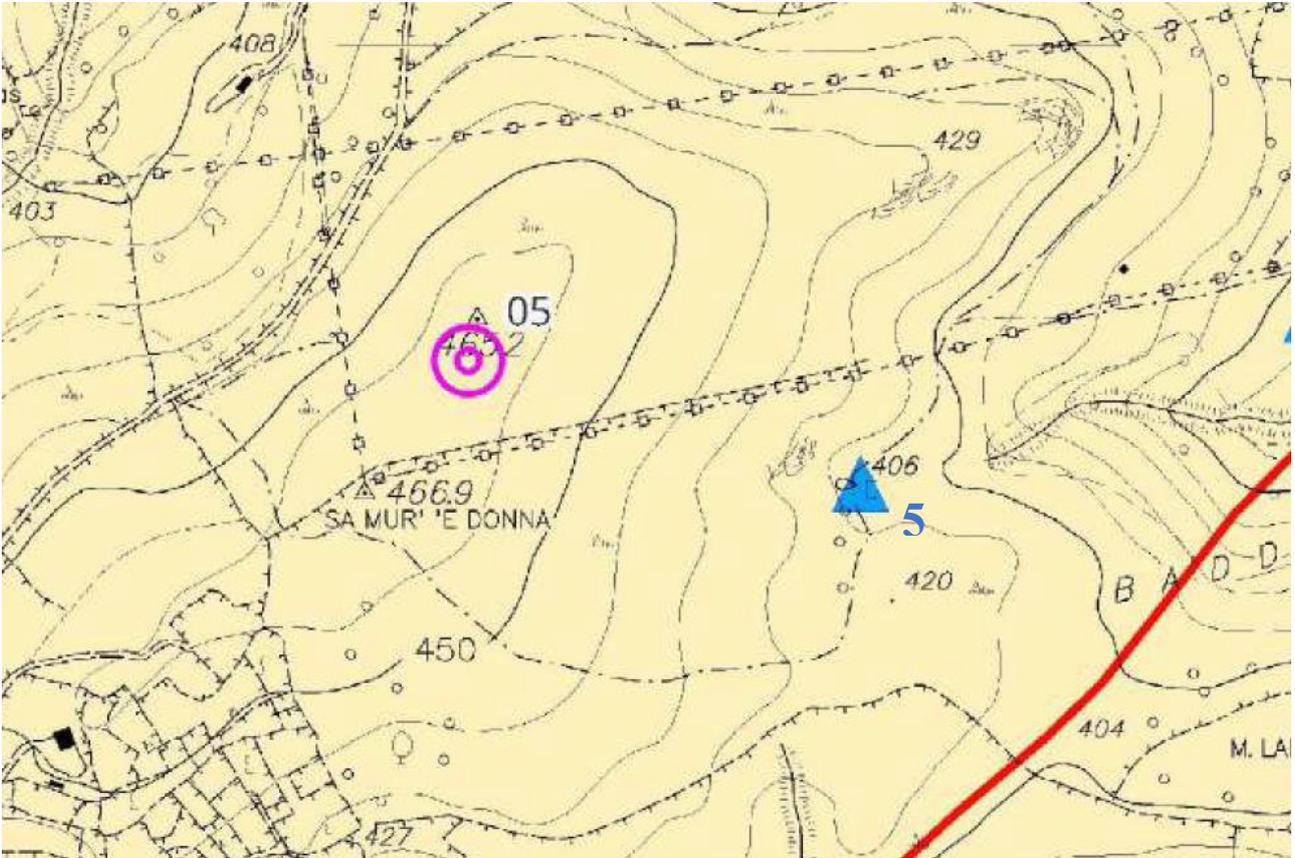
E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca tramite un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30-50 cm.

Alla data del sopralluogo si osserva una modestissima venuta d'acqua di portata inferiore a 1 l/min fuoriuscita di acqua.

E' ubicata ad una quota di oltre 80 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente anche se fondato su fondazioni indirette.

Sorgente vicina all'aerogeneratore 5



E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca a servizio del bestiame.

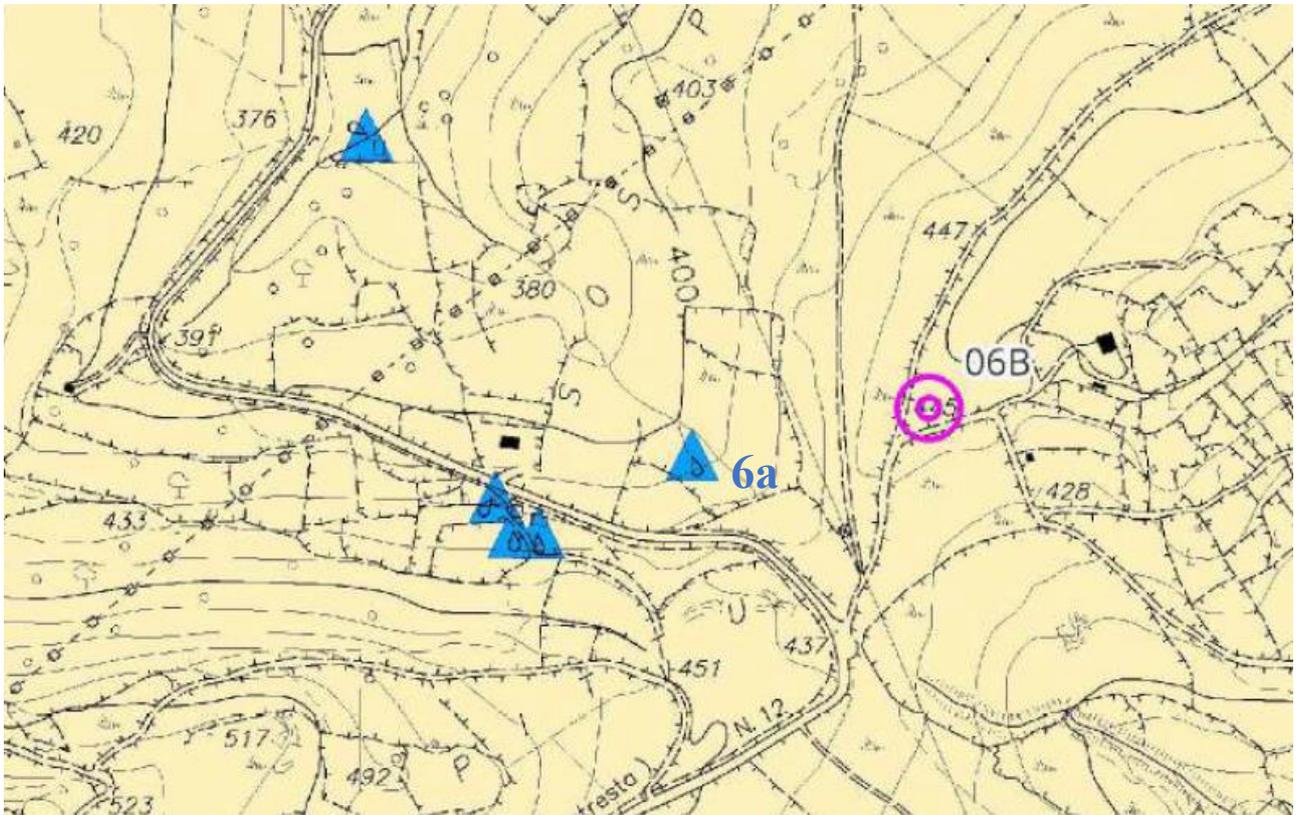
Si tratta di un drenaggio superficiale costituito da un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30-50 cm.

Alla data del sopralluogo non si osserva alcuna fuoriuscita di acqua.

E' ubicata ad una quota di oltre 70 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente anche se fondato su fondazioni indirette.

Gruppo sorgente vicina all'aerogeneratore 6



Sorgente 6a





E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca a servizio del bestiame.

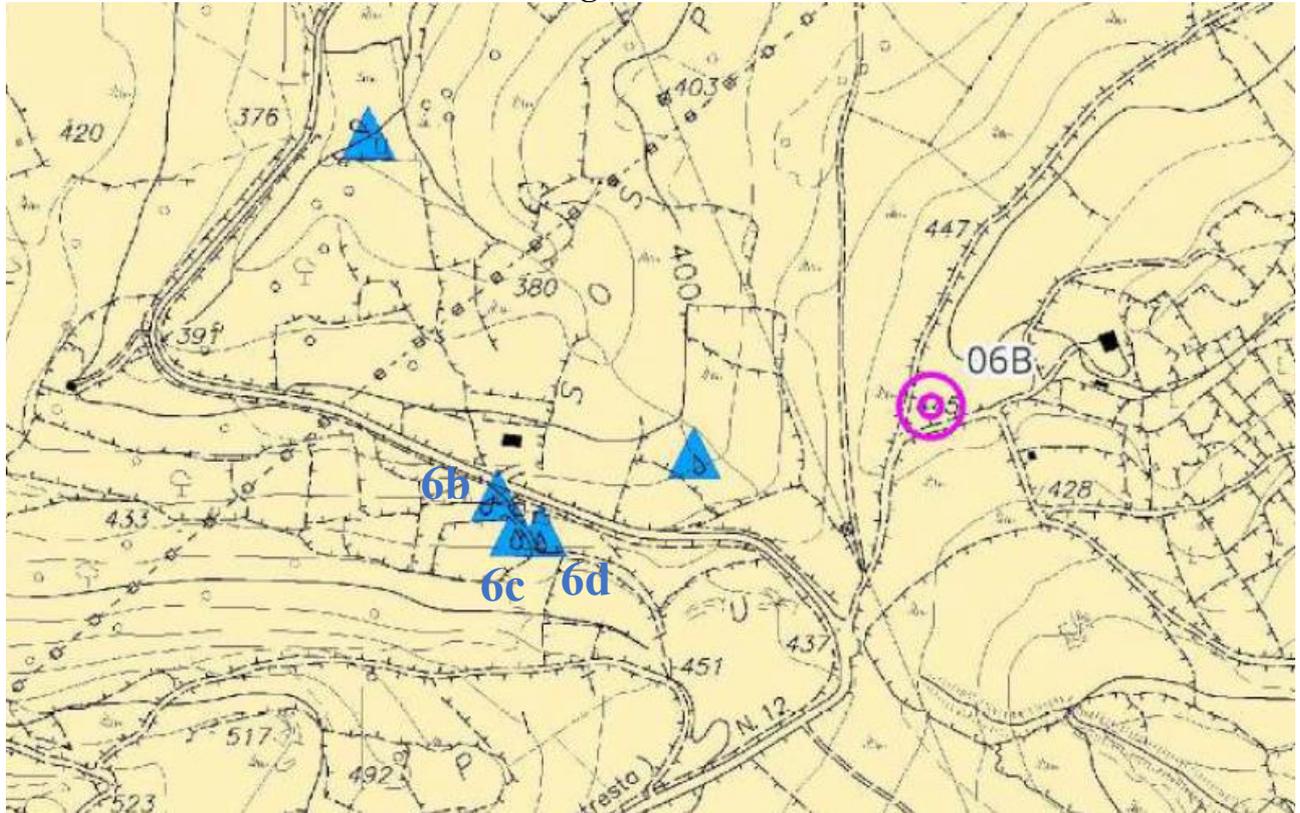
Si tratta di un drenaggio superficiale costituito da un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30-50 cm.

Alla data del sopralluogo non si osserva alcuna fuoriuscita di acqua.

E' ubicata ad una quota di oltre 40 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore anche se fondato su fondazioni indirette e la sorgente anche perché si trova nel versante opposto allo stesso.

Sorgenti 6b, 6c e 6d





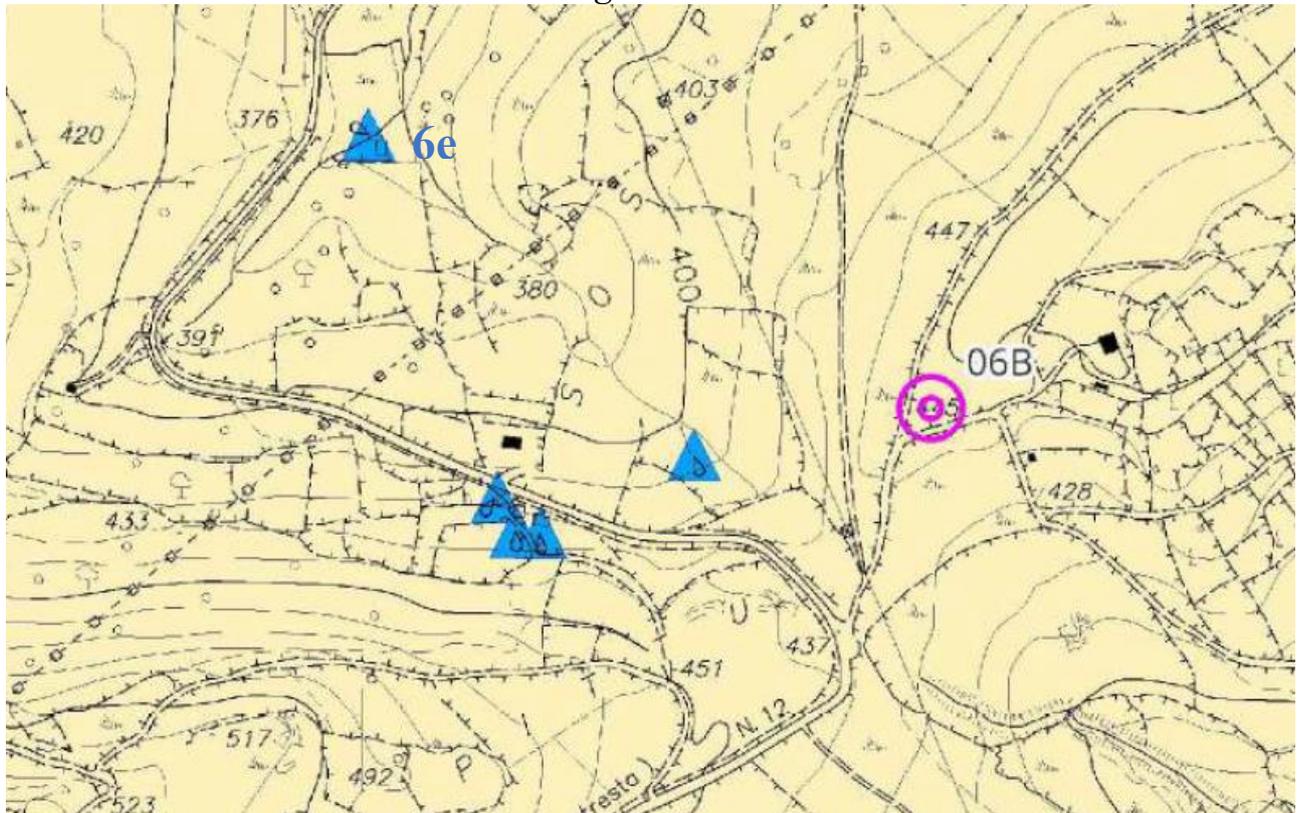
Sono piccole scaturigini che alimentano vasche a servizio del bestiame.

Alla data del sopralluogo non si osserva alcuna fuoriuscita di acqua.

Sono ubicate ad una quota di oltre 40 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore e la sorgente anche se fondato su fondazioni indirette.

Sorgente 6e







E' una piccola scaturigine che alimenta una vasca a servizio del bestiame.

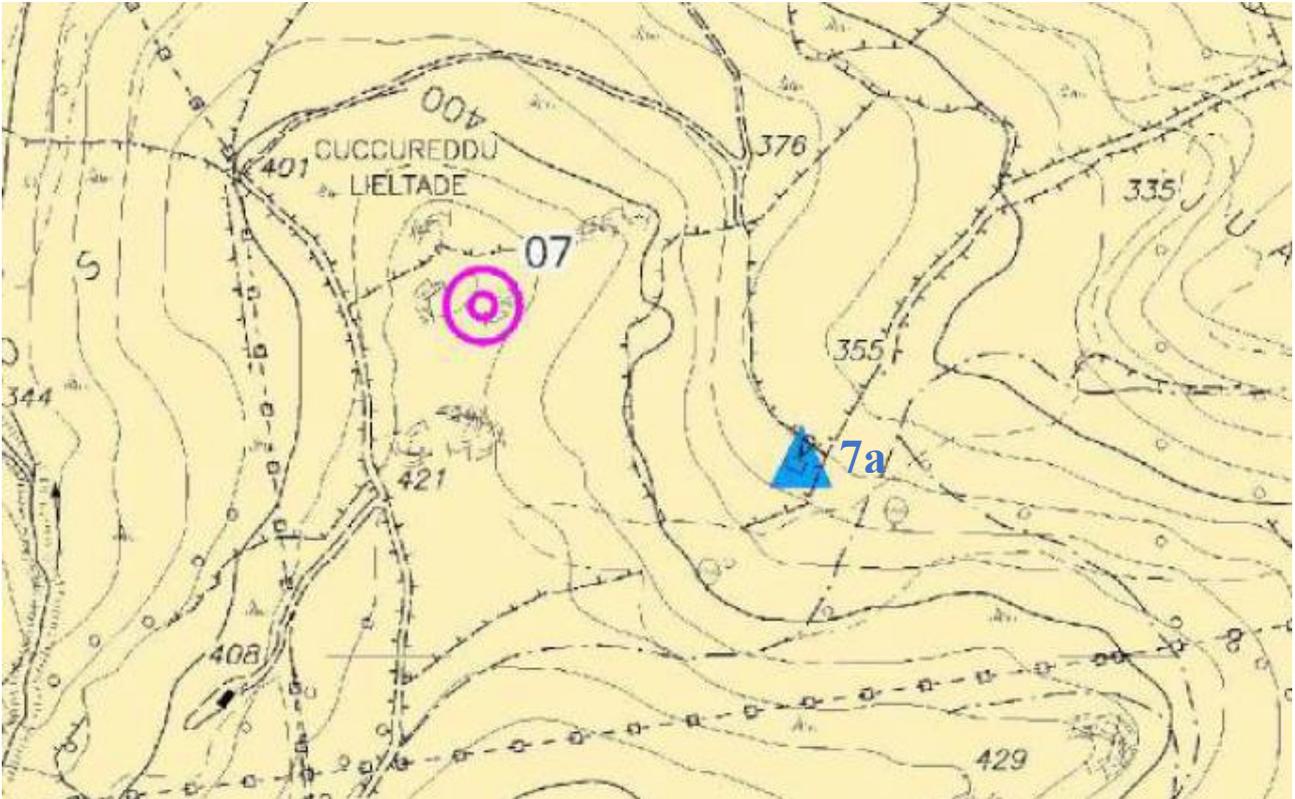
Si tratta di un drenaggio superficiale costituito da un tubo in gomma di diametro di circa 2 cm immerso nel terreno alla profondità di circa 30-50 cm.

Alla data del sopralluogo si osserva una modestissima fuoriuscita di acqua inferiore a 0,5 l/min.

E' ubicata ad una quota di oltre 80 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore anche se fondato su fondazioni indirette e la sorgente.

Gruppo di sorgenti vicine all'aerogeneratore 7



Sorgente 7a



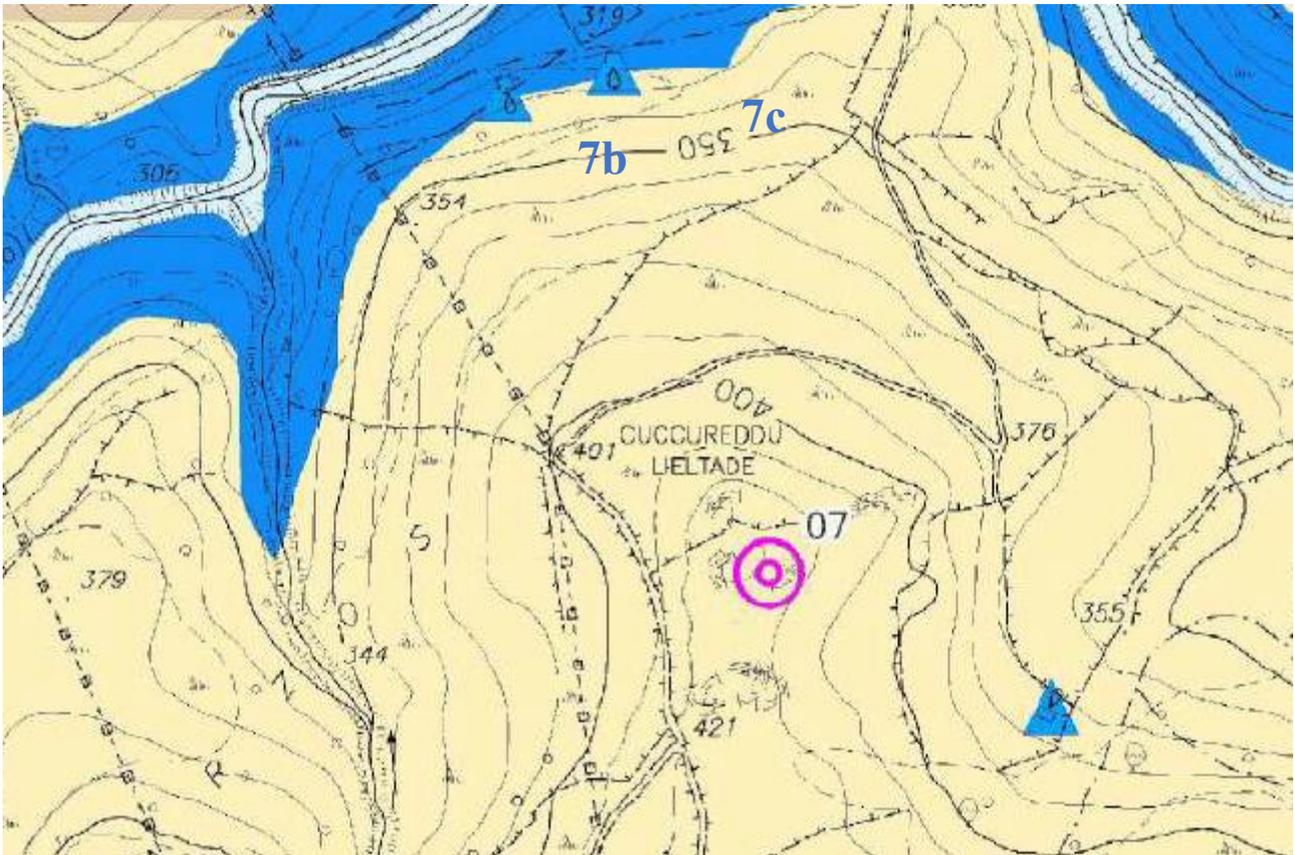


E' una piccola scaturigine che alimentava una vasca a servizio del bestiame ma che sembra completamente dismessa non essendoci alcun tubo di alimentazione. In ogni caso alla data del sopralluogo non si osserva alcuna fuoriuscita di acqua.

E' ubicata ad una quota di oltre 50 metri inferiore a quella dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore anche se fondato su fondazioni indirette e la sorgente anche perché si trova nel versante opposto allo stesso.

Sorgenti 7b e 7c



I punti non sono raggiungibili per la presenza di recinzioni invalicabili, in ogni caso la falda è a profondità maggiori di 100 m rispetto all'ubicazione dell'aerogeneratore.

Nessuna interferenza può esserci tra le fondazioni dell'aerogeneratore anche se fondato su fondazioni indirette e la sorgente anche perché si trova nel versante opposto allo stesso.

In conclusione si evince che la realizzazione del Parco Eolico non ha impatto sull'assetto idrico sotterraneo ma, a vantaggio della sicurezza, in fase di progettazione esecutiva si ritiene utile installare un piezometro in ogni aerogeneratore ai fini di un completo e corretto monitoraggio della componente acque sotterranee, anche se appare molto verosimile che non si intercetti alcuna falda significativa alle profondità di realizzazione delle opere.

Da quanto detto sopra si evince che nessun impatto significativo e negativo può essere indotto dalla realizzazione degli aerogeneratori sulla risorsa idrica che comunque sarà monitorata con l'istallazione di ben 7 piezometri per la misura del livello freatico e della qualità delle acque e del controllo sulla qualità delle acque nelle sorgenti vicine sopra descritte.

La realizzazione del cavidotto impegna spessori modestissimi ed è del tutto impossibile interferire il livello freatico con gli scavi.

In conclusione, dallo studio idrogeologico si evince che:

- ❖ la presenza di frequenti livelli e strati argillificati all'interno dei complessi vulcanici comporta la formazione di acquiferi di modestissima potenzialità a causa di aree di alimentazione piuttosto limitate che si evidenziano con la presenza di piccole polle sorgentizie a carattere stagionale (quelle sopra descritte saranno valorizzate con le opere di compensazione previste);

- ❖ l'ubicazione degli aerogeneratori è stata scelta proprio in modo da non interferire con gli acquiferi e sono stati posti ad una certa distanza dalle polle sorgentizie;
- ❖ gli aerogeneratori fondati sulle ignimbriti avranno tipologia diretta con profondità di scavo limitate a 3-5 mt. che non possono interferire sulla circolazione idrica sotterranea che si sviluppa a profondità maggiori;
- ❖ gli aerogeneratori che saranno fondati su pali hanno come terreno di sedime la parte argillificata delle vulcaniti e, quindi, non sono sede di falde freatiche e sono esterni alle aree di alimentazione degli acquiferi;
- ❖ gli aerogeneratori e loro piazzole non interferiscono con il reticolato idrografico superficiale;
- ❖ le opere in progetto non producono emissioni di sostanze inquinanti nè nel suolo, nè nel sottosuolo, nè nel reticolato idrografico superficiale.

In definitiva non sussistono criticità di carattere idrogeologico che possano ostare la realizzazione delle opere in progetto nella più ampia sicurezza e salvaguardia della risorsa naturale "Acqua".

In ogni caso il Piano di Monitoraggio Ambientale, per maggiore cautela, ha previsto di tenere sotto osservazione ante operam, in operam ed in fase di esercizio la qualità e le portate delle sorgenti sopra descritte e la realizzazione di un piezometro per ogni aerogeneratore (vedi elaborato denominato Piano di Monitoraggio Ambientale).



SONDAGGIO

S3

Committente: RWE Renewables Italy s.r.l.	Scala: 1:150
Oggetto Lavori: Parco eolico ALAS	Data: 9-12/03/2020
Località: ITTIRI (SS)	Redattore: Dott. Geol. Gualtiero Bellomo

Pz	Prof.	Litologia	Campioni	DESCRIZIONE
				0.20
				Terreno vegetale
				Ignimbrite violaceo-rossastra litoida. Sono presenti frammenti di vetro con caratteristica struttura fiamma di colore arancio. Si rileva il diverso grado di fratturazione nelle porzioni di carota: in particolare nei tratti compresi tra 1 m e 1,50 m, 6 m e 7 m e tra 15,20 m e 18,60 m la roccia si presenta fortemente fratturata con piani di fratturazione sub verticali. In queste porzioni il deposito si presenta alterato. Da 0.20 m a 5 m la roccia si presenta "mediamente fratturata"
			7.30 - 8.00	
			S3R1	
			13.70 - 14.00	
			S3R2	
			14.50 - 14.75	
			S3R3	
				19.60
			20.60 - 21.00	
			S3C1	
			23.30 - 23.60	
			S3CR2	
				24.50
			26.70 - 27.10	
			S3CR3	
			29.00 - 29.70	
			S3C5	
				30.00

Colonna stratigrafica del sondaggio S3 (impianto Alas 1)



SONDAGGIO

S6

Committente: RWE Renewables Italy s.r.l.					Scala 1:150	
Oggetto Lavori: Parco eolico ALAS					Data: 12-17/03/2020	
Località: ITTIRI (SS)					Redattore: Dott. Geol. Gualtiero Bellomo	
Pz	Prof.	Litologia	Campioni	SPT	N	DESCRIZIONE
						0.40 Terreno vegetale
1		+ + + + + + + + + +				Depositi piroclastici argillificati fortemente addensati a grana fine prevalentemente limo-sabbiosi di colore grigiastro o giallo ocra, con inclusi a tratti ciottoli litici arrotondati anch'essi di colore grigiastro di dimensioni millimetriche a centimetriche. Si carotano a spezzoni di 5-7 cm.
2						
3						
4						
5						
6						
			5.45 - 6.00			
			S6C1			
7						7.40
8		▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽				Ignimbriti molto fratturate di colore rossastro con fiammature, mediamente saldate. Si carotano a blocchi di lunghezza di 15 - 20 cm. Presenti a luoghi piani di rottura sub-verticali
9						
10						
			9.70 - 10.00			
			S6C2			
11						11.00
12						Depositi piroclastici di colore arancio, argillificati, consistenti.
13						
14						14.10
15		~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~				Depositi piroclastici fortemente addensati a grana fine prevalentemente sabbiosa di colore grigiastro, incoerenti.
16						
17						16.00
18						Depositi piroclastici argillo-sabbiosi di colore marrone rossastro con inclusi elementi litici sub arrotondati di colore grigio chiaro, consistenti.
19						
20			20.00 - 20.30			
			S6C3			
21				12-21-33	54	
22						
23						22.60
						23.00 Roccia ignea (ignimbrite)
24				20-14-18	32	Depositi piroclastici a grana fine sabbiosa
25						
26						26.30
						26.50 Roccia ignea (ignimbrite)
27						27.00 Depositi piroclastici a grana fine sabbiosa
						27.40 Roccia ignea (ignimbrite)
28				16-16-24	40	Depositi piroclastici a grana fine sabbiosa
29						
						29.20 Roccia ignea (ignimbrite)
						30.00

Colonna stratigrafica del sondaggio S6 (impianto Alas 1)

2.3. CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE

Nell'area vasta l'habitus geomorfologico è piuttosto regolare e costituito da un paesaggio contraddistinto da versanti con limitate pendenze caratterizzati dall'affioramento dei depositi piroclastici sia quelli afferenti alla frazione granulometricamente riferibili alle sabbie, sia alla frazione argillificata, mentre le ignimbriti saldate e tenaci e le lave danno luogo a versanti più acclivi caratterizzati da rotture di pendenze più accentuate.

Infatti, da un lato le litologie di tipo incoerente e/o pseudocoerente, rappresentate dai termini sabbiosi e/o argillificati, affiorano in corrispondenza di rilievi dall'andamento dolce, dall'altro quelle coerenti, ovvero le litologie piroclastiche tenaci e laviche, danno luogo a rilievi mediamente acclivi.

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 pseudo-coerenti o incoerenti.

Le condizioni di stabilità delle aree interessate dalla realizzazione degli aerogeneratori 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.

Non si ritiene, quindi, in questa fase, di eseguire verifiche di stabilità poiché, essendo le aree totalmente esenti da qualunque fenomenologia che possa modificare l'attuale habitus geomorfologico, non è possibile

l'instaurarsi di alcun movimento franoso e, quindi, i calcoli farebbero registrare valori del coefficiente di sicurezza decisamente superiori ai minimi previsti dalla legge.

In relazione al PAI, per una migliore lettura delle carte allegate, di seguito sono riportate le definizioni di aree a differente pericolosità e rischio da frana in cui sono descritti i criteri di attribuzione alle singole classi, ovvero una sintesi di quanto previsto dalla *"Relazione Tecnica per il Sub bacino n° 3 - Studio di dettaglio e approfondimento del quadro conoscitivo della pericolosità e del rischio da frana nel Sub bacino n° 3 Coghinas - Mannu - Temo. Progetto di variante generale e di revisione del Piano per l'Assetto Idrogeologico della Regione Autonoma della Sardegna"* redatto nel Dicembre 2014, con eventuali integrazioni e precisazioni proposte nel succitato studio.

In particolare, le classi relative alla pericolosità da frana sono:

- ⇒ *Hg0 - Aree non soggette a fenomeni franosi con pericolosità assente - Classe non prevista nelle Linee Guida del PAI. Aree studiate non soggette a potenziali fenomeni franosi;*
- ⇒ *Hg1 - Aree con pericolosità moderata aventi classi di instabilità potenziale limitata o assente - classe 2 e classe 1.*
- ⇒ *Hg2 - zone in cui sono presenti solo frane stabilizzate non più riattivabili nelle condizioni climatiche attuali a meno di interventi antropici (assetti di equilibrio raggiunti naturalmente o mediante interventi di consolidamento), zone in cui esistono condizioni geologiche e morfologiche sfavorevoli alla stabilità dei versanti ma prive al momento di indicazioni morfologiche di movimenti gravitativi*

⇒ Hg3 - Zone in cui sono presenti frane quiescenti per la cui riattivazione ci si aspettano presumibilmente tempi pluriennali o pluridecennali; zone di possibile espansione areale delle frane attualmente quiescenti; zone in cui sono presenti indizi geomorfologici di instabilità dei versanti e in cui si possono verificare frane di neoformazione presumibilmente in un intervallo di tempo pluriennale o pluridecennali.

Mentre, le classi relative al rischio da frana sono:

- ❖ Rg0 - Aree studiate non soggette a rischio da frana;
- ❖ Rg1 - Danni sociali, economici e al patrimonio ambientale marginali;
- ❖ Rg2 - Sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- ❖ Rg3 - Sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale.

Quanto detto prima sulla stabilità delle aree scelte per la realizzazione degli aerogeneratori è confermato dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) che esclude le aree interessate dagli stessi da qualunque fenomenologia di dissesto.

Sono presenti delle interferenze con il tracciato del cavidotto MT; a tal riguardo si specifica che il cavidotto, nei tratti interessati dalle aree PAI, corre lungo la strada esistente che non manifesta alcun segno di dissesto

perché la realizzazione della strada con i suoi interventi ha reso del tutto stabile la sede stradale e, quindi, la realizzazione di questi brevi tratti di cavidotto non necessita la previsione di alcuna opera di consolidamento, né interferisce con il regolare e naturale deflusso idrico superficiale; in fase di progettazione esecutiva, per migliorare le condizioni della sede stradale, qualora la Provincia, titolare dell'infrastruttura, lo riterrà utile si potranno concordare, come opera di compensazione, alcuni puntuali interventi di ingegneria naturalistica.

Sono presenti alcuni elementi geomorfologici evidenziati nel PAI in aree vicine, che non potranno interferire con la stabilità delle opere.

Ci riferiamo in particolare a:

- limitate porzioni delle aree limitrofe ma esterne agli aerogeneratori WTG4 e WTG7 che sono interessate da rischio da frana Rg1 (Moderato) con una pericolosità da frana Hg2 (media) e Hg3 (elevata);

Anche se dai rilievi eseguiti durante i numerosi sopralluoghi effettuati non sono stati individuati all'interno di dette aree segni di fenomeni geodinamici di alcun tipo che possano far pensare alla presenza di dissesti, né alla possibilità di riattivazione di fenomeni morfogenetici quiescenti, né ad elementi di instabilità, il progetto prevederà la realizzazione di mirati interventi di ingegneria naturalistica nell'ambito areale di questi aerogeneratori al fine di migliorare comunque le condizioni di stabilità dei versanti circostanti.

Da quanto detto sopra si evince che non ci sono elementi geomorfologici ostativi alla realizzazione dell'impianto.

3. INDAGINI ESEGUITE

Come accennato nelle premesse, per la caratterizzazione della serie stratigrafica locale, per l'individuazione delle profondità del livello piezometrico e per la definizione delle problematiche sismiche delle aree in studio, in questa prima fase di lavoro, si è fatto riferimento alle indagini geognostiche e sismiche effettuate nell'ambito del "Progetto per la realizzazione di un parco eolico denominato ALAS" sito nel territorio comunale di Ittiri; nel dettaglio, sono stati realizzati/installati:

- ⇒ n. 1 sondaggio meccanico a carotaggio continuo denominato "S3" di profondità pari a 30 mt. in corrispondenza dell'aerogeneratore WTG03;
- ⇒ n. 1 sondaggio meccanico a carotaggio continuo denominato "S6" di profondità pari a 30 mt. in corrispondenza dell'aerogeneratore WTG06;
- ⇒ n. 1 piezometro a tubo aperto in corrispondenza dell'aerogeneratore WTG03;
- ⇒ n. 1 piezometro a tubo aperto in corrispondenza dell'aerogeneratore WTG06;
- ⇒ n. 3 prove S.P.T. in foro;
- ⇒ n. 11 sondaggi di sismica passiva (tomografia) per definire le velocità delle onde sismiche Vs nei primi 30 m di profondità dal p.c. in corrispondenza degli aerogeneratori WTG01, WTG02, WTG03, WTG04, WTG05, WTG06, WTG07, WTG08, WTG09, WTG10 e WTG11.

3.1. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le campagne geognostiche indicate nel capitolo precedente legate alla realizzazione del parco Alas, di cui questo progetto è un ampliamento, si sono sviluppate nel modo seguente:

- ❖ n. 2 sondaggi meccanici a carotaggio continuo della profondità pari a mt. 30;
- ❖ n. 2 piezometri a tubo aperto;
- ❖ prelievo di 3 campioni indisturbati;
- ❖ prelievo di n. 4 campioni rimaneggiati;
- ❖ n. 3 campioni di roccia;
- ❖ n. 3 prove dinamiche discontinue (SPT) in foro.

Le carote estratte durante le perforazioni sono state alloggiare in apposite cassette catalogatrici e conservate presso la sottostazione di Partinico di proprietà del Committente.

Vengono di seguito riportati in dettaglio i dati emersi nel corso dei lavori e le caratteristiche dei mezzi impiegati.

Le campagne d'indagini geognostiche, sono finalizzate a:

- ricostruire la stratigrafia di dettaglio;
- definire l'assetto geologico profondo della zona di progetto;
- accertare l'eventuale presenza di falde freatiche nei terreni interessati;
- caratterizzare da un punto di vista geologico-tecnico il substrato interessato delle opere di progetto.

Le perforazioni sono state eseguite mediante macchine perforatrici munite di centralina integrata ed operanti a rotazione ed avanzamento oleodinamico, aventi le seguenti caratteristiche:

Perforatrice Idraulica EGT Mod. MD 710.3:

- 1) Coppia testa di rotazione 1500 Kgm;*
- 2) Giri testa di rotazione 0÷360 min.;*
- 3) Tiro – Spinta 6.000 Kg.*

Le perforazioni sono state eseguite adottando la tecnica della conservazione del nucleo per tutto lo spessore indagato, con l'ausilio di tubi carotieri semplici, doppi e con corone diamantate aventi diametro esterno pari 101,6 mm e diametro interno pari a 88,8 mm con lunghezza di 2,00 e 3,00 metri; tutte le manovre sono state eseguite con l'ausilio di aste di perforazione di diametro 76 mm, lunghezza 1,50 metri.

La stabilizzazione delle pareti del foro è stata ottenuta mediante l'uso di tubazione di rivestimento di acciaio di spessore standard.

Tutti i dati relativi a ciascuno dei sondaggi geognostici eseguiti sono riportati in dettaglio, in moduli stratigrafici, contenenti i seguenti dati:

- ❖ profondità;
- ❖ scala di rappresentazione;
- ❖ spessore degli strati;
- ❖ simbolo grafico;
- ❖ descrizione stratigrafica;
- ❖ profondità di prelievo dei campioni;
- ❖ profondità delle prove SPT;
- ❖ profondità del livello piezometrico;
- ❖ rappresentazione schematica del piezometro.

3.2. INDAGINI SPT

Nel corso dei sondaggi geognostici eseguiti ed utilizzati, sono state esperite, per la caratterizzazione geotecnica numerose prove dinamiche discontinue S.P.T. in foro, alle profondità indicate nei moduli stratigrafici.

Normativa di riferimento

Le prove sono state eseguite in avanzamento, facendo riferimento alla normativa ASTM n° D. 1586/68 (Standard Penetration and Split-Barrel Sampling of Soil).

Attrezzatura utilizzata

Le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata, in conformità alla normativa sopra richiamata, sono le seguenti:

- campionatore tipo Raymond, apribile longitudinalmente, diametro Φ est 50.0 mm e Φ int 35.0 mm, lunghezza utile 630 mm, munito di valvola a sfera alla sommità e con utensile di avanzamento costituito da scarpa o da punta conica, in funzione della composizione granulometrica dei livelli attraversati;
- massa battente di peso pari 63.5 Kg, con l'altezza di caduta uguale a 762 mm, munita di dispositivo automatico di sganciamento;
- aste collegate al campionatore aventi peso pari a 6.5 Kg/ml;
- centratore di guida e di irrigidimento installato tra la testa di battuta in sommità e il piano di campagna;
- differenza fra il diametro esterno delle aste e il diametro della tubazione di rivestimento non superiore a 60 mm.

Metodologia di esecuzione

Le prove SPT consistono nell'infliggere nel terreno alla base del preforo il campionatore per tre tratti consecutivi, ciascuno pari a 15 cm, rilevando il numero di colpi necessario per la penetrazione di ciascun tratto.

Il valore N, utile ai fini della parametrizzazione geotecnica, è dato dalla somma dei colpi impiegati per il 2° e il 3° tratto.

La prova può essere sospesa quando il numero dei colpi, per un tratto di 15 cm, superi il valore 50 (Rifiuto): in tale caso si annota la penetrazione in centimetri ottenuta con 50 colpi.

Prima di eseguire ciascuna prova è stata controllata la quota del fondo, confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione precedentemente effettuata.

Per evitare che l'attrito tra il terreno e le aste inserite all'interno del foro potesse influenzare il numero reale dei colpi utili per l'infissione, falsando l'interpretazione dei risultati, si è proceduto ad inserire progressivamente i tubi di rivestimento.

Negli appositi spazi dei moduli stratigrafici presentate di seguito sono riportati per esteso i risultati di tutte le prove S.P.T. eseguite.

Interpretazione dei risultati ottenuti

La prova penetrometrica dinamica consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di un apposito utensile di dimensioni e caratteristiche standard, fatto avanzare nei terreni per mezzo di un dispositivo a percussione.

Durante l'infissione viene registrato il numero di colpi N necessario per ottenere un determinato avanzamento del campionatore.

La prova consiste nell'infiggere nel terreno l'utensile per tratti consecutivi, rilevando il numero di colpi (N) necessario per la penetrazione di ciascun tratto di 15 cm.

Il valore di NSPT è dato dalla somma dei colpi ottenuti per due tratti (N30).

La prova viene sospesa quando il numero di colpi N, per un tratto di 15 cm, supera 50. In tal caso si annota la penetrazione (in cm) ottenuta con i 50 colpi.

Per poter poi correlare opportunamente i valori forniti dalle prove ai parametri geotecnici dei terreni occorre tenere in debita considerazione fattori (quali granulometria del terreno, la presenza dell'acqua, le tensioni efficaci in sito) che influenzano i valori della resistenza della penetrazione.

Per quanto riguarda gli aspetti relativi alle tensioni efficaci in sito si è ritenuto fin dagli anni cinquanta (Terzaghi e Peck, 1948; Meyerhof, 1956) che le tensioni citostatiche fossero distrutte dalle azioni dinamiche create dalle prove e che pertanto i valori di NSPT non fossero influenzati dalla profondità della prova.

Successivamente evidenze sperimentali in sito (Lacroix e Horn, 1973) e in laboratorio (Gibbs e Holtz, 1957; Schultze, 1965; Bienagousky e Marcuson, 1976) hanno confermato che le tensioni efficaci hanno un'influenza fondamentale sul valore di NSPT.

Infatti, da prove penetrometriche SPT eseguite (Jamiolkowski e Pasqualini, 1974) dal piano di campagna sono stati ottenuti i valori di NSPT superiori a quelli ottenuti sullo stesso sito dopo aver eseguito uno scavo di circa 8 m; i valori inferiori di quest'ultimo sono dovuti all'effetto della diminuzione delle tensioni efficaci.

Peck e Bazaraa sulla base di correlazione dei risultati di un numero notevole di prove SPT e di prove di carico su piastra hanno suggerito di correggere i valori sperimentali NSPT mediante le seguenti espressioni:

$$N'SPT = 4 N SPT/1 + 4,097 \delta \text{ per } \delta \geq 0,732 \text{ kg/cmq}$$

$$N'SPT = 4 N SPT/3,25 + 1,024 \delta \text{ per } \delta < 0,732 \text{ Kg/cmq}$$

in seguito Peck (1974) ha apportato delle modifiche, suggerendo di tenere conto delle influenze delle tensioni efficaci attraverso il coefficiente di correzione C_n ; per cui si ha:

$$N' SPT = C_n N SPT$$

$$\text{con } C_n = 0,77 \log 20/\delta$$

δ = la tensione efficace agente alla profondità alla quale è eseguita la prova.

Nella figura sono riportate le correlazioni suggerite nel “Design Manual for soil Mechanics, Foundations and Earth Structures”, cui sono sovrapposti i risultati di correlazioni fatte da Houston (1960), Fletcher (1965), Shioi e Fukuni (1982).

I parametri di deformabilità possono ricavarsi da correlazioni suggerite da Mitchell e Gardner (1975) riportate nei grafici allegati ove sono confrontati i valori del modulo confinato (M_o) con i valori $N' SPT$.

Deuver (1982) osserva che il modulo di Young E e il valore di $N SPT$ sono legati da una relazione espressa dall'equazione:

$$E = S1 + N' SPT + S2$$

ove i valori $S1$ ed $S2$, costanti, sono riportati nella Tabella con riferimento a diversi tipi di terreno.

Per quanto riguarda il problema dell'influenza della presenza della falda d'acqua sui valori di NSPT, questo è stato affrontato da diversi autori (Schultze e Menzenbach, 1961; Schultze e Melzer, 1965; Gibbs e Holtz,

1957; Terzaghi e Peck, 1948; Peck e Bazaraa, 1969) con molta disparità di risultati e di giustificazione teoriche.

Prove eseguite in laboratorio (Gibbs e Holtz, 1957; Schultze e Melzer, 1965) conducono al risultato che la presenza dell'acqua fa diminuire i valori di NSPT (a parità di densità relativa, tensioni di confinamento e granulometria) e tale diminuzione è più risentita nelle sabbie grossolane che nelle sabbie fini. Tuttavia gli stessi Gibbs e Holtz sembrano molto perplessi sulla credibilità di questi risultati.

Conclusioni analoghe, anche se in misura molto meno pronunciata, sono ottenute da Schultze e Menzenbach, 1961, dall'analisi di prove condotte in situ.

Terzaghi e Peck ritengono che gli unici tipi di sabbie che risentono della presenza della falda d'acqua siano quelle fine e/o limose molto compatte e per esse quando il valore di NSPT misurato risulta superiore a 15, consigliano la seguente espressione correttiva:

$$N' = 15 + 0,5 (NSPT - 15) \text{ con } NSPT \geq 15,$$

il che equivale a prendere, come rappresentativi del terreno di fondazione, valori minimi di quelli misurati.

L'indagine "in situ" più sistematica per lo studio degli effetti dell'immersione delle sabbie molto fini (si intendono per sabbie molto fini quelli aventi diametro effettivo compreso tra 0,1 e 0,05 mm) e/o limose sui valori di NSPT è quella di Bazaraa (1967) e Peck e Bazaraa (1969) che hanno studiato i risultati ottenuti in fori di sondaggi situati in 11 differenti zone, mediando i valori di NSPT per una profondità di circa 1 metro sopra e sotto il livello della falda.

Risulta che, mediamente, il valore di NSPT sotto la falda è circa 1,7 volte superiore a quello ottenuto sopra di essa e che l'aumento è più

pronunciato nel caso di sabbie sciolte che nel caso di sabbie dense. Tali autori suggeriscono che la densità relativa di sabbie molto fini e/o limose immerse, in cui sia stato misurato il valore di NSPT, possa essere uguale a quella di una sabbia asciutta la cui resistenza alla penetrazione è data da:

$$N' = 0,6 \text{ NSPT per NSPT qualunque.}$$

In generale, la maggior parte degli autori sono concordi nel trascurare l'effetto sui valori di NSPT della presenza della falda d'acqua nelle sabbie fini, medie e grossolane e di tenerne invece conto tramite la (1) nelle sabbie molto fini e/o limose compatte.

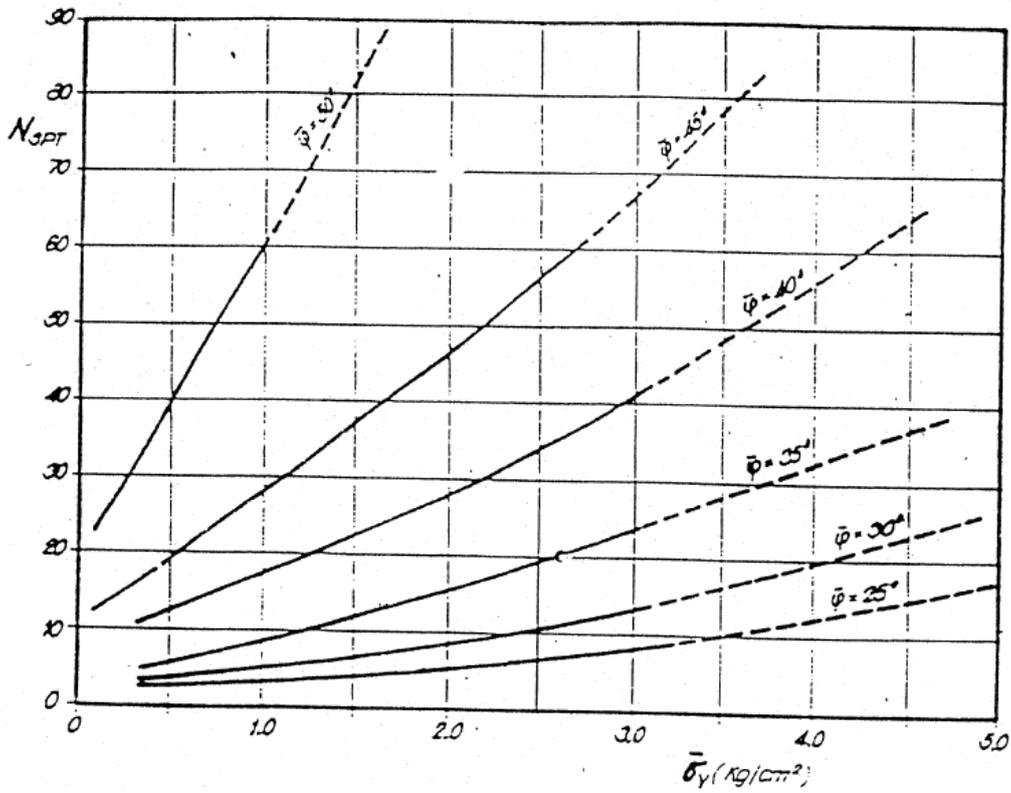
Per la valutazione della densità relativa "Dr" si può fare riferimento alle correlazioni empiriche di Terzaghi-Peck, riportate in grafico.

L'angolo d'attrito interno si può stimare tramite altre correlazioni empiriche come ad esempio quella di Peck-Hanson-Thorborn o di Meyerof riportate anche esse in grafico.

Una ulteriore correlazione tra i risultati delle prove penetrometriche dinamiche e le caratteristiche di resistenza meccanica dei terreni è stata proposta da De Mello (1973).

<i>Sondaggio</i>	<i>da mt. a mt.</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>
S6	20.00 - 20.45	12	21	33
//	23.50 - 23.95	20	14	18
//	28.00 - 28.45	16	16	24

Tabella Riepilogativa delle prove S.P.T.

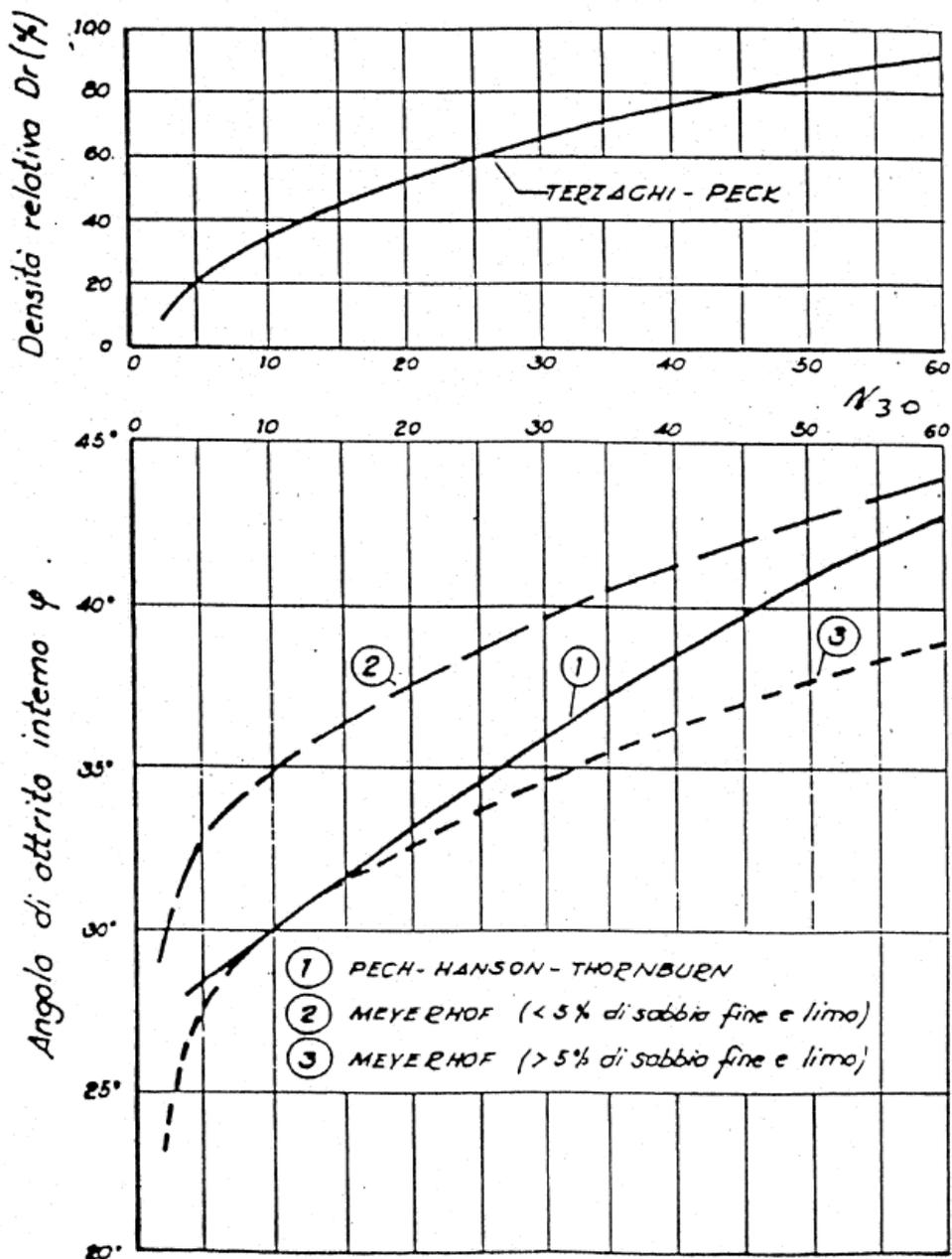


- CORRELAZIONE $\bar{\varphi} = f(N_{SPT}, \bar{\sigma}_Y)$
SECONDO DE MELLO (1971)

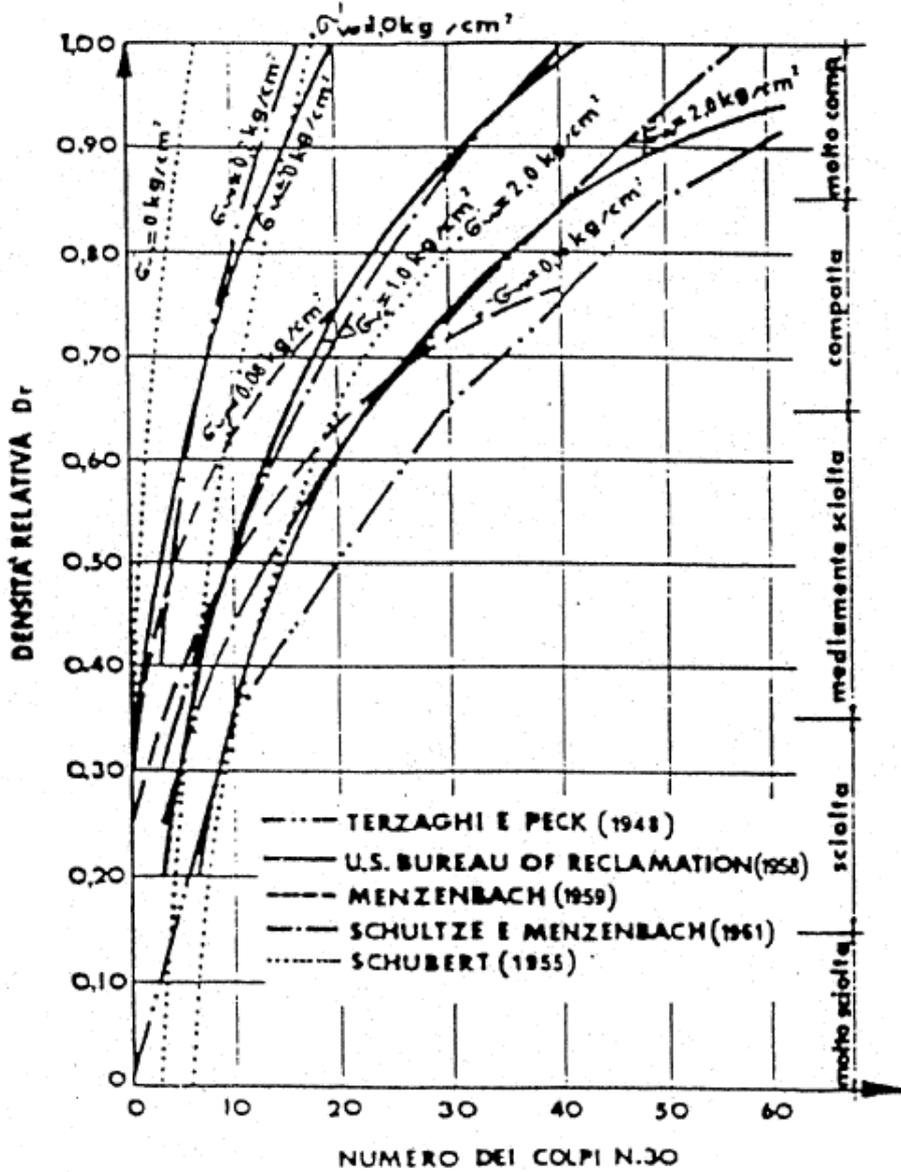
Correlazione secondo De Mello

STANDARD PENETRATION TEST

CORRELAZIONI FRA N, DENSITA' RELATIVA E ANGOLO D'ATTRITO (TERRENI SABBIOSI)



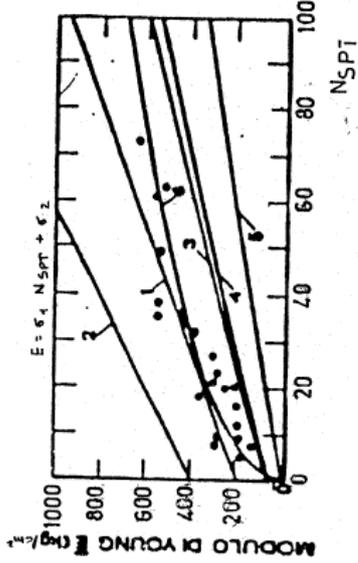
Correlazioni fra densità relativa e angolo d'attrito



G_s - Tensione naturale efficace

- Densità relativa in funzione del numero di colpi del S.P.T. (Schültze).

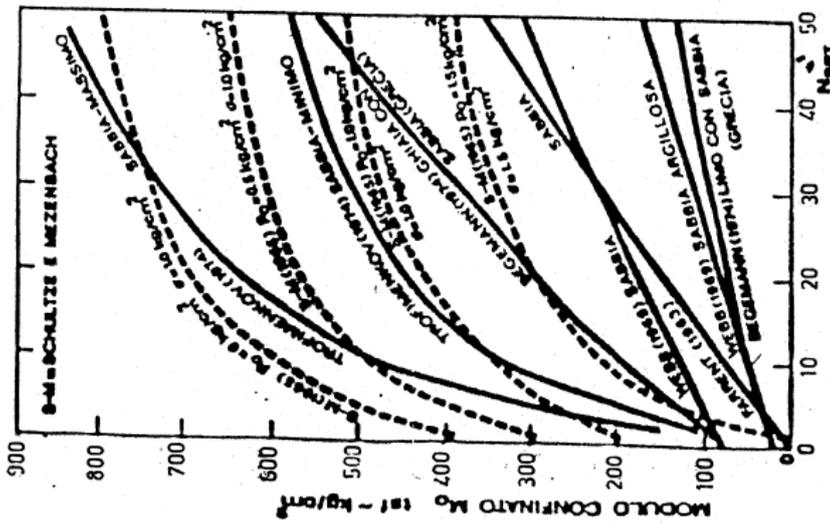
Densità relativa in funzione del numero di colpi di S.P.T.



Valori di S_1 S_2

CURVA	S_1 [MPa]	S_2 [MPa]	NOTE	RIFERIMENTO
1	0.756	18.75	SABBIA E GHIAIA BC	B'APPOLONIA ET AL., 1970
2	1.043	34.79	SABBIA SC	B'APPOLONIA ET AL., 1970
3	0.517	7.46	---	SCHULTZE & MEZENBACH, 1961
4	0.478	7.17	SABBIA SATURA	MEZB, 1970
5	0.316	1.58	SABBIA ANGILLOSA	MEZB, 1970

b) RELAZIONI $E - N_{5PT}$ (DENVER, 1962)



a) RELAZIONI $M_o - N_{30}$
(MITCHELL & GARDNER, 1975)

Correlazione fra N_{30} e il modulo confinato M_o ed il modulo di Young

-Correlazione fra N_{30} e il modulo confinato M_o e il modulo di young E

3.3. CALCOLO DELLA MISURA DELL'RQD

Sulle ignimbriti litoidi intercettate in corrispondenza del sondaggio S3 è stato definito il Rock Quality Designation (RQD) che è una classificazione geotecnica delle rocce sviluppata nel 1964 da D. U. Deere.

Tale classificazione è basata sulla percentuale di frammenti di lunghezza maggiore di 10 cm recuperati in ogni manovra di un carotaggio.

La classificazione è stata inizialmente introdotta e sviluppata per essere usata in carote del diametro interno di 54.7 mm (NX) ed è stata usata come indice di qualità delle rocce per lo scavo di tunnel, in quanto identifica molto bene le zone di bassa qualità.

Oggi la classificazione RQD viene usata come parametro in classificazioni maggiori (RMR Q-system).

L'RQD è definita dal quoziente:

$$RQD = \frac{A}{L_{tot}}$$

(A) = Somma delle lunghezze dei campioni maggiori di 10 cm

L tot = lunghezza totale della manovra di carotaggio

VALORE RQD Sondaggio S3			
<i>Profondità (m)</i>	<i>Lunghezza battuta (cm)</i>	<i>Somma maggiore 10 cm</i>	<i>RQD %</i>
0.00-0.40	40	19	47,5
0.40-1.40	100	68	68,0
1.40-2.50	110	82	74,5
2.50-3.70	120	89	74,2
3.70-4.70	100	51	51,0
4.70-5.45	75	45	60,0
5.45-6.30	85	55	64,7
6.30-7.35	105	32	30,5

7.35-8.48	113	104	92,0
8.48-9.57	109	86	78,9
9.57-9.85	28	0	0,0
9.85-11.0	115	95	82,6
11.00-12.00	100	98	98,0
12.00-13.05	105	103	98,1
13.05-14.10	105	100	95,2
14.10-15.20	110	109	99,1
15.20-16.00	80	23	28,8
16.00-17.10	110	0	0,0
17.10-18.30	120	19	15,8
18.30-19.30	100	0	0,0
19.30-20.30	100	0	0,0

Valore RQD Sondaggio S3

3.4. PROVE DI LABORATORIO

Sui campioni inviati al laboratorio sono state effettuate le analisi e le prove di laboratorio necessarie per definire sia i parametri fisici che quelli meccanici.

Nello specifico sono state svolte le seguenti prove:

- ❖ Descrizione macroscopica del campione;
- ❖ Determinazione del contenuto d'acqua naturale per essiccamento in stufa;
- ❖ Determinazione del Peso dell'Unità di Volume mediante fustella tarata di diametro pari a 38 mm;
- ❖ Determinazione del peso specifico dei grani;
- ❖ Determinazione dei limiti di consistenza (di liquidità, plasticità e ritiro) sul passante allo staccio 40 della serie ASTM ($\varnothing=0.42$ mm);
- ❖ Determinazione della composizione granulometrica mediante stacciatura per via umida del materiale trattenuto allo staccio n° 200 della serie ASTM ($\varnothing=0,075$ mm); per il passante è stata eseguita la determinazione tramite il metodo del densimetro;
- ❖ Prova di taglio diretto del tipo consolidata drenata (CD).
- ❖ Prova di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU).
- ❖ Prova di compressione ad espansione laterale libera (E.L.L.).

La determinazione del contenuto d'acqua (**W_n**) è stata realizzata secondo una media effettuata su tre prove, sottoponendo una quantità nota del campione ad essiccamento in stufa a 105°.

La normativa di riferimento è la ASTM D-2216 e CNR-UNI 10008.

Il Peso di Volume é stato calcolato mediante una fustella di acciaio a volume noto, secondo una media effettuata su tre prove. La normativa di riferimento é la BS 1377: 1990

Il peso specifico é stato calcolato sulla porzione di terra passante al setaccio ASTM N° 200 ($\varnothing=0.075$ mm), tramite la media su due valori ricavati per mezzo di un picnometro ad acqua da 100 cm^3 .

La normativa di riferimento é la ASTM D 854-06.

I limiti di consistenza (Atterberg) sono stati determinati in accordo alla normativa CNRUNI 10014 ed alla ASTM D 4318-84.

Il limite di liquidità é stato calcolato mediante la coppa di Casagrande sulla sola frazione di terra passante al setaccio ASTM N° 40 ($\varnothing=0.42$ mm); il metodo utilizzato é quello dell'interpolazione dei tre punti.

Il limite di plasticità é stato determinato tramite la manipolazione dello stesso materiale utilizzato per la determinazione del limite di liquidità, sino a quando, creando dei bastoncini aventi diametro di 3 mm, questi si screpolavano o rompevano.

Il limite di ritiro é stato determinato usando lo stesso materiale impiegato per la determinazione del limite di liquidità aggiungendo una quantità nota di acqua distillata ed usando del mercurio liquido (Hg) ($\rho_s=13.579\text{ g/cm}^3$) e contenitori tarati sia in peso che in volume.

L'analisi granulometrica é stata realizzata tramite vagliatura meccanica per la porzione di terra avente grana di dimensione superiore a 0.075 mm, invece per il materiale avente diametro inferiore viene riservata l'analisi per sedimentazione con il metodo del densimetro.

La serie di setacci utilizzata é ASTM D 422 ed UNI 8520.

Per il materiale fine è stata eseguita una procedura per via umida secondo la normativa ASTM D 2217 - Metodo A, seguendo le indicazioni di Bowles (1978).

La prova di taglio è stata realizzata con l'apparecchio di Casagrande su tre provini quadrati aventi altezza di 2 cm e diametro di 6 cm; la fase di consolidazione si è protratta per 24 h, sino al raggiungimento della consolidazione secondaria.

La velocità di rottura è stata scelta tenendo conto del tempo di consolidazione del materiale di prova; sono stati analizzati i tempi relativi al 50% ed al 100% della consolidazione, valori che hanno permesso di risalire alla velocità necessaria per raggiungere la rottura utilizzando le formule proposte da Bowles (1970), Ladd (1971) e Gibson ed Henkel (1954).

I carichi applicati durante la fase di consolidazione sono stati compresi tra circa 98 e circa 389 KN/m² (= tra circa 1 e 4 Kg/cm²).

La normativa di riferimento è la ASTM D 3080-72.

La prova di compressione triassiale UU è stata eseguita su provini cilindrici di diametro 3.8 cm ed altezza 7.6 cm. La velocità di deformazione è stata posta pari a 0.5 mm/min.

Durante la fase di compressione i provini sono stati sottoposti a pressioni di cella comprese 100 e 400 KPa.

I risultati delle prove sono stati diagrammati in grafici dove sono riportati i cerchi di Mohr in termini di pressioni totali.

La normativa di riferimento è la ASTM D-4767 – ASTM D 2850-87

La prova di compressione ad espansione laterale libera (E.L.L.) è stata eseguita su provini cilindrici aventi altezza pari a circa il doppio del diametro. La velocità di rottura è stata posta pari a 2 mm/min oppure a 0,5 mm/min in funzione delle dimensioni del provino.

La normativa di riferimento é la ASTM D-2166.

Nel capitolo relativo alle caratteristiche litotecniche dei terreni, le sono state riportate le seguenti tabelle riassuntive:

- ⇒ tabella riepilogativa delle caratteristiche fisiche dei campioni;
- ⇒ tabella riepilogativa delle caratteristiche meccaniche dei campioni.

3.5. 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 (V_s) dei terreni presenti, in corrispondenza delle opere progettate.

In particolare, sono state eseguite n. 7 misure di microtremore ambientale, con un tromografo digitale progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico in corrispondenza di ciascun aerogeneratore.

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.

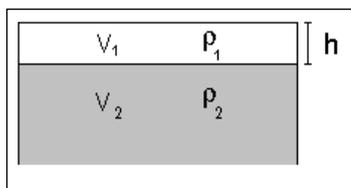
I primi studi su questa tecnica sono da attribuire a Kanai (1957) e da allora diversi metodi sono stati proposti per estrarre utili informazioni sul sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in sito.

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

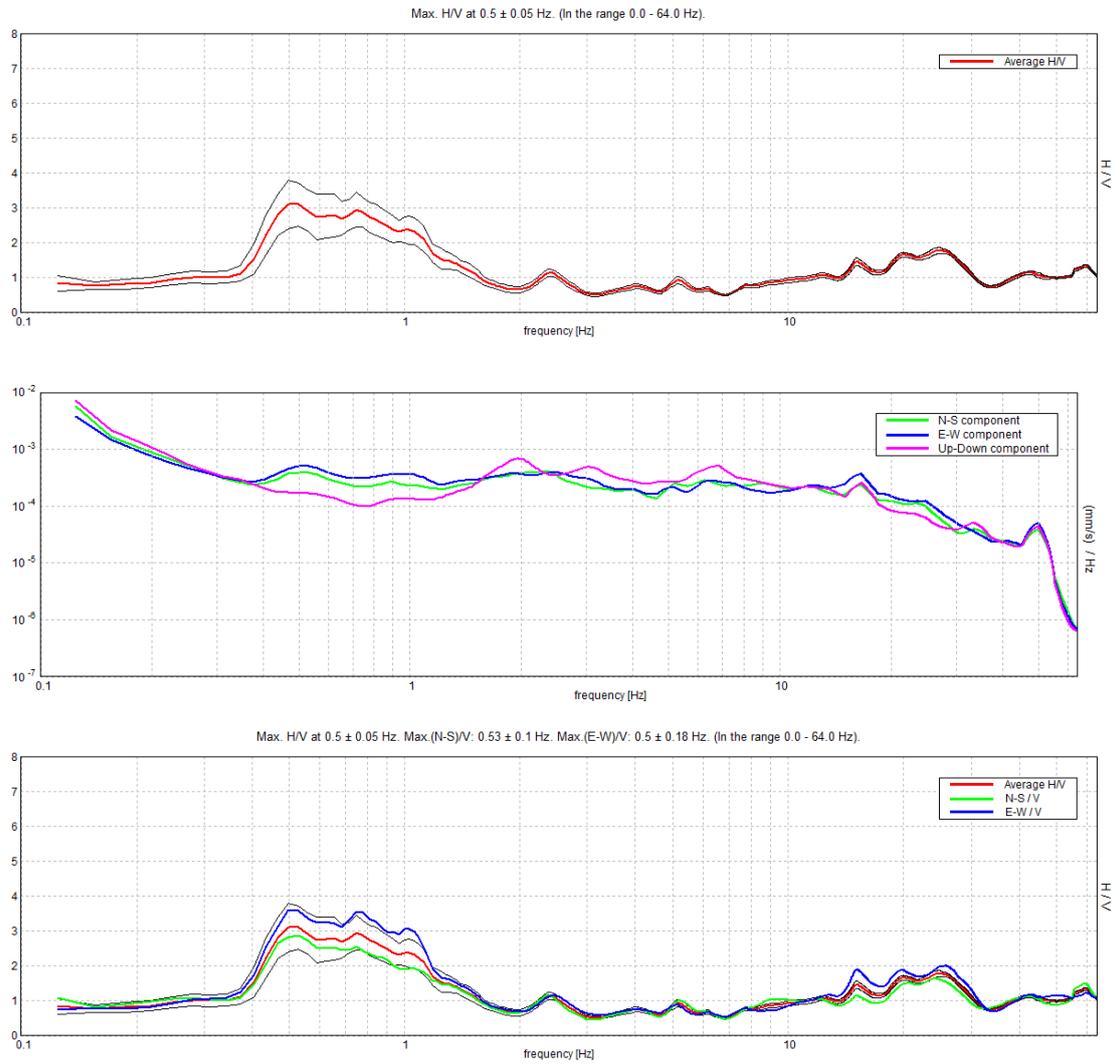
$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

da cui si ricava

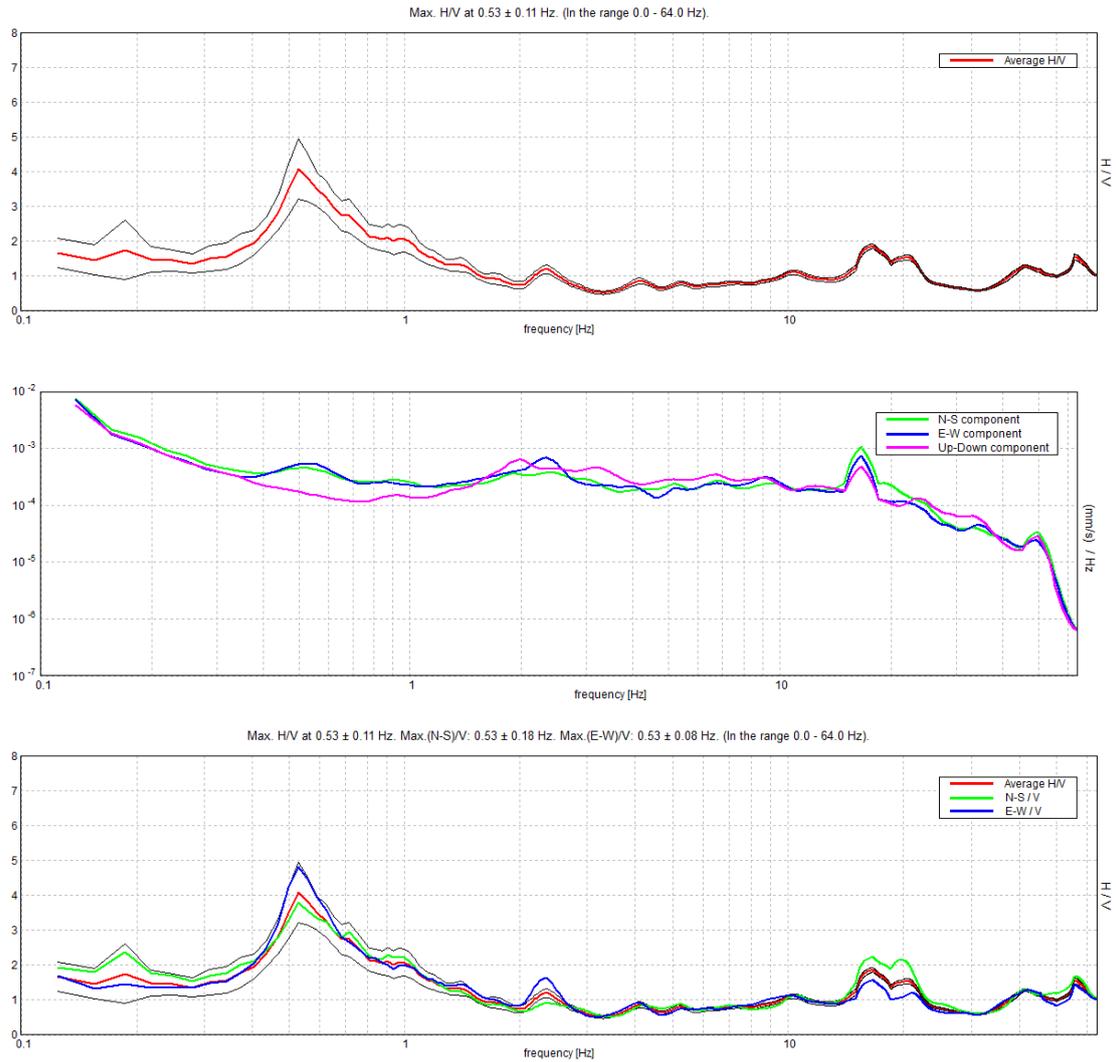
$$V = 4 f_r h$$

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

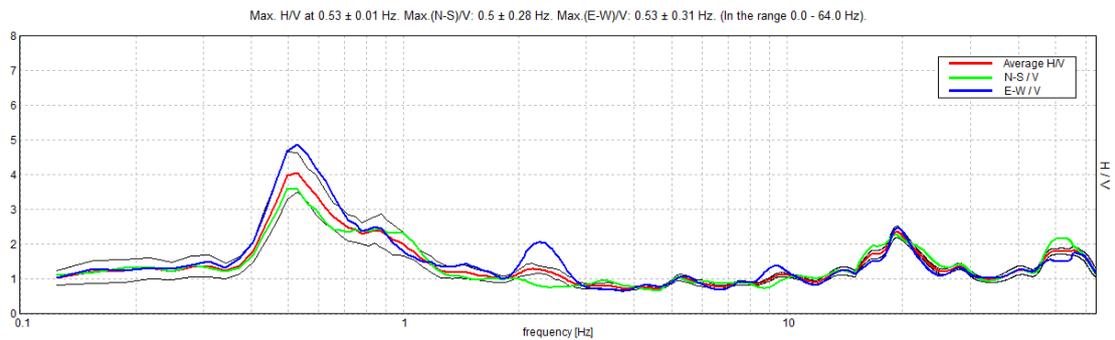
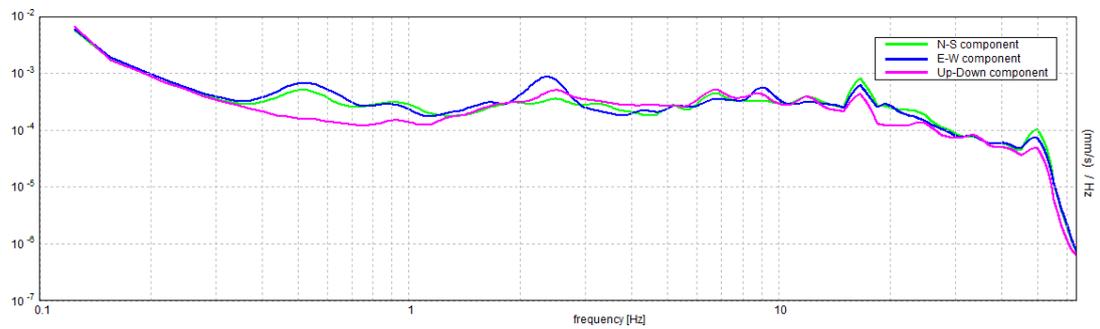
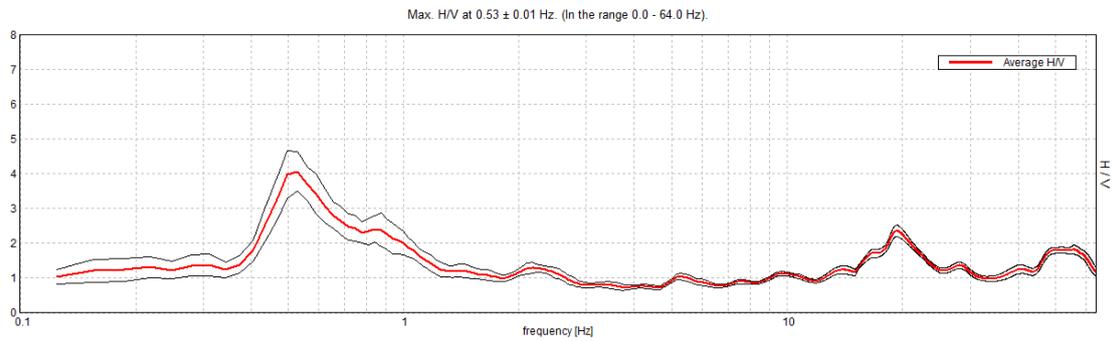
Sondaggio tromografico T1



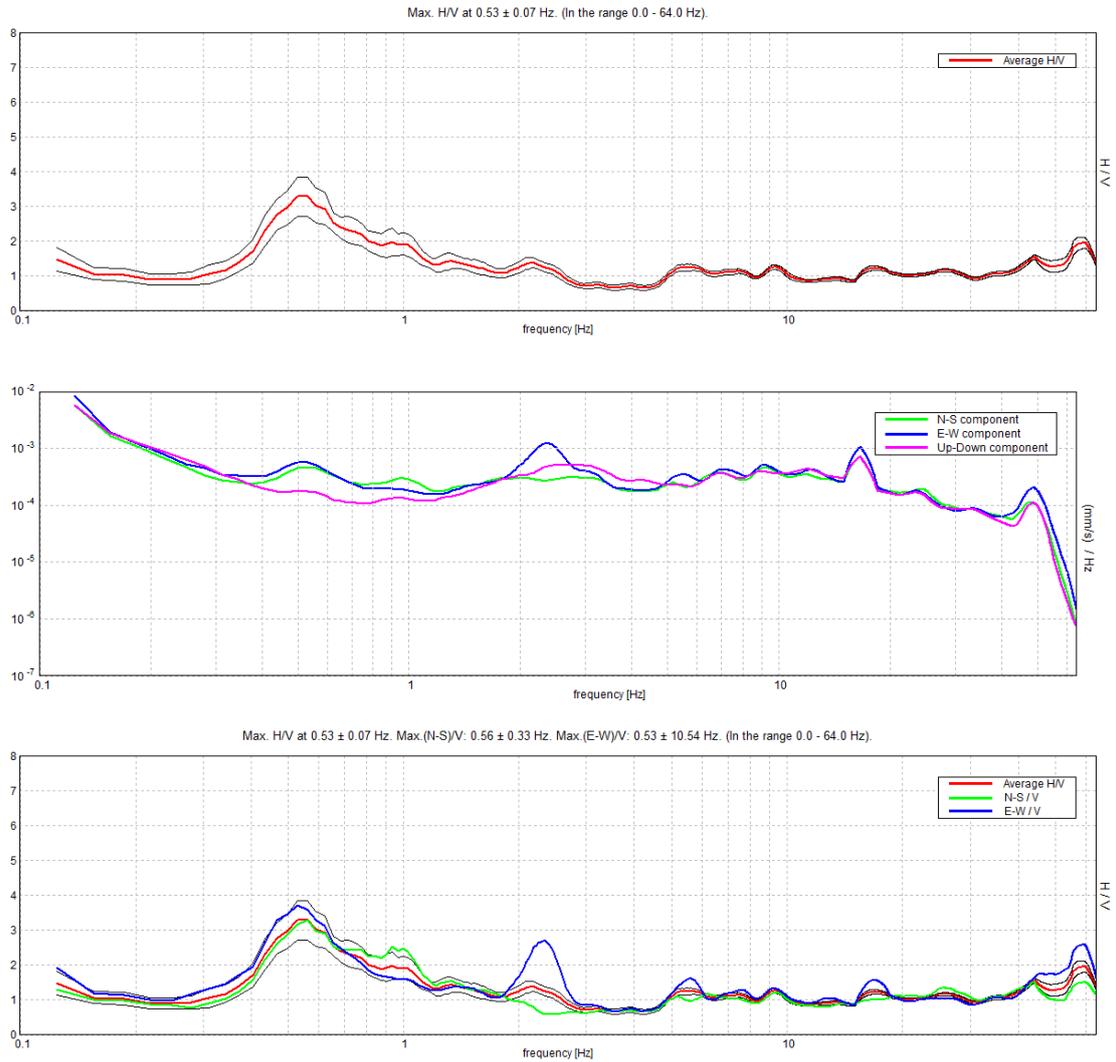
Sondaggio tromografico T2



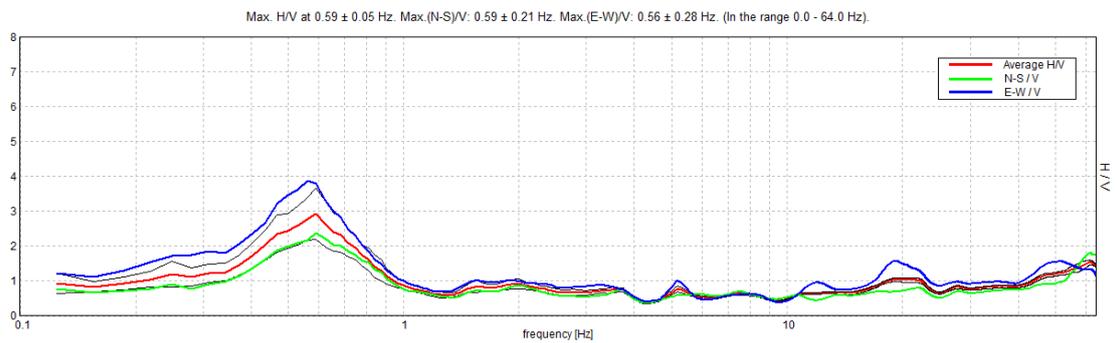
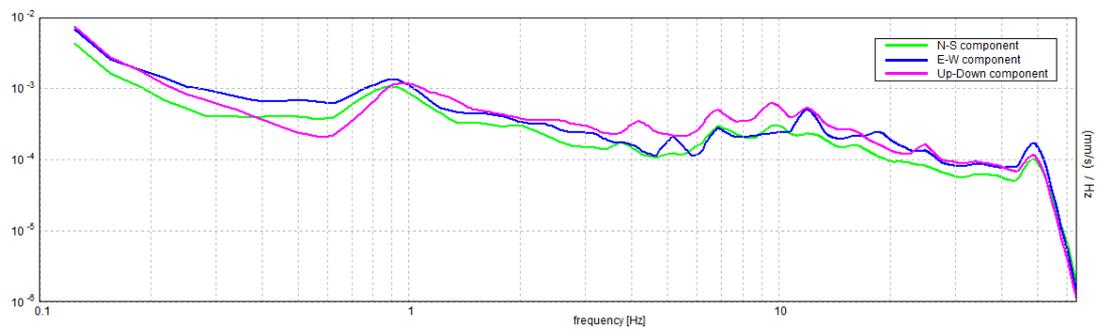
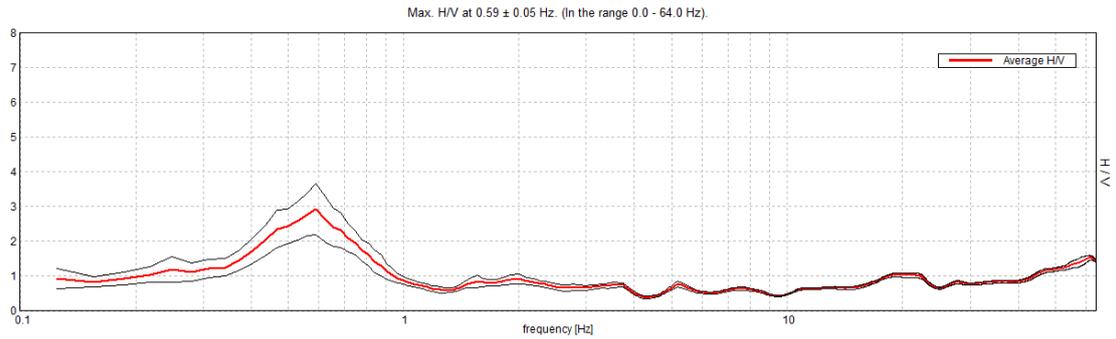
Sondaggio tromografico T3



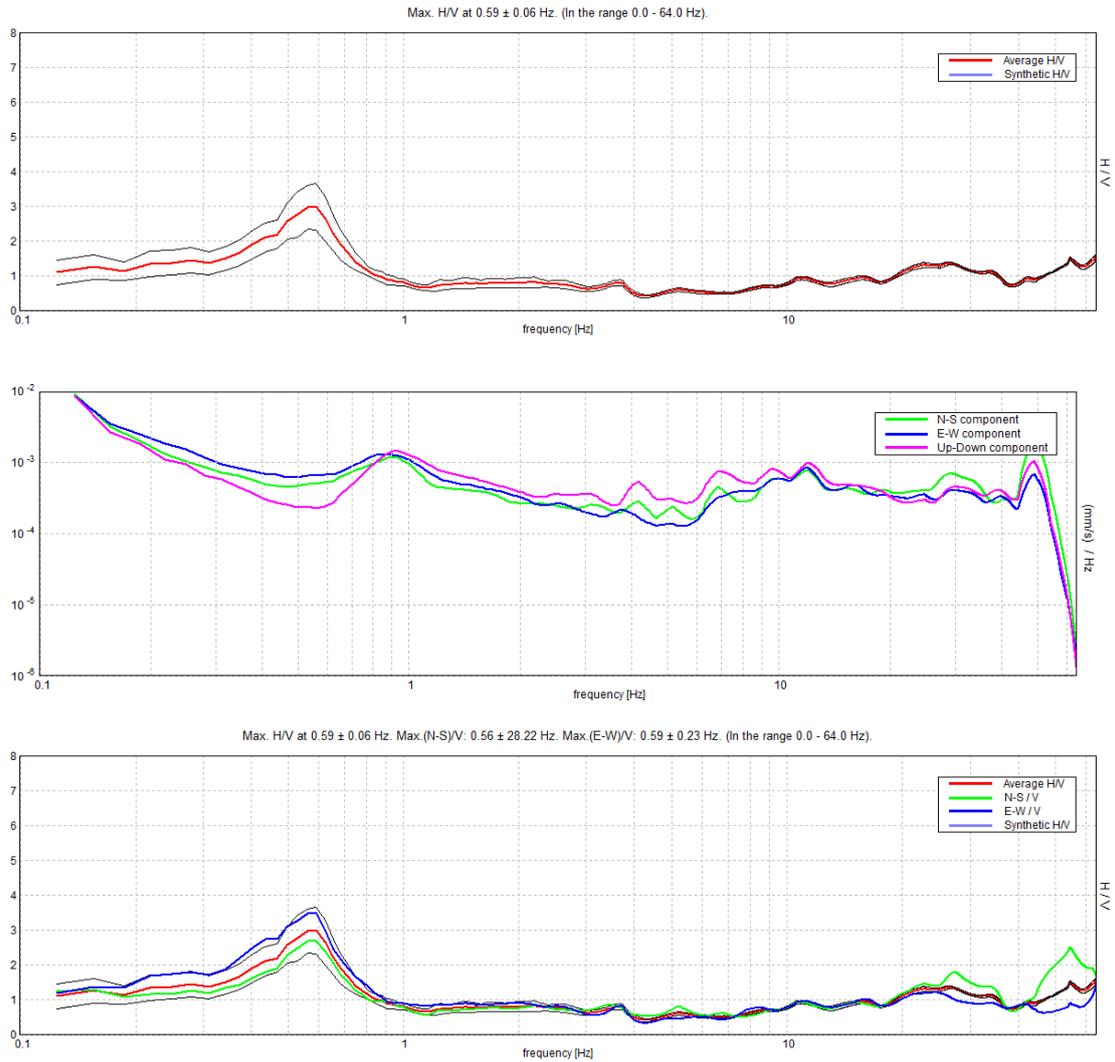
Sondaggio tromografico T4



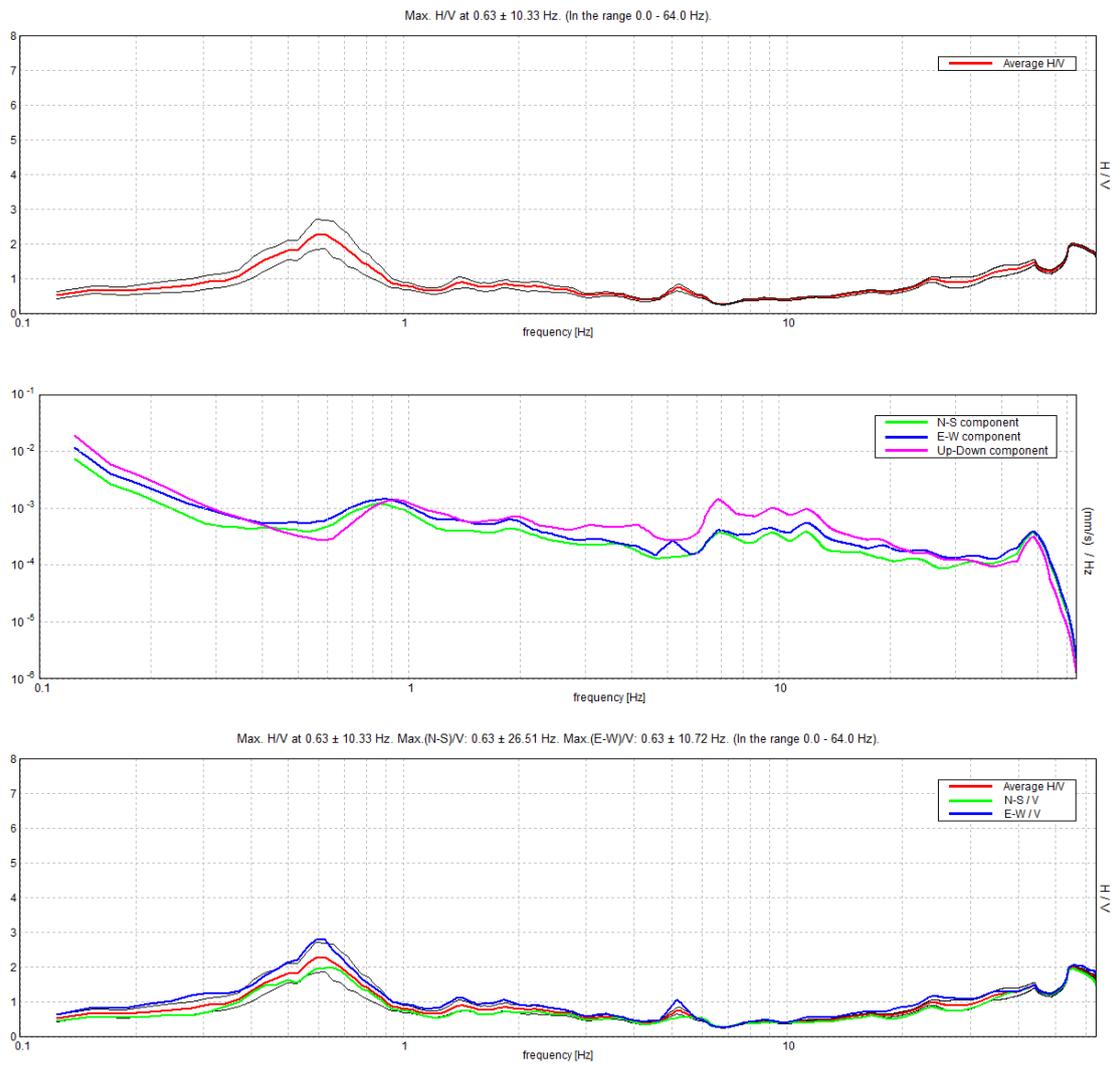
Sondaggio tromografico T5



Sondaggio tromografico T6



Sondaggio tromografico T7



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

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

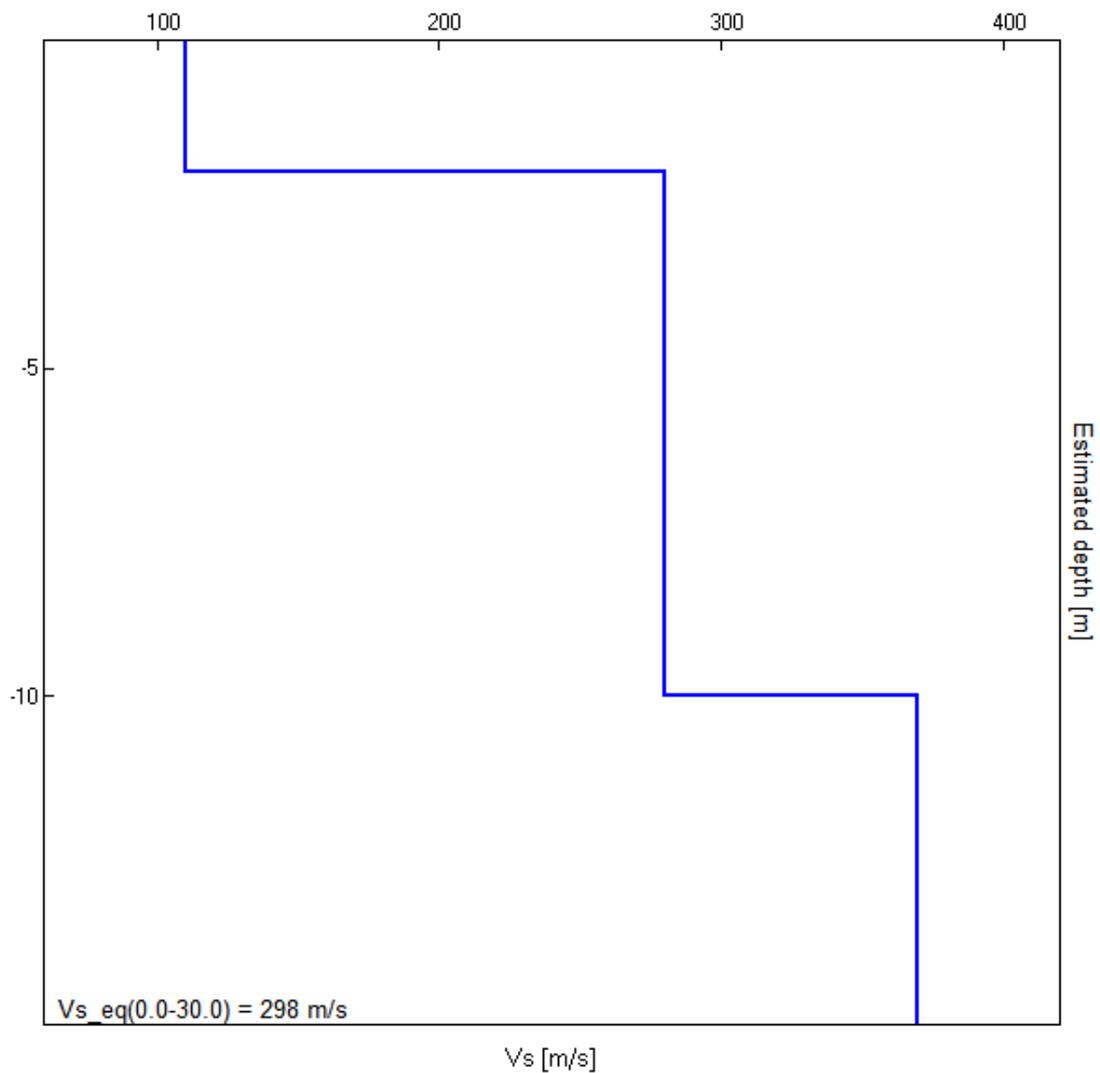
da cui si ricava

$$V = 4 f_r h$$

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

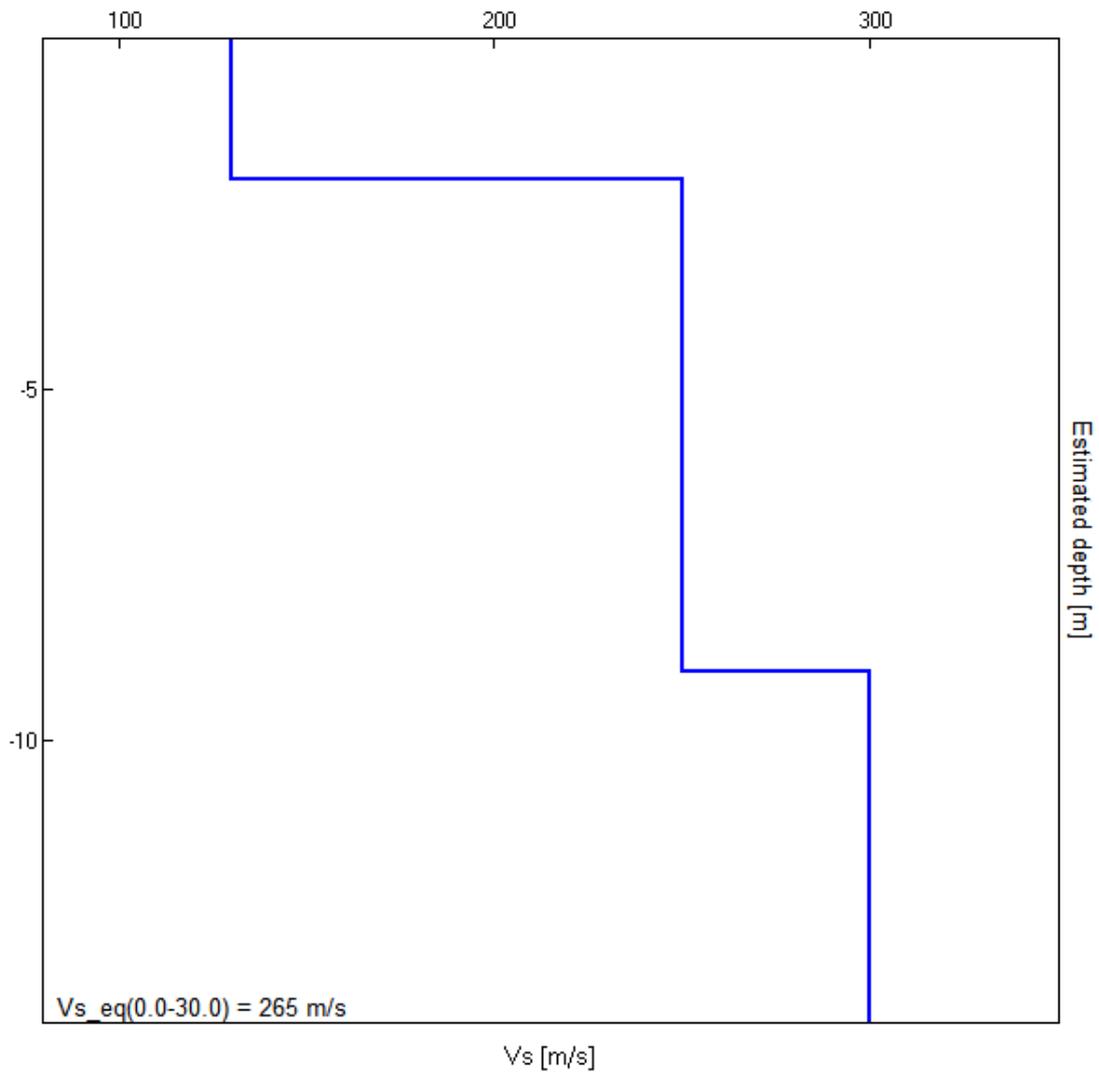
Interpretazione sondaggio tromografico T1

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-2.00	110	C	C (Vs,eq = 298 m/s)
2.00-10.00	280	C	
10.00-30.00	370	B	



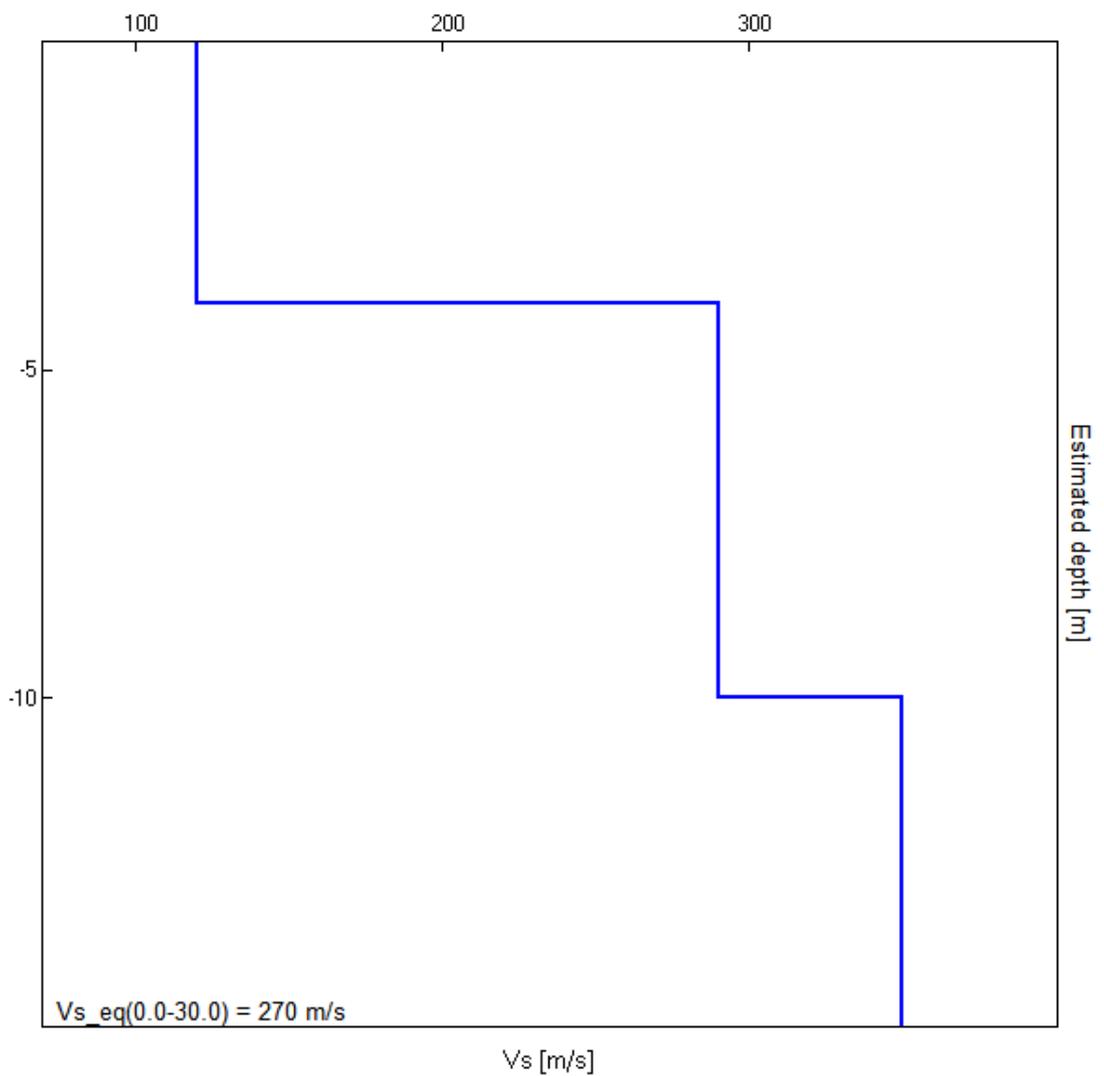
Interpretazione sondaggio tomografico T2

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-2.00	130	C	C (Vs,eq = 265 m/s)
2.00-9.00	250	C	
9.00-30.00	300	C	



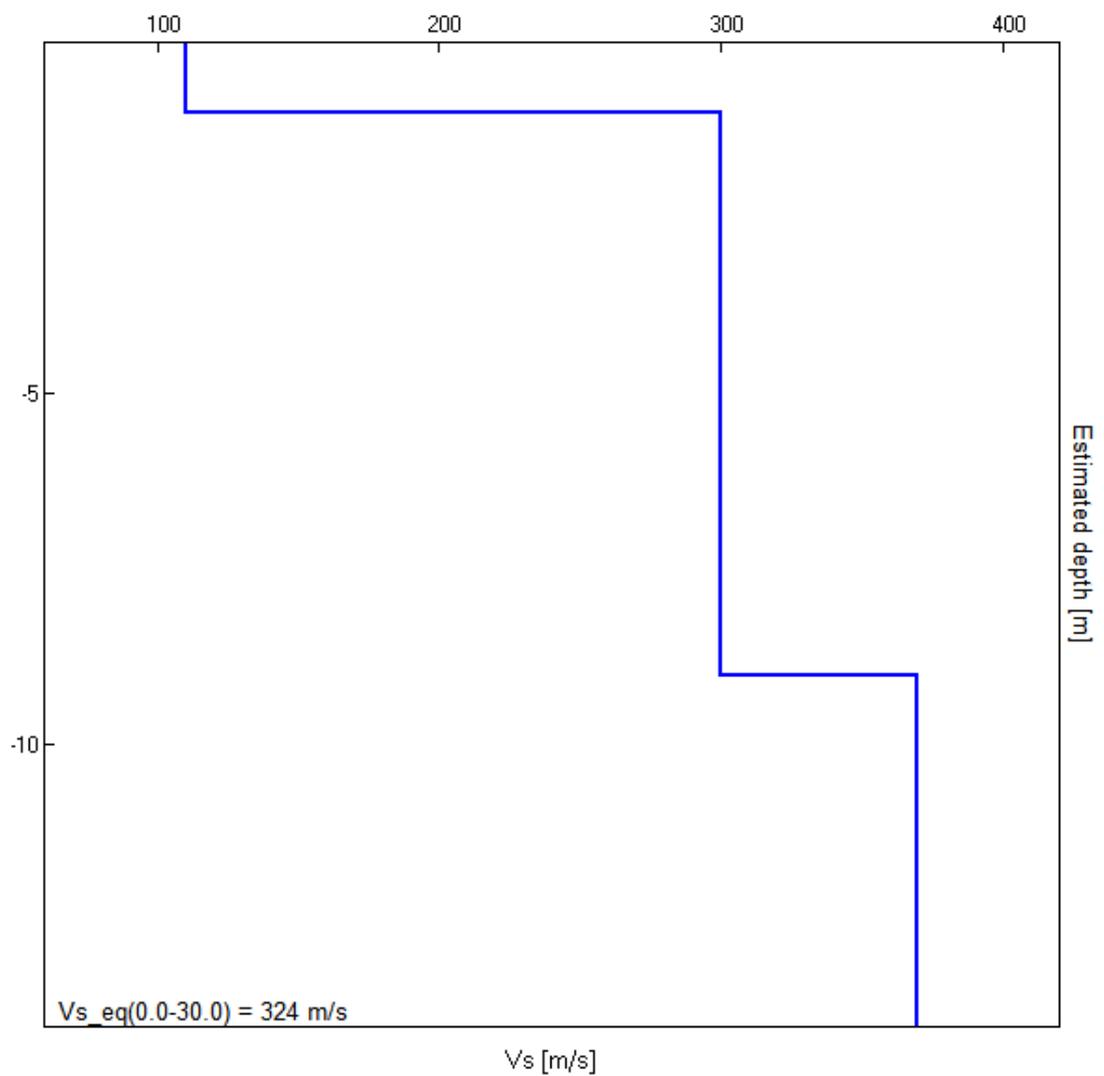
Interpretazione sondaggio tromografico T3

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-4.00	120	C	C (Vs,eq = 270 m/s)
4.00-10.00	290	C	
10.00-30.00	350	C	



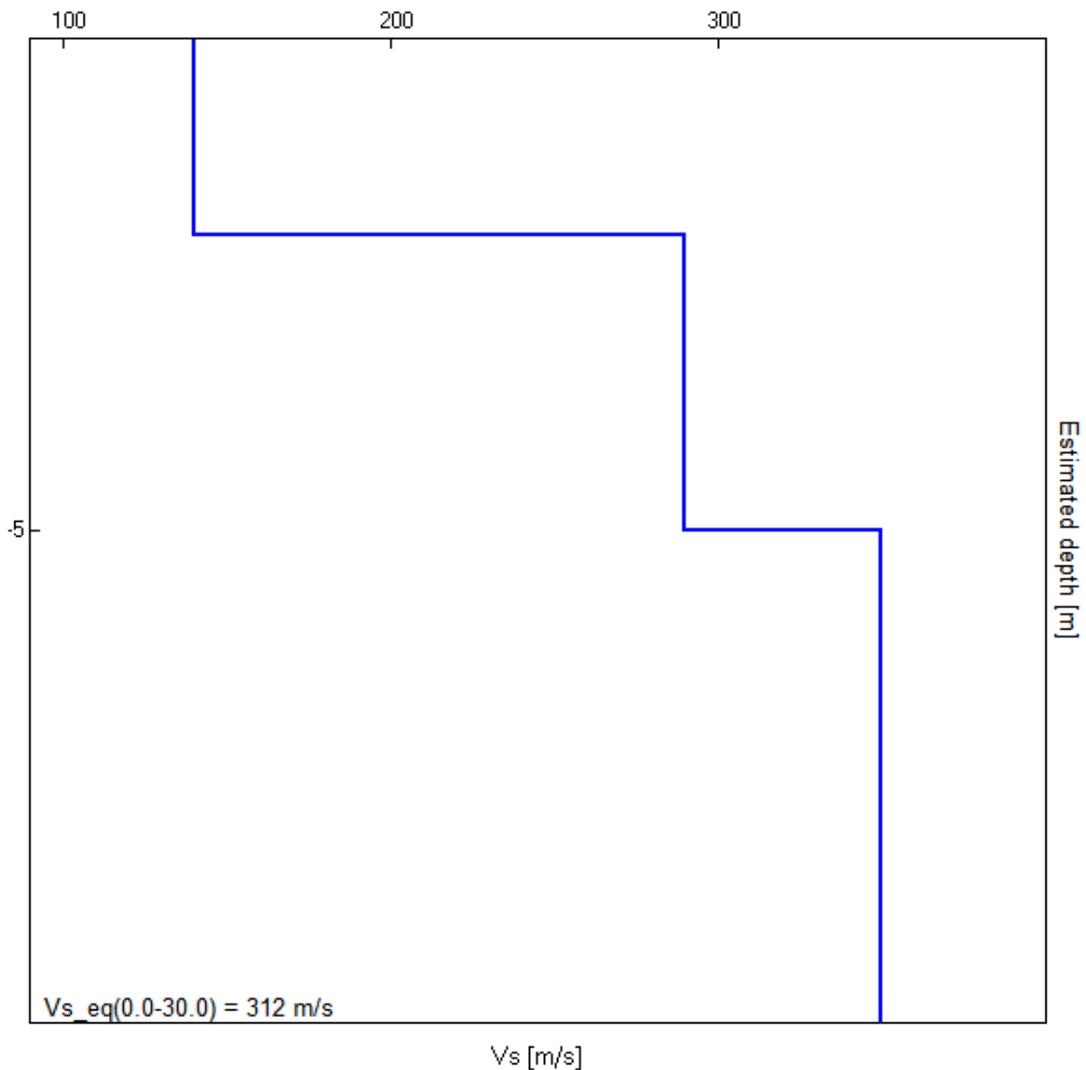
Interpretazione sondaggio tromografico T4

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-1.00	110	C	C (Vs,eq = 324 m/s)
1.00-9.00	300	C	
9.00-30.00	370	B	



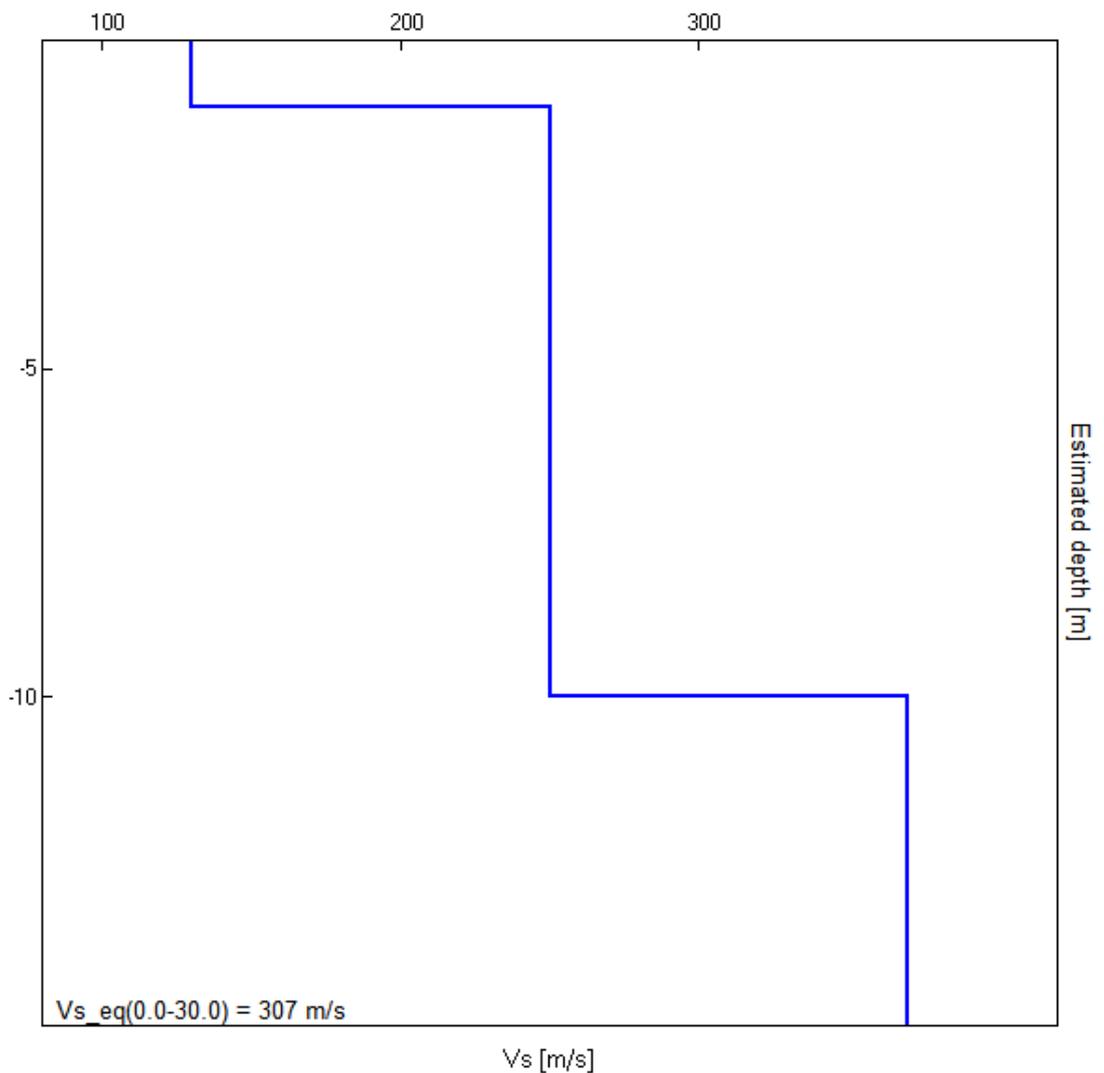
Interpretazione sondaggio tomografico T5

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-2.00	140	C	C (Vs,eq = 312 m/s)
2.00-5.00	290	C	
5.00-30.00	350	C	



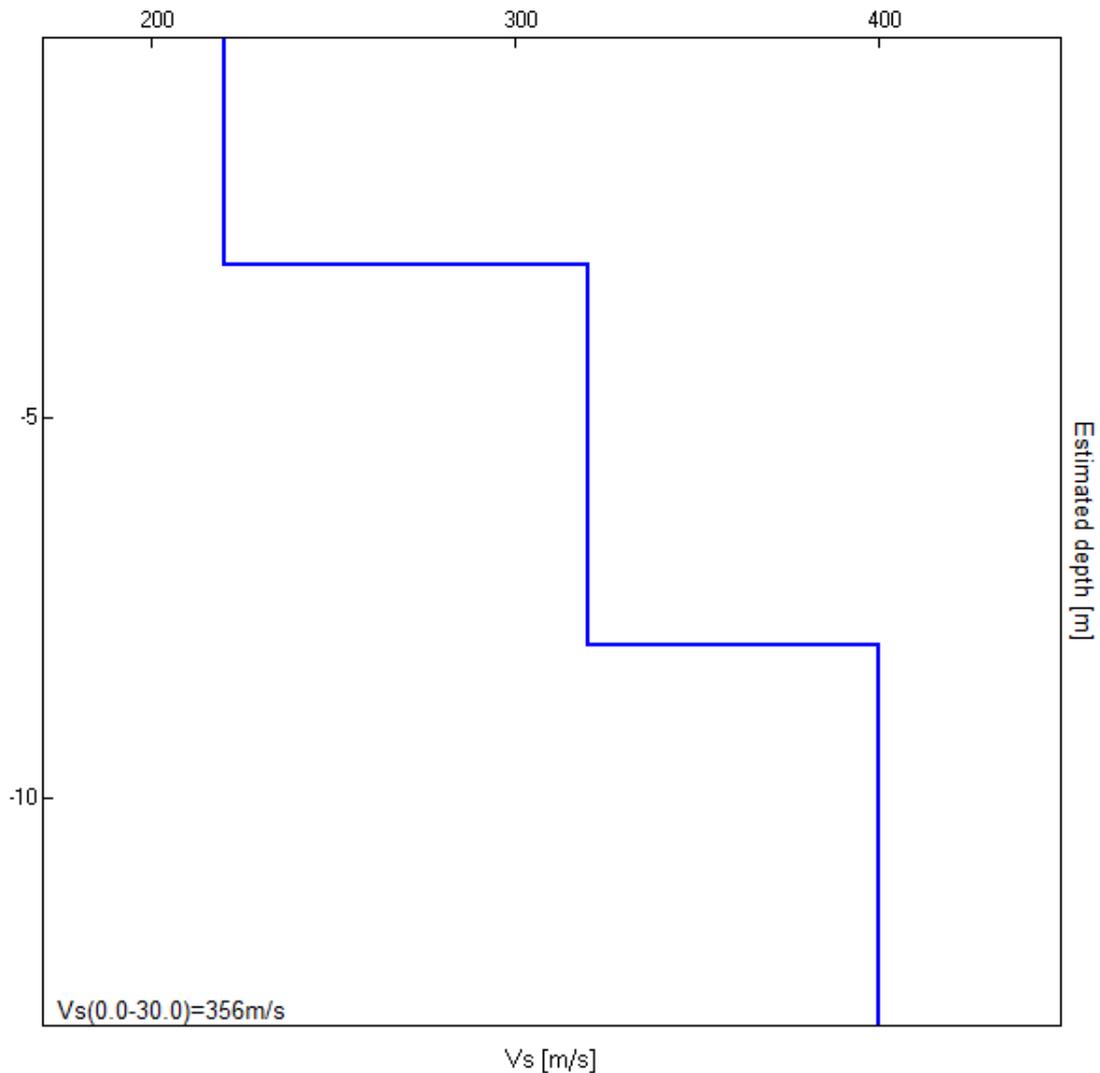
Interpretazione sondaggio tromografico T6

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00-1.00	110	C	C (Vs,eq = 307 m/s)
1.00-10.00	270	C	
10.00-30.00	370	B	



Sondaggio tromografico T7

Profondità (m)	Vs (m/s)	Categoria sismica ai sensi del D.M. del 17/01/2018	
0.00 – 3.00	220	C	C (Vs,eq =356 m/s)
3.00 – 8.00	320	C	
8.00 – 30.00	400	B	



4. CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO

Ai fini sismici il territorio interessato è incluso nell'elenco delle località sismiche con livelli di pericolosità 4.

Tale classificazione è stata dettata dalla O.P.C.M. n. 3274 del 20/03/03 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica” e confermata dalla Regione Sardegna (DGR 15/31 del 30/03/2004).

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 (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.

Nel complesso, pur in presenza di un alto rischio che possono ripetersi eventi sismici di elevata intensità, paragonabili a quello del '68, nel particolare della risposta sismica locale le indagini sismiche dimostrano che non vi sono problemi legati alla presenza di terreni a risposta sismica differenziale e, quindi, nulla osta alla realizzazione del progetto purché i calcoli delle strutture tengano presenti gli elevati gradi di sismicità che caratterizzano il sito.

Ai sensi del DM 17/01/2018, in corrispondenza degli aerogeneratori in progetto, la categoria di suolo, da considerare per questa fase di progettazione, è la 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”*.

5. 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:

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

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.

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 α e β , 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:

$$\frac{(q_{e1N})_{cs}}{(N_{1,60})_{cs}} = 5$$

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 e dai dati in nostro possesso, si evince che sono soddisfatte le condizioni di cui alla normativa vigente e può essere esclusa la possibilità che avvengano fenomeni di liquefazione dei terreni in quanto la verifica può essere omessa perché:

- 1) le accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) sono minori di 0,1g (vedi par. 7.11.3.4.2 Esclusione della verifica a liquefazione – NTC 2018);
- 2) in corrispondenza degli aerogeneratori, del tracciato del cavidotto e della sottostazione possono essere presenti falde freatiche nello spessore dei primi 15 metri di profondità dal piano campagna ma la presenza di depositi piroclastici addensati e saldati, di depositi piroclastitici argillificati e ignimbriti litoidi non consentono la formazione di fenomeni di liquefazione.

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.

6. CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICHE DEI TERRENI INTERESSATI DALLE OPERE IN PROGETTO

Da quanto desumibile dalle indagini geognostiche, geofisiche e geotecniche in situ ed in laboratorio eseguite in questa prima fase, i terreni che costituiscono il volume geotecnicamente significativo delle opere in progetto sono riferibili alle seguenti litologie: **a) Ignimbriti litoidi; b) Piroclastiti e cineriti; c) Depositi vulcanici argillificati; d) Lave**

Ne descriviamo singolarmente le caratteristiche litologiche e meccaniche così come desumibili dai dati ricavati durante le prove geognostiche, geofisiche e geotecniche in laboratorio ed in situ, nonché 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) IGNIMBRITI LITOIDI:** Si tratta "rocce coerenti" costituite da ignimbriti di colore violaceo con frammenti vetrosi caratterizzati da una struttura a fiamma di colore arancio. Si presentano mediamente fratturati con piani di fratturazione prevalentemente subverticali. Per quanto riguarda le caratteristiche fisico-meccaniche di questi terreni la valutazione del progettista va fatta tenendo conto che si tratta di roccia coerente a consistenza lapidea su cui non è possibile una sperimentazione di laboratorio.
- b) PIROCLASTITI E CINERITI:** Sono costituite da rocce incoerenti di natura sabbiosa a grana fine e sabbio-limosa, di colore prevalentemente grigiastro, da scarsamente a mediamente addensate. Per la caratterizzazione fisico-meccanica di tale complesso su cui, come è noto, non è possibile alcuna sperimentazione in laboratorio, il

progettista può fare riferimento, a tutto vantaggio della sicurezza, alle prove SPT eseguite in foro ed alle sperimentazioni scientifiche.

- c) **DEPOSITI VULCANICI ARGILLIFICATI:** si tratta di "rocce pseudocoerenti", derivanti da processi di argillificazione dei depositi vulcanici (ignimbriti e piroclastiti). Sono granulometricamente riferibili ad argille sabbiose, limi sabbiosi da mediamente consistenti a consistenti, a tratti plastici, di colore variabile tra grigio, giallo ocra e arancio. Si possono trovare intercalati sporadici sottili livelli argillificati tenaci. Per quanto riguarda le caratteristiche fisico-meccaniche di questi terreni la loro valutazione va fatta tramite prove geotecniche in laboratorio. Per i risultati ottenuti si rimanda alle tabelle allegate ed ai certificati delle prove eseguite.

RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE FISICHE

CAMPIONE	PROF. (m)	γ KN/m ³	γ_s KN/m ³	γ_d KN/m ³	Wn %	Wl %	Wp %	Ws %	S %	n %
S3CR1	13.20	17.57	26.62	12.40	41.65	51.92	31.45		98.55	53.41
S3CR3	26.70	19.17	26.52	15.71	22.02	58.81	35.34		86.51	40.76
S3C5	29.00	18.69	26.58	15.09	23.84	56.76	33.88		84.81	43.22
S6C1	5.47	19.04	26.44	14.00	35.98	52.31	29.84		100.00	47.03
S6CR3	20.00	18.14	26.70	13.19	37.58	47.20	33.63		99.74	50.62

RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE

CAMPIONE	PROF. (m)	C'	ϕ'	C'(Res)	ϕ' (Res)	Q _{max}	C _u	ϕ_u	Ed
		KN/m ²	gradi	KN/m ²	gradi	KN/m ²	KN/m ²	gradi	KN/m ²
S3CR1	13.20	10.0	20°			65.18	32.6		
S3CR3	26.70					434.17	217.1		
S3C5	29.00	50.0	21°			494.01	247.0		
S6C1	5.47	55.0	28°			180.54	90.3		
S6CR3	20.00	41.0	21°				220.0		

Riepilogo delle caratteristiche fisiche e meccaniche

- d) **LAVE:** sono depositi vulcanici tenaci, compatti, micro fessurati, a consistenza lapidea su cui non è possibile eseguire prove di laboratorio

è in sito vista l'elevata durezza. Per quanto riguarda le caratteristiche fisico-meccaniche di questi terreni la valutazione del progettista va fatta tenendo conto che si tratta di roccia coerente a consistenza lapidea su cui non è possibile una sperimentazione di laboratorio.

7. CAMPAGNA INDAGINI GEOGNOSTICHE, SISMICHE 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 di profondità pari a 30 mt. dal p.c.;
- ✓ prelievo di n. 3 campioni indisturbati sui quali eseguire le prove geotecniche in laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica;
- ✓ n. 5 S.P.T. in foro;
- ✓ installazione di un piezometro per l'individuazione della profondità del livello freatico;
- ✓ n. 1 indagine di sismica passiva HVSR per determinare le velocità delle onde di taglio (V_s) dei terreni.

8. CONCLUSIONI

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

- i litotipi che affiorano in gran parte dell'area ed in particolare in quella in cui verranno realizzati gli aerogeneratori in progetto sono riferibili all'Unità di Villanova Monteleone che nell'area abbiamo suddiviso da un punto di litologico in tre distinte porzioni:
 - ⇒ la prima è costituita da ignimbriti saldate, tenaci e fratturate;
 - ⇒ la seconda è costituita da depositi piroclastici e/o cineritici litologicamente costituiti da sabbie generalmente fini e limi sabbiosi. Generalmente si ritrova intercalata con la prima ma localmente diventa predominante;
 - ⇒ la terza è costituita da strati di depositi vulcanici argillificati di spessore generalmente limitato ma che può raggiungere anche una decina di metri e più.
- tutti i suddetti terreni sono ricoperti da uno spessore variabile tra 0.5 e 2.00 m di terreno vegetale con inclusi elementi lapidei eterometrici.
- 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;
- non si ritiene, quindi, di eseguire verifiche di stabilità poiché essendo l'area pianeggiante e totalmente esente da qualunque fenomenologia che possa modificare l'attuale habitus geomorfologico, non è possibile l'instaurarsi di alcun movimento franoso e, quindi, i calcoli farebbero registrare valori del coefficiente di sicurezza decisamente superiori ai minimi previsti dalla legge;

- quanto detto prima è confermato dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) che esclude le aree interessate dalle opere da qualunque fenomenologia di dissesto e di rischio geomorfologico;
- sono presenti alcuni elementi geomorfologici evidenziati nel PAI in aree vicine, che non potranno interferire con la stabilità delle opere. Ci riferiamo in particolare a:
 - ⇒ limitate porzioni delle aree limitrofe agli aerogeneratori WTG4 e WTG7 che sono interessate da rischio da frana Rg2 (Medio) con una pericolosità da frana Hg2 (media) e Hg3 (elevata);
- Sono presenti delle interferenze con il tracciato del cavidotto MT; a tal riguardo si specifica che il cavidotto corre lungo la strada esistente che non manifesta alcun segno di dissesto perché la realizzazione della strada con i suoi interventi ha reso del tutto stabile la sede stradale e, quindi, la realizzazione di questo modestissimo tratto di cavidotto non necessita la previsione di alcuna opera di consolidamento, né interferisce con il regolare e naturale deflusso idrico superficiale;
- in fase di progettazione esecutiva, per migliorare le condizioni della sede stradale, qualora la Provincia, titolare dell'infrastruttura, lo riterrà utile si potranno concordare, come opera di compensazione, alcuni puntuali interventi di ingegneria naturalistica.
- Da evidenziare che questi fenomeni sono stati oggetto di studi specifici e dai rilievi eseguiti durante i numerosi sopralluoghi effettuati non sono stati individuati all'interno delle aree di interesse progettuale segni di fenomeni geodinamici di alcun tipo che possano far pensare alla presenza di dissesti, né alla possibilità di riattivazione di fenomeni morfogenetici quiescenti, né ad elementi di instabilità, il progetto prevederà la

realizzazione di mirati interventi di ingegneria naturalistica nell'ambito areale di questi aerogeneratori al fine di migliorare comunque le condizioni di stabilità dei versanti circostanti;

Da quanto detto sopra non ci sono elementi geomorfologici ostativi alla realizzazione dell'impianto.

- dallo studio idrogeologico si evince che:
 - ❖ la presenza di frequenti livelli e strati argillificati all'interno dei complessi vulcanici comporta la formazione di acquiferi di modestissima potenzialità a causa di aree di alimentazione piuttosto limitate che si evidenziano con la presenza di piccole polle sorgentizie a carattere stagionale (alcune delle quali saranno valorizzate con le opere di compensazione previste);
 - ❖ l'ubicazione degli aerogeneratori è stata scelta proprio in modo da non interferire con gli acquiferi e sono stati posti ad una certa distanza dalle polle sorgentizie;
 - ❖ gli aerogeneratori fondati sulle ignimbriti avranno tipologia diretta con profondità di scavo limitate a 3-5 mt. che non possono interferire sulla circolazione idrica sotterranea che si sviluppa a profondità maggiori;
 - ❖ gli aerogeneratori che saranno fondati su pali hanno come terreno di sedime la parte argillificata delle vulcaniti e, quindi, non sono sede di falde freatiche;
 - ❖ gli aerogeneratori e loro piazzole non interferiscono con il reticolato idrografico superficiale;
 - ❖ le opere in progetto non producono emissioni di sostanze inquinanti né nel suolo, né nel sottosuolo, né nel reticolato idrografico superficiale.

Da quanto detto sopra si evince che nessun impatto significativo e negativo può essere indotto dalla realizzazione degli aerogeneratori sulla risorsa idrica che comunque sarà monitorata con l'istallazione di ben 7 piezometri per la misura del livello freatico e della qualità delle acque (vedi carta dei Punti di Monitoraggio Ambientale), così come le sorgenti presenti nelle vicinanze degli aerogeneratori e sopra descritte. La realizzazione del cavidotto impegna spessori modestissimi ed è del tutto impossibile interferire il livello freatico con gli scavi.

In definitiva non sussistono criticità di carattere idrogeologico che possano ostare la realizzazione delle opere in progetto nella più ampia sicurezza e salvaguardia della risorsa naturale "Acqua";

- in ogni caso il Piano di Monitoraggio Ambientale, per maggiore cautela, ha previsto di tenere sotto osservazione ante operam, in operam ed in fase di esercizio la qualità e le portate delle sorgenti sopra descritte (vedi elaborato denominato Piano di Monitoraggio Ambientale);
- ai sensi del DM 17/01/2018, in corrispondenza degli aerogeneratori in progetto la categoria di suolo è la 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, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche che possano ostare la realizzazione del progetto;
- dai primi calcoli preliminari i terreni non danno luogo a fenomeni di liquefazione in caso di sisma;
- ***i risultati ed i dati delle indagini e dei sopralluoghi eseguiti sono certamente esaustivi per la verifica della fattibilità del progetto e per***

valutare in piena scienza e coscienza tutti gli impatti che le opere possono imporre alle componenti ambientali coinvolte;

- nella fase di progettazione esecutiva e di calcolo delle strutture in cemento armato, attività che impongono un approfondimento di carattere geologico-tecnico di maggiore dettaglio, si prevede l'esecuzione delle indagini geognostiche e sismiche indicate nell'apposito capitolo;
- si ritiene, infatti, che in fase di progetto esecutivo e di calcolo delle strutture di fondazione si renderà necessario integrare le indagini con la realizzazione di un sondaggio e relative prove geotecniche in situ ed in laboratorio, nonché un'indagine di sismica passiva HVSR, in corrispondenza di ciascun aerogeneratore nell'esatta posizione in cui, a valle dell'iter autorizzativo, saranno effettivamente realizzati ed alcuni pozzetti esplorativi in corrispondenza dei tracciati dei cavidotti. Ciò al solo scopo di poter progettare con il necessario dettaglio le strutture in c.a. non già perché le suddette indagini potranno fornire indicazioni sulla componente ambientale diverse da quelle, certamente complete ed esaustive, che sono oggi in nostro possesso ai fini della valutazione degli impatti ambientali. A tal proposito si evidenzia che le indagini (geologiche, geognostiche, geosismiche e geotecniche) sono state estese a tutte le aree interessate dal progetto, fornendo un quadro esaustivo e completo delle problematiche ambientali relative agli aspetti geologici, geomorfologici ed idrogeologici, permettendo di avere ampia e sufficiente conoscenza delle componenti ambientali, coerentemente alle Linee Guida SNPA del 2019 sulla redazione degli studi di impatto ambientale, che, come è noto, prevede la realizzazione di un numero di indagini sufficienti per delineare i connotati della componente ambientale ma non chiede certamente un dettaglio da spingere fino alle

conoscenze utili per la calcolazione delle strutture in cemento armato, tanto che per la procedura di VIA il progetto allegato è del livello pari alla progettazione definitiva;

➤ 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.

Dott. Geol. Gualtiero Bellomo

