

Impianto eolico di Collinas

Progetto definitivo

Oggetto:

COL-22 – Relazione geotecnica

Proponente:



Sorgenia Renewables S.r.l.
Via Algardi 4
Milano (MI)

Progettista:



Stantec S.p.A.
Centro Direzionale Milano 2, Palazzo Canova
Segrate (Milano)

| Rev. N. | Data | Descrizione modifiche | Redatto da | Rivisto da | Approvato da |
|---------|----------|-----------------------|-----------------|------------|--------------|
| 00 | 12/06/23 | Prima Emissione | A. SANTAMBROGIO | A. PIAZZA | P. POLINELLI |
| | | | | | |
| | | | | | |

Fase progetto: **Definitivo**

Formato elaborato: **A4**

Nome File: **COL-22 Relazione geotecnica.docx**

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA | 3 |
| 1.1 | Descrizione del proponente | 4 |
| 1.2 | Contenuti della relazione | 4 |
| 1.3 | Bibliografia e Normativa di riferimento | 5 |
| 2 | INQUADRAMENTO TERRITORIALE | 6 |
| 3 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 8 |
| 4 | INQUADRAMENTO GEOTECNICO | 11 |
| 4.1 | Campagna di indagini geognostiche 2023 | 11 |
| 4.1.1 | Esiti della campagna geognostica | 13 |
| 4.1.2 | Calcolo dei parametri geotecnici dei terreni di fondazione | 16 |
| 4.1.3 | Parametri geotecnici di progetto | 19 |
| 5 | INQUADRAMENTO SISMICO | 21 |
| 5.1 | Zone sismogenetiche | 23 |
| 5.2 | Storia sismica dell'area | 24 |
| 5.3 | Sismicità dell'area | 25 |
| 5.3.1 | Effetti di amplificazione topografica | 26 |
| 5.3.2 | Categoria sismica dei terreni | 26 |
| 5.3.3 | Pericolosità sismica di base | 26 |
| 5.4 | Verifica alla liquefazione dei terreni di fondazione | 28 |
| 6 | CONCLUSIONI | 30 |

ALLEGATI

ALLEGATO 1: Relazione sulle indagini geognostiche

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto di Collinas | 6 |
| Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico Collinas..... | 7 |
| Figura 3-1: schema tettonico della zona del graben campidanese;..... | 8 |
| Figura 3-2: carta geolitologica scala 1:25000; | 10 |
| Figura 4-1: ubicazione delle prove geognostiche eseguite | 12 |
| Figura 5-1: Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale. | 22 |
| Figura 5-2: Sorgenti sismogenetiche (INGV-DISS);..... | 23 |
| Figura 5-3: Serie storica dei sismi che hanno interessato l'area di studio | 24 |
| Figura 5-4: Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali | 28 |

1 PREMESSA

La società Sorgenia Renewables S.r.l, d'ora in avanti il proponente, intende realizzare un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica nella provincia del Sud Sardegna, in agro del comune di Collinas.

L'impianto sarà costituito da 8 aerogeneratori di potenza unitaria nominale fino a 6 MW, per una potenza installata complessiva fino a 48 MW.

Data la potenza dell'impianto, superiore ai 10.000 kW, il servizio di connessione sarà erogato in alta tensione (AT), ai sensi della Deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 23 luglio 2008 n.99 e s.m.i.

Gli aerogeneratori forniscono energia elettrica in bassa tensione (690V) e sono pertanto dotati di un trasformatore MT/BT ciascuno, alloggiato all'interno dell'aerogeneratore stesso e in grado di elevare la tensione a quella della rete del parco. La rete del parco è costituita da un cavidotto interrato in media tensione (30kV), tramite il quale l'energia elettrica viene convogliata dagli aerogeneratori alla sottostazione elettrica (SSE) di trasformazione AT/MT di proprietà del proponente che sarà collegata in antenna ad una nuova stazione elettrica (SE) di smistamento a 380/150/36 kV della RTN, da inserirsi in modalità entra-esce sulla linea a 380 kV "Ittiri-Selargius" (nel seguito "nuova SE").

Le opere progettuali sono quindi sintetizzate nel seguente elenco:

- parco eolico composto da 8 aerogeneratori, da 6 MW ciascuno, con torre di altezza fino a 125 m e diametro del rotore fino a 170 m, e dalle relative opere civili connesse quali strade di accesso, piazzole e fondazioni;
- impianto di rete, consistente in una nuova SE di smistamento a 380/150/36 kV della RTN da inserirsi in modalità entra-esce sulla futura linea a 380 kV "Ittiri-Selargius";
- impianto di utenza per la connessione alla RTN, consistente nella rete di terra, nella rete di comunicazione in fibra ottica, nel cavidotto in media tensione (30kV) interamente interrato e sviluppato principalmente sotto strade esistenti, nella SSE di trasformazione 150/30 kV di proprietà del Proponente e nell'elettrodotto a 150 kV di collegamento tra la SSE e la nuova SE.

I progetti del tipo in esame rispondono a finalità di interesse pubblico (riduzione dei gas ad effetto serra, risparmio di fonti fossili scarse ed importate) ed in quanto tali sono indifferibili ed urgenti, come stabilito dalla legge 1° giugno 2002, n. 120, concernente "Ratifica ed esecuzione del Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, fatto a Kyoto l'11 dicembre 1997" e dal D.Lgs. 29 dicembre 2003, n.387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa

alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" e s.m.i..

L'utilizzo di fonti rinnovabili comporta infatti beneficio a livello ambientale, in termini di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) risparmiate e mancate emissioni di gas serra, polveri e inquinanti. Per il progetto in esame si stima una producibilità del parco eolico superiore a 130 GWh/anno (Produzione Media Annuale P50), che consente di risparmiare almeno 24.000 TEP/anno (fonte ARERA: 0,187 TEP/MWh) e di evitare almeno 64.000 ton/anno di emissioni di CO₂(fonte ISPRA,2020: 493,80 g [CO₂]/kWh).

1.1 Descrizione del proponente

Il soggetto proponente del progetto in esame è Sorgenia Renewables S.r.l., interamente parte del gruppo Sorgenia Spa, uno dei maggiori operatori energetici italiani. Il Gruppo è attivo nella produzione di energia elettrica con oltre 4'750 MW di capacità di generazione installata e oltre 400'000 clienti in fornitura in tutta Italia. Efficienza energetica e attenzione all'ambiente sono le linee guida della sua crescita. Il parco di generazione, distribuito su tutto il territorio nazionale, è costituito dai più avanzati impianti a ciclo combinato e da impianti a fonte rinnovabile, per una capacità di circa 370 MW tra biomassa ed eolico. Nell'ambito delle energie rinnovabili, il Gruppo, nel corso della sua storia, ha anche sviluppato, realizzato e gestito impianti di tipo fotovoltaico (ca. 24 MW), ed idroelettrico (ca.33 MW). In quest'ultimo settore, Sorgenia è attiva con oltre 75 MW di potenza installata gestita tramite la società Tirreno Power, detenuta al 50%. Il Gruppo Sorgenia, tramite le sue controllate, fra le quali Sorgenia Renewables S.r.l., è attualmente impegnata nello sviluppo di un importante portafoglio di progetti rinnovabili di tipo eolico, fotovoltaico, biometano, geotermico ed idroelettrico, caratterizzati dall'impiego delle Best Available Technologies nel pieno rispetto dell'ambiente.

1.2 Contenuti della relazione

Il presente elaborato costituisce la relazione, geotecnica e sismica a supporto della documentazione tecnico-descrittiva per il progetto dell'impianto eolico ed è finalizzato a fornire una indicazione del contesto geotecnico di base, ed una caratterizzazione di massima dei litotipi che verranno interessati dalle opere di fondazione per l'edificazione dell'impianto.

L'indagine in oggetto al presente elaborato si è basata su dati e studi di origine bibliografica e sulla documentazione fornita dalla committenza.

Lo studio, dunque, ha affrontato e approfondito i seguenti temi:

- Inquadramento del contesto geologico-strutturale.
- Inquadramento e caratterizzazione sismica dei terreni.

- Ricostruzione della stratigrafia locale mediante consultazione della letteratura disponibile.
- Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni, ottenuta tramite la consultazione di lavori eseguiti nell'area di progetto e nelle sue prossimità, al fine di verificare le caratteristiche geotecniche dei terreni.

1.3 Bibliografia e Normativa di riferimento

Nella redazione del presente elaborato, sono state seguite e rispettate le indicazioni delle seguenti norme nazionali e regionali:

- DM 17/1/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche sulle Costruzioni".
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP, "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- UNI EN 1997-1:2013 "Eurocodice 7 – progettazione geotecnica".

Per la raccolta delle informazioni bibliografiche si è invece fatto riferimento a layer cartografici messi a disposizione dal Geoportale Regionale della Sardegna, Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sardegna e Note Illustrative allegate alla cartografia del progetto Carg/Ispra alla scala 1:50000, relativa all'area in studio.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito in cui sarà ubicato il parco eolico di nuova costruzione è collocato nel comune di Collinas, nella provincia del Sud Sardegna, in Sardegna.

L'impianto eolico di Collinas è localizzato a circa 45 km dal capoluogo, a circa 1,2 km dal centro urbano del comune di Collinas, ed a circa 8 km in direzione nord-ovest dal centro abitato del comune di Sanluri.

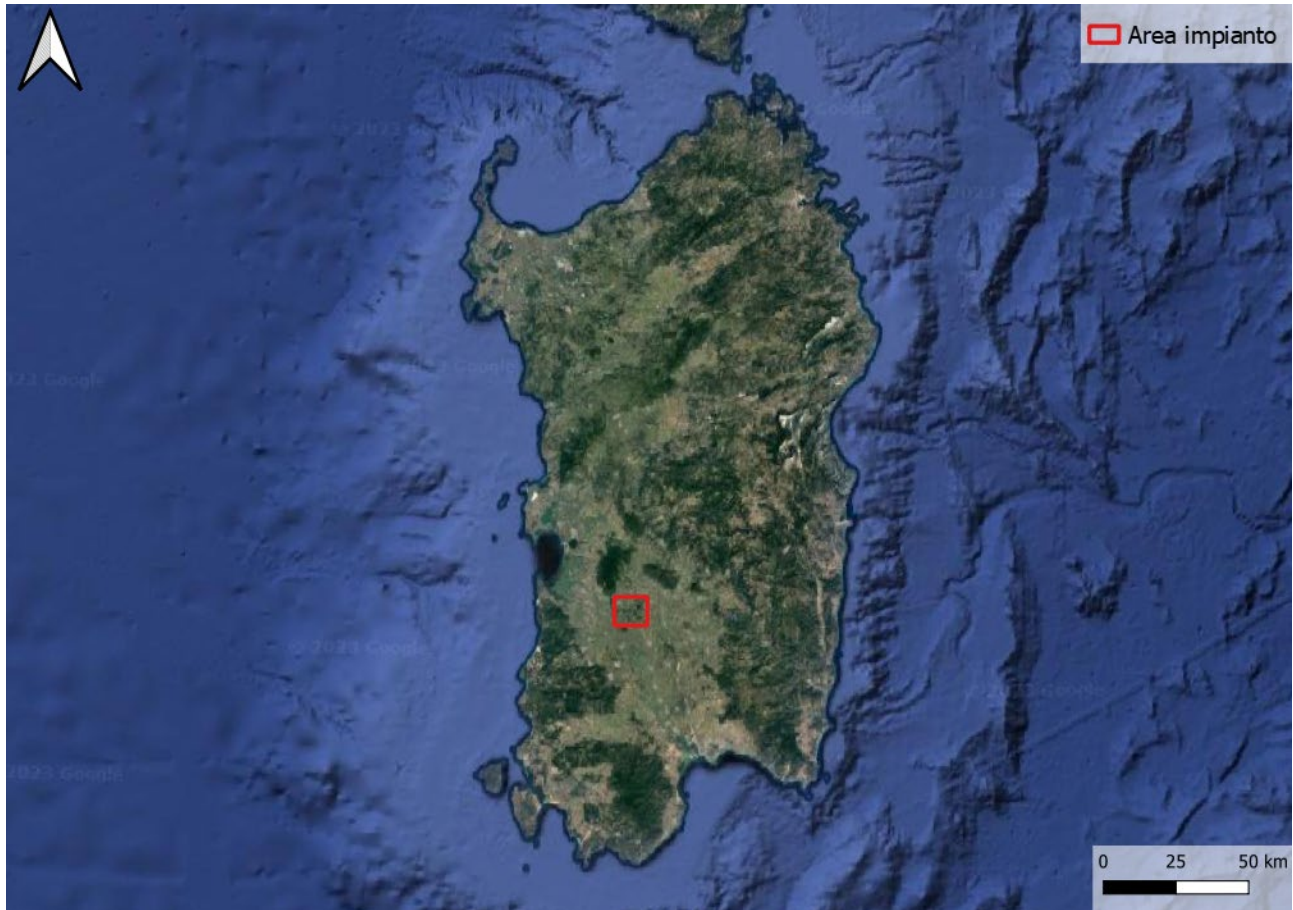


Figura 2-1: Inquadramento territoriale dell'impianto di Collinas

L'impianto eolico di Collinas è situato in una zona prevalentemente collinare non boschiva caratterizzata da un'altitudine media pari a circa 300 m s.l.m., con sporadiche formazioni di arbusti e la presenza di terreni seminativi/incolti.

Il parco eolico ricade all'interno dei seguenti fogli catastali:

- Fogli 1,4, 7, 9, 10, 22 nel comune di Collinas

In Figura 2-2 è riportato l'inquadramento territoriale dell'area nel suo stato di fatto e nel suo stato di progetto, con la posizione degli aerogeneratori su ortofoto.

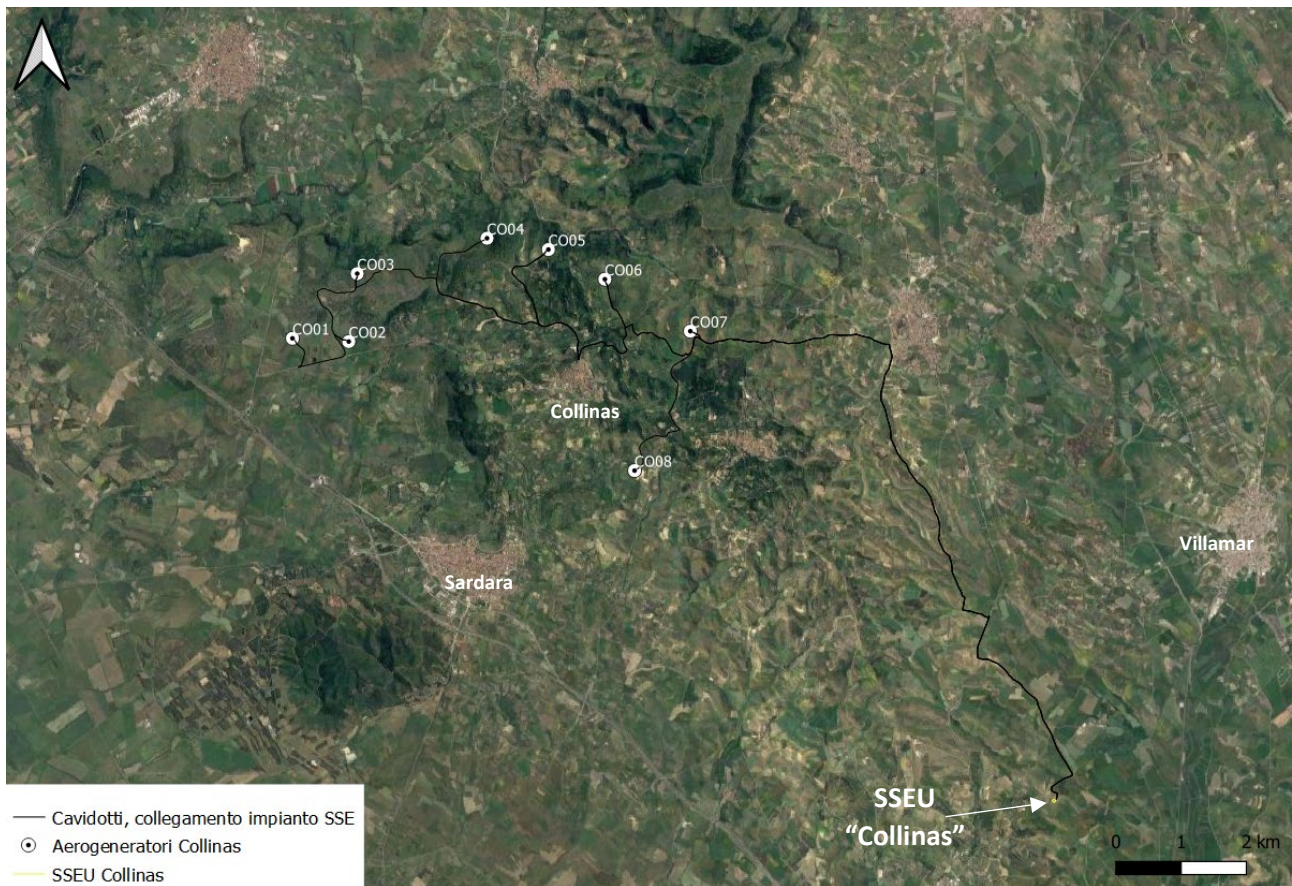


Figura 2-2: Inquadramento su ortofoto dell'area dell'impianto eolico Collinas

Si riporta in formato tabellare un dettaglio sulla localizzazione delle turbine eoliche di nuova costruzione, in coordinate WGS84 UTM fuso 33 N:

Tabella 2-1: Localizzazione geografica degli aerogeneratori di nuova costruzione

| ID | Comune | Est [m] | Nord [m] |
|------|----------|---------|----------|
| CO01 | Collinas | 481841 | 4388538 |
| CO02 | Collinas | 482705 | 4388489 |
| CO03 | Collinas | 482834 | 4389529 |
| CO04 | Collinas | 484824 | 4390072 |
| CO05 | Collinas | 485765 | 4389899 |
| CO06 | Collinas | 486631 | 4389443 |
| CO07 | Collinas | 487941 | 4388648 |
| CO08 | Collinas | 487087 | 4386511 |

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il sito in esame risulta ubicato ai margini settentrionali di una fossa tettonica, successivamente colmata da un potente spessore di sedimenti formatasi a seguito della fase distensiva plio-quaternaria, responsabile della formazione del Graben Campidanese; si osservano infatti nello schema strutturale sotto riportato (Figura 3-1), uno dei lineamenti tettonici di tipo "normale" associati al graben, orientati in direzione circa Nord/Ovest – Sud/Est.

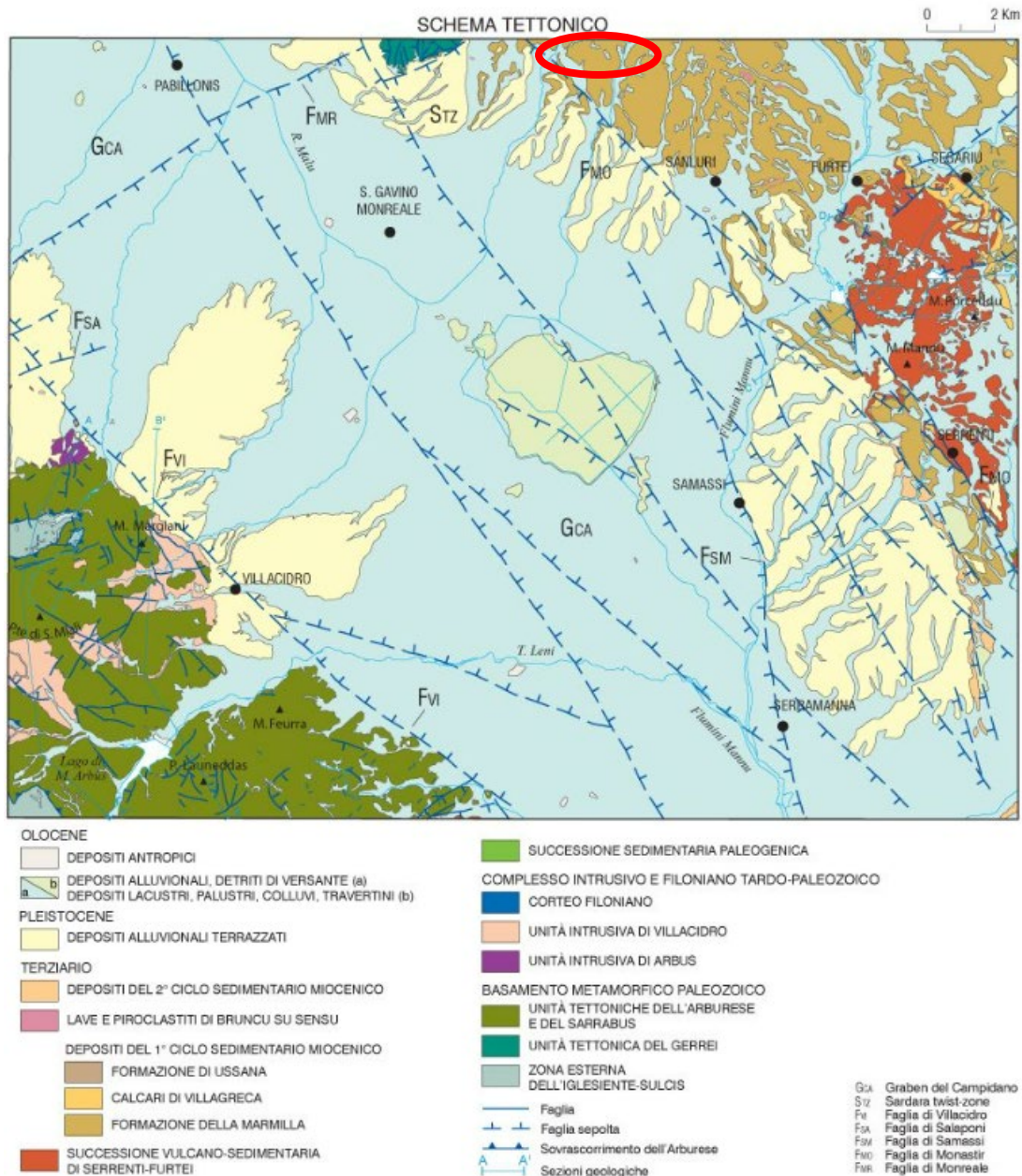


Figura 3-1: schema tettonico della zona del graben campidanese; in rosso l'area in studio

A partire dal Miocene superiore e fino al Pliocene-Pleistocene, tutta l'isola è interessata da un'importante fase distensiva da riferire all'apertura del Tirreno centro-meridionale, la quale favorisce una breve e localizzata (Penisola del Sinis, Campidano di Cagliari e di Oristano, Orsei)

ingressione marina nel Pliocene Inferiore. A questa tettonica distensiva sono da imputare le estese manifestazioni vulcaniche plio-pleistoceniche dell'Isola, prevalentemente basiche e ad affinità alcalina, transizionale e tholeiitica, di età isotopica compresa tra 5,3 e 0,14 Ma, nonché l'impostazione del graben subsidente del Campidano, colmato da potenti depositi detritici continentali plio-pleistocenici (formazione di Samassi).

La quasi totalità degli aerogeneratori risultano ubicati all'interno di una zona in cui affiorano (Figura 3-2):

- La Formazione della Marmilla (RML), nota da tempo come "Complesso marnoso-arenaceo Miocenico del Campidano", in cui prevalgono sedimenti fini costituiti da marne arenaceo-argillose e siltiti, siltiti marnose grigio giallastre, arenarie da medie a fini, distribuiti in alternanze tra il decimetro e il metro. Lo spessore complessivo è di circa qualche centinaio di metri. (Aquitaniense-Burdigaliano inf.)
- Subsistema di Portoscuso: litofacies a sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali (Pleistocene sup.)
- Unità di Cuccuru Aspru e Bruncu Mois: Basalti subalcalini generalmente ipocristallini da afirici a porfirici in colate (Pliocene-Pleistocene)

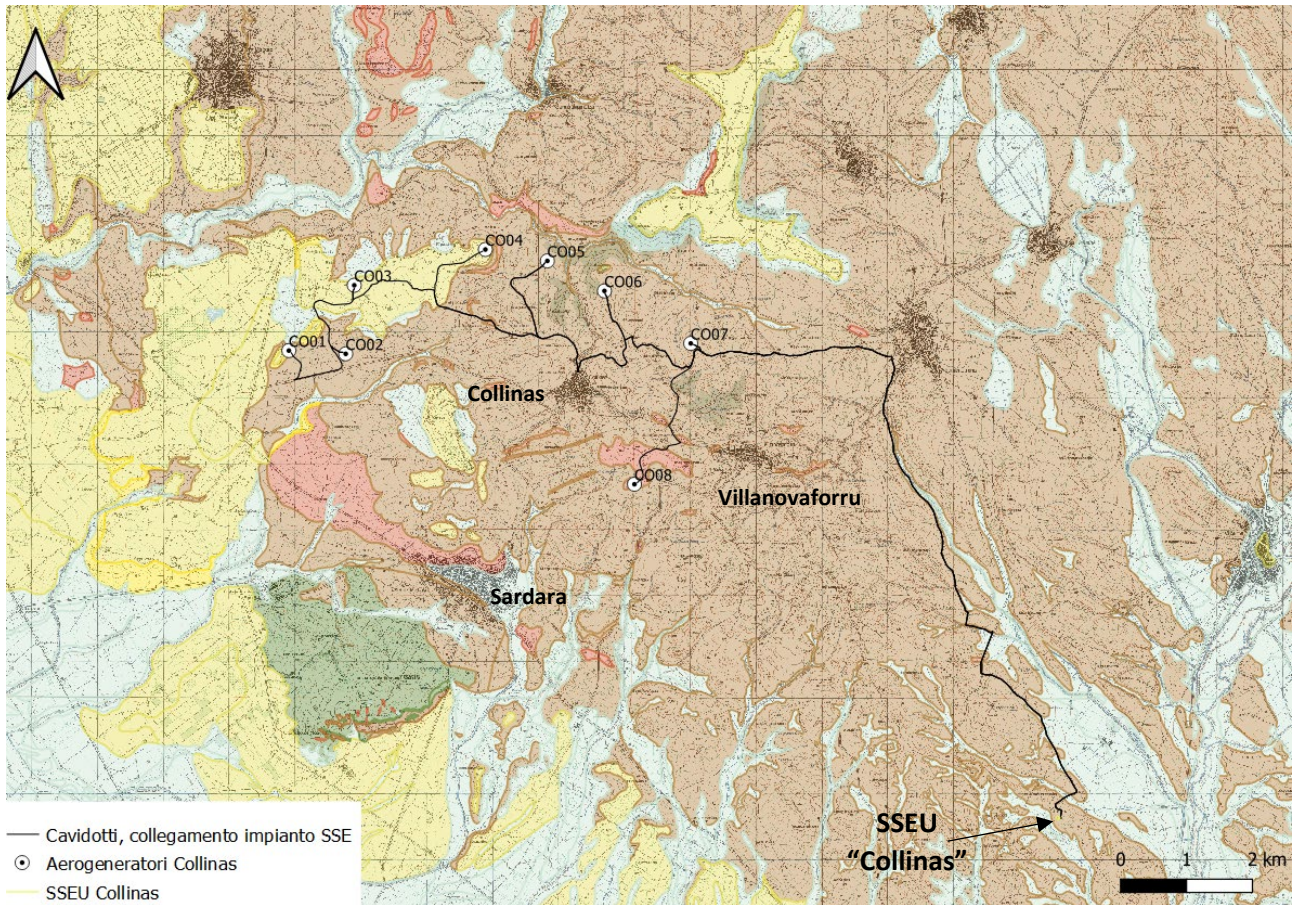
I rilievi collinari a nord dell'abitato di Sardara, nell'area di progetto, presentano una successione della formazione RML disturbata da piccole faglie con rigetti di ordine metrico e immersioni variabili a causa di fenomeni plicativi che hanno modificato la precedente struttura monoclinale. Qui, i depositi marnoso-arenacei risultano infine fittamente incisi e terrazzati dal reticolo idrografico impostatosi in epoca recente, nei cui alvei sono contenuti i depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi quaternari. Frequenti dicchi e intrusioni basaltiche e andesitiche caratterizzano infine la formazione della Marmilla.

Dallo stralcio cartografico sotto riportato si osserva che gli aerogeneratori CO02, CO05, CO06 e CO07 sono impostati sulle formazioni marnose arenacee della Marmilla, mentre CO03, CO04 e CO08 sono impostati su successioni basaltiche; infine, CO01 risulta ubicata in una zona di transizione tra le due formazioni.

Infine, risulta che anche la SSEU di impianto risulta ubicata su depositi riconducibili alla formazione della Marmilla, in una località in cui tale formazione viene incisa e terrazzata dal reticolo idrografico. Ne risulta che sia possibile individuare sia le litofacies tipiche della Marmilla, sia i depositi non o poco consolidati delle alluvioni oloceniche (Sabbie con subordinati limi ed argille).

Le stratigrafie ottenute a seguito di perforazione pozzi, ubicati nelle vicinanze dell'area di impianto, confermano che la successione stratigrafica della Marmilla presenta alternanze marnose-argillose-

arenacee con spessore anche di centinaia di metri, mentre le colate basaltiche possono raggiungere anche i 40-50 m di spessore.



FORMAZIONE DELLA MARMILLA: Marne siltose alternate a livelli arenacei da mediamente grossolani a fini, talvolta con materiale vulcanico rimaneggiato. AQUITANIANO - BURDIGALIANO INF

UNITÀ DI BRUNCU MOIS: Basalti, andesiti basaltiche ed andesiti da subafiriche a fortemente porfiriche; in colate e cupole di ristagno principalmente di ambiente subacqueo (lave a pillows), OLIGOCENE - MIOCENE

UNITÀ DI CUCCURU ASPRU: Basalti subalcalini generalmente ipocristallini da afirici a porfirici; in colate. PLIOCENE - PLEISTOCENE

DEPOSITI DI VERSANTE: Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE

Figura 3-2: carta geolitologica scala 1:25000; geoportale regione Sardegna; con legenda

4 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

La presente sezione riporta una descrizione delle attività di indagini geognostiche condotte in sito nell'aprile 2023, aventi lo scopo di definire il modello geotecnico preliminare delle aree per la progettazione degli interventi di progetto. La necessaria limitatezza delle indagini che è stato possibile condurre in questa fase progettuale, determinata dalla impossibilità di raggiungere la maggior parte delle aree di progetto in assenza di viabilità, pur consentendo un primo inquadramento delle caratteristiche dei siti, richiede che in fase di progettazione esecutiva le indagini siano integrate in numero e tipologia al fine di poter disporre di esaustivi elementi per la progettazione delle opere fondazionali e stradali.

4.1 Campagna di indagini geognostiche 2023

Le indagini in oggetto, realizzate al fine di definire l'assetto stratigrafico e le caratteristiche geomeccaniche preliminari dei terreni in prossimità delle particelle individuate per la realizzazione dell'impianto, sono consistite in:

- Esecuzione di n.1 prova Penetrometrica dinamica continua di tipo medio (DPM1), spinta fino alla profondità di circa 1,5 m da p.c.
- Esecuzione di n. 4 prove geofisiche MASW
- Esecuzione di n. 4 prove geofisiche di tipo HVSR

L'ubicazione delle prove realizzate è di seguito riportata (Figura 4-1); le ubicazioni delle prove HVSR sono coincidenti con quelle delle prove MASW.

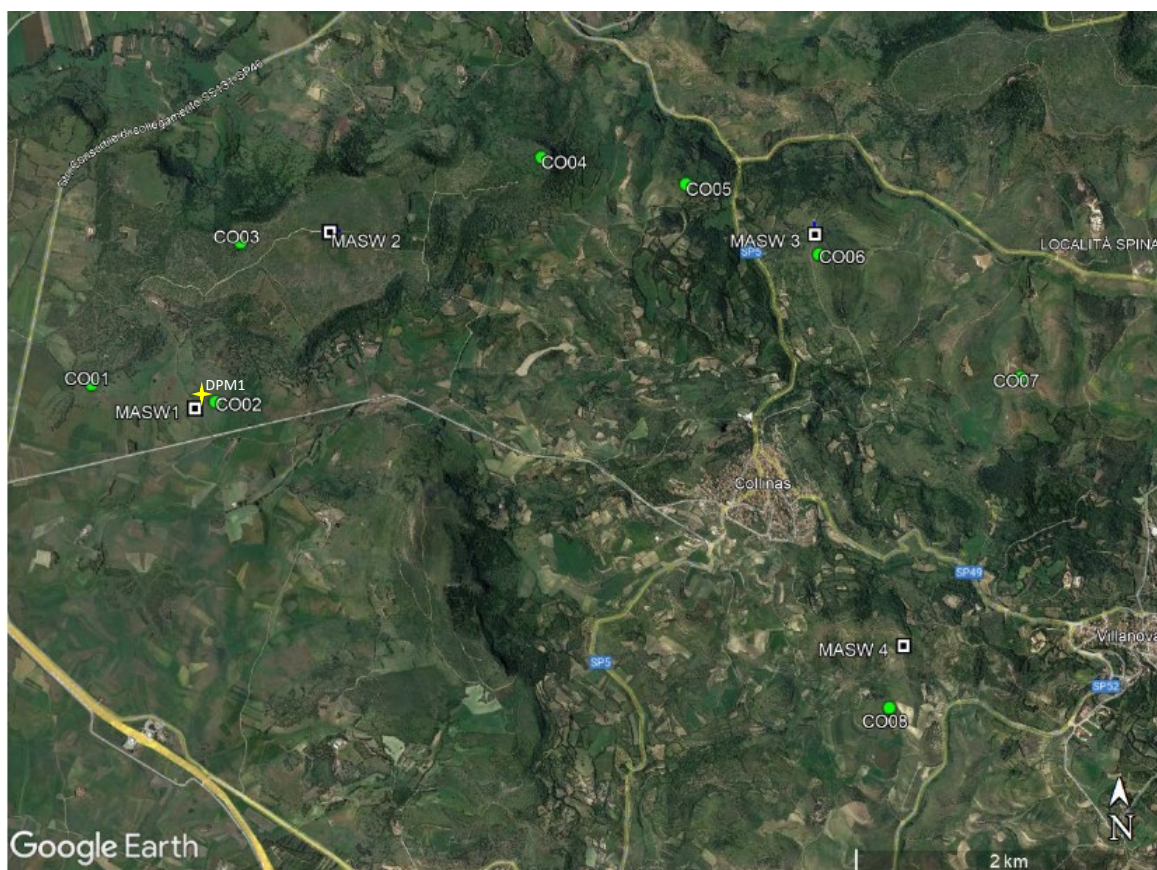


Figura 4-1: ubicazione delle prove geognostiche eseguite

Le coordinate delle postazioni di prova sono riportate di seguito (sistema WGS 84-UTM 32N):

Tabella 4-1: Coordinate ubicazioni postazioni di prova

| Id Prova | Coord. E | Coord. N |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| DPM 1 | 19988197.70 | 42278787.20 |
| MASW1 / HVSR1 | 19988197.70 | 42278787.20 |
| MASW2 / HVSR2 | 19981551.40 | 42279109.10 |
| MASW3 / HVSR3 | 19973316.90 | 42291140.30 |
| MASW4 / HVSR4 | 19981900.40 | 42300319.70 |

Le prove geofisiche hanno permesso di indagare indirettamente il sottosuolo fino ad una profondità massima di circa 25 m (raggiunta nelle prove MASW 1 e 4), mentre la prova penetrometrica, limitata alla profondità di 1,5m da pc. ha permesso di avere un riscontro diretto (seppur limitatamente ad un punto) preliminare sulle caratteristiche geotecniche dei depositi superficiali in prossimità dei generatori C001 e C002, come di seguito descritto.

Per mezzo della prova penetrometrica è stato possibile calcolare i parametri geotecnici dei terreni fino alla profondità indagata, mentre le prove geofisiche hanno individuato sostanzialmente la presenza di substrato roccioso sub-affiorante, con spessore di materiale sciolto non rilevante. È stata individuata la categoria sismica di sottosuolo così come previsto dalle NTC 2018, mentre i parametri geotecnici dei litotipi litoidi non è stato possibile definirli per mezzo delle prove effettuate a causa delle elevate velocità delle onde di taglio V_s misurate; infatti, le correlazioni di consolidato uso disponibili in bibliografia che permettono di derivare i valori dei parametri geotecnici di resistenza e deformabilità in base al parametro V_s sono valide solo per piccole deformazioni, mentre tendono a sovrastimare notevolmente i parametri calcolati a partire da elevati valori di V_s (come nel caso in oggetto), tali parametri sono stati quindi stimati da dati di letteratura ottenuti per formazioni analoghe come di seguito descritto e dovranno essere verificati e aggiornati prima della successiva fase di progettazione.

4.1.1 Esiti della campagna geognostica

Esecuzione di Prova penetrometrica DPM

Il penetrometro utilizzato per l'esecuzione della prova (DPM1) è del tipo GeoDeepDrill DM30 con passo da 50cm. I dettagli tecnici del macchinario sono riportati nel "Relazione sulle indagini geognostiche" disponibile in Allegato 1.

Le elaborazioni di seguito riportate sono valide solo per i terreni caratterizzanti l'areale delle postazioni degli **aerogeneratori C001 e C002**, gli unici ricadenti all'interno di una zona caratterizzata da depositi alluvionali sciolti con spessori di circa 5-6 m prima del tetto del substrato roccioso.

Tale evidenza è stata definita sulla base delle risultanze della prova masw01 e dalle evidenze di stratigrafie di pozzo perforati nelle circostanze.

Nella seguente tabella viene riepilogata la sequenza del numero di colpi misurato lungo la verticale di indagine.

| Prof. (m) | Nr. Colpi DPM |
|------------------|----------------------|
| 0.10 | 14 |
| 0.20 | 11 |
| 0.30 | 5 |
| 0.40 | 4 |
| 0.50 | 4 |
| 0.60 | 9 |

| | |
|------|----|
| 0.70 | 11 |
| 0.80 | 11 |
| 0.90 | 13 |
| 1.00 | 14 |
| 1.10 | 16 |
| 1.20 | 19 |
| 1.30 | 19 |
| 1.40 | 20 |
| 1.50 | R |

La stratigrafia definita lungo la verticale di indagine è la seguente:

- 0,0 – 0,20 m da p.c.: riporto/sottofondo stradale
- 0,20 – 0,50 m da p.c.: sabbia limosa poco addensata
- 0,50 – 1,40 da p.c.: sabbie e ghiaie in rapporti variabili, moderatamente addensati

Non è stata rilevata la presenza di falda fino alla quota di fondo foro.

Esecuzione di Stendimenti geofisici

Nell'area sono state eseguite 4 postazioni di prova per mezzo di n.2 tipologie di prova differenti in ciascun punto; la prima tipologia è il metodo MASW, una metodologia di indagine geofisica con misurazione attiva del profilo di velocità delle onde di taglio orizzontali Vs, prodotte per mezzo di energizzazione a partire dalla superficie topografica a distanza variabile da uno stendimento di geofoni che permettono la ricezione. Il secondo metodo eseguito è la prova HVSR, di tipo passivo, che si basa su un unico ricevitore che registra il rumore ambientale di fondo e non necessita dunque di energizzazione.

I dettagli tecnici della strumentazione utilizzata sono riportati sempre in Allegato 1.

Come accennato in precedenza le principali evidenze che hanno fornito tali prove sono:

- Stima della stratigrafia di sottosuolo: presenza di substrato roccioso subaffiorante, con debole spessore di materiale superficiale/suolo a tetto.
- Stima dei parametri geotecnici per il solo strato superficiale a bassa velocità di Vs negli stendimenti geofisici MASW01/HVSR01.
- Definizione della categoria sismica di sottosuolo così come previsto dalle NTC 2018.

Di seguito si riportano le risultanze ottenute dalla interpolazione delle prove geofisiche condotte in sito:

Tabella 4-2: misurazioni onde Vs

| MASW/HVSR 01 | | |
|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Base strato (m da p.c.) | Spessore (m) | Vs |
| 3.00 | 3.00 | 170 |
| 6.00 | 3.00 | 643 |
| 18.00 | 12.00 | 950 |
| 25.00 | 7.00 | 1160 |
| MASW/HVSR 02 | | |
| Base strato (m da p.c.) | Spessore (m) | Vs |
| 12.50 | 12.50 | 750 |
| 23.50 | 11.00 | 1065 |
| MASW/HVSR 03 | | |
| Base strato (m da p.c.) | Spessore (m) | Vs |
| 9.00 | 9.00 | 630 |
| 20.00 | 11.00 | 1039 |
| MASW/HVSR 04 | | |
| Base strato (m da p.c.) | Spessore (m) | Vs |

| | | |
|-------|-------|------|
| 6.00 | 6.00 | 680 |
| 18.00 | 12.00 | 850 |
| 25.00 | 7.00 | 1280 |

Infine, di seguito si riporta la categoria di sottosuolo calcolata in base alle risultanze di campo così come previsto dalla normativa di riferimento (NTC 2018):

Tabella 4-3:

| Id Prova | Vs eq (m/s) | Categoria NTC 2018 |
|-----------------|------------------------|---------------------------|
| 01 | 686 | B |
| 02 | 986 | A |
| 03 | 975 | A |
| 04 | 962 | A |

Per l'esecuzione dei calcoli di pericolosità sismica si è deciso di utilizzare la categoria sismica ritenuta più cautelativa, ovvero la **categoria B**: "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s."

4.1.2 Calcolo dei parametri geotecnici dei terreni di fondazione

I parametri geotecnici di sottosuolo sono stati calcolati a partire dalle risultanze di prova ottenute; per tale motivo, si segnala che sulla base degli esiti di prova si è potuto caratterizzare solo lo spessore di sedimenti presenti nell'areale degli aerogeneratori C001 e C002 (indagati per mezzo della prova DPM01 e MASW/HVSR01). Invece, le prove geofisiche nelle postazioni n. 02, 03 e 04 non hanno permesso di caratterizzare numericamente i litotipi indagati al di fuori della valutazione della categoria sismica di sottosuolo, a causa delle elevate velocità delle onde Vs misurate.

Caratterizzazione dei sedimenti (C001 e C002): per la natura dei litotipi, i parametri considerati sono quelli per terreni granulari, dunque privi di coesione. Lo spessore massimo dei terreni è fino a 6 m da p.c.

Per calcolare i parametri geotecnici dalle prove DPM eseguite è necessario elaborare i parametri ottenuti calcolando il valore di N_{spt} , cioè il numero di colpi relativi alla prova più utilizzata SPT (standard penetration test) a cui le correlazioni fanno riferimento:

$$NSPT = \beta_t \cdot N$$

Dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui Q è l'energia specifica per colpo e Q_{SPT} è quella riferita alla prova SPT.

L'energia specifica per colpo viene calcolata come segue:

$$Q = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot \delta \cdot (M + M')}$$

in cui

- M peso massa battente.
- M' peso aste.
- H altezza di caduta.
- A area base punta conica.
- δ passo di avanzamento.

Si ricava poi il valore di N_{160} , cioè il valore normalizzato rispetto al rendimento differente tra i macchinari di prova DPM e SPT (Secondo Liao e Whitman):

$$(N_1)_{60} = CN \cdot N_{60} \text{ con } CN = \sqrt{(Pa' \sigma_{v0})} \quad CN < 1.7 \quad Pa = 101.32 \text{ kPa}$$

$$N_{60} = N_{SPT} \cdot (ER/60) \cdot C_s \cdot C_r \cdot C_d$$

Dove:

- ER/60 rendimento del sistema di infissione normalizzato al 60%.
- C_s parametro funzione della controcamicia (1.2 se assente).
- C_d funzione del diametro del foro (1 se compreso tra 65-115mm).
- C_r parametro di correzione funzione della lunghezza delle aste.

Il calcolo è stato eseguito mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della GeoStru Software ed ha restituito i seguenti esiti:

Tabella 4-4: caratterizzazione geotecnica della prova DPM01

| Litozona | profondità (m) | Nspt | Peso di volume (γ) (t/m ³) | Peso di volume sat. (γ sat) (t/m ³) | ϕ (°) | Dr (%) | Mod.Young E (MPa) |
|----------|-------------------|-------|---|--|---------------|-----------|-------------------------|
| 1 | 0.2 | 13.53 | 14.92 | 19.09 | 31.7 | 40.2 | 10.6 |
| 2 | 0.5 | 4.69 | 13.81 | 18.41 | 29.3 | 20 | 3.6 |
| 3 | 1 | 12.55 | 14.8 | 19.02 | 31.5 | 38.3 | 9.8 |
| 4 | 1.4 | 20.02 | 15.65 | 19.55 | 33.6 | 51.2 | 15.7 |

Per la stima dei parametri geotecnici dalla prova DPM si sono utilizzate le seguenti correlazioni:

- Densità Relativa, Dr%: Skempton (1986)

$$Dr = 100 \sqrt{\frac{N_{60}}{32 + 0,288 \sigma'_{vo}}}$$

- Angolo di attrito, ϕ : Sowers (1961)

$$\phi' = 28 + 0,28 N_{spt}$$

- Modulo di Young, E: Schmertmann (1978)

$$E = 2B \cdot N_{spt}$$

- Modulo Edometrico, Ed: Begemann (1974)

$$E_d = a + NSPT_{corr} + b$$

Caratterizzazione dei litotipi litoidi: Questi litotipi caratterizzano il sottosuolo degli aerogeneratori C003, C004, C0005, C006, C007, C008 e sono rappresentati da litologie basaltico/andesitiche e marnoso-siltose, in particolare:

- Basalti subalcalini appartenenti all'unità di Cuccuru Aspru e Bruncu Mois
- Marne siltose alternate a livelli arenacei da mediamente grossolani a fini, appartenenti alla formazione della Marmilla

Come osservato a seguito di studio di stratigrafie di pozzo ubicati nell'area in esame, queste unità possiedono spessori anche di decine/centinaia di metri.

La caratterizzazione geotecnica è stata eseguita per mezzo di dati di bibliografia tipici delle litologie in esame, in quanto i dati da prove geofisiche eseguite in sito non hanno restituito dati attendibili.

Table 4-1: parametri geotecnici litotipi litoidi da bibliografia

| Unità | γ (KN/m³) | ϕ base (°) | σ ci (MPa) |
|---------------|---|---------------------------------------|---|
| Basalto | 26,9 ÷ 30,4 | 35 ÷ 39 | 100 ÷ 250 |
| Marne siltose | 18 ÷ 20 | 30 ÷ 33 | 25 ÷ 50 |

Dove:

γ : peso naturale del litotipo

ϕ : angolo di attrito di base

σ : resistenza a compressione monoassiale

4.1.3 Parametri geotecnici di progetto

Nella presente sezione sono riportati i valori dei parametri di progetto per la stratigrafia di riferimento individuata:

Aerogeneratori C001 e C002

0.0 – 0.50 m da p.c.: sabbia limosa poco addensata

0.50 – 3.0 m da p.c.: sabbie e ghiaie moderatamente addensate

3.0 – 6.0 m da p.c.: sabbie e ghiaie maggiormente addensate (potenzialmente riconducibili a frammenti da alterazione bedrock sottostante)

Da 6.0 m da p.c.: bedrock litoide

Aerogeneratori da C003 a C008

Da 0.0 m da p.c.: bedrock litoide marnoso-siltoso oppure basaltico-andesitico in funzione delle ubicazioni.

Di conseguenza, i parametri geotecnici di progetto individuati sono di seguito riportati:

Tabella 4-5: parametri geotecnici di progetto - terreni incoerenti

| Strato | Peso di volume (γ) (t/m³) | Peso di volume sat. (γ sat) (t/m³) | ϕ (°) | Dr (%) | Mod.Young E (MPa) |
|---------------|---|--|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------|------------|
| Sabbia limosa molto addensata | 13.81 | 18.5 | 29.3 ÷ 30 | 20 | 3.6 |
| Sabbie e ghiaie | 14.8 ÷ 15.6 | 19.0 ÷ 19.5 | 31.5 ÷ 33.6 | 38 ÷ 51 | 9.8 ÷ 15.7 |

Tabella 4-6: parametri geotecnici di progetto - litotipi litoidi

| Unità | Peso di volume (γ) (KN/m³) | ϕ base (°) | σ ci (MPa) | ϕ interno (°) | C [MPa] |
|---------------|--|---------------------------------------|---|--|--------------------|
| Basalto | 26,9 ÷ 30,4 | 33 ÷ 39 | 100 ÷ 250 | 38-45 | 3.5-35 |
| Marne siltose | 18 ÷ 20 | 30 ÷ 33 | 25 ÷ 50 | - | - |

Nell'areale del sito la falda presenta soggiacenza con profondità variabile da un minimo di 6 m da p.c. ad un massimo di 60 m, secondo i dati di rilievi freaticometrici in pozzi idrici.

La categoria sismica di sottosuolo individuata è la categoria B.

5 INQUADRAMENTO SISMICO

La classificazione sismica del territorio nazionale ha introdotto normative tecniche specifiche per le costruzioni di edifici, ponti ed altre opere in aree geografiche caratterizzate dal medesimo rischio sismico.

In Tabella 5-1 è riportata la zona sismica per il territorio in studio, indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003.

Tabella 5-1: zona sismica area di studio

| | |
|------------------------------|--|
| Zona sismica 4 | Zona con livello di pericolosità sismica molto basso |
| a_{gMax} $ag \leq 0.05$ | Accelerazione massima presente all'interno dei territori comunali. |

I criteri per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica sono stati definiti nell'Ordinanza del PCM n. 3519/2006, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche (Tabella 5-2) sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima (a_g) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Tabella 5-2: zone sismiche del territorio nazionale

| Zona sismica | Descrizione | accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [a_g] | accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [a_g] | numero comuni con territori ricadenti nella zona (*) |
|--------------|---|---|--|--|
| 1 | Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi fortissimi terremoti. | $a_g > 0,25$ g | 0,35 g | 703 |
| 2 | Zona dove possono verificarsi forti terremoti. | $0,15 < a_g \leq 0,25$ g | 0,25 g | 2.224 |
| 3 | Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari. | $0,05 < a_g \leq 0,15$ g | 0,15 g | 3.002 |
| 4 | È la zona meno pericolosa, dove i terremoti sono rari ed è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica. | $a_g \leq 0,05$ g | 0,05 g | 1.982 |

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20/03/2003 (e successive modifiche ed integrazioni) – “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di Normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” disciplinava la classificazione sismica dei comuni d'Italia. In seguito, per ognuno dei comuni d'Italia, è stato emanato un nuovo provvedimento che prevede l'adozione delle stime di pericolosità sismica

contenute nel Progetto S1 dell'INGV-DPC (Figura 5-1). Tale studio è stato condotto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che ha prodotto, per l'intera comunità nazionale, uno strumento scientificamente valido ed avanzato, nonché utilizzabile nell'immediato in provvedimenti normativi.



Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

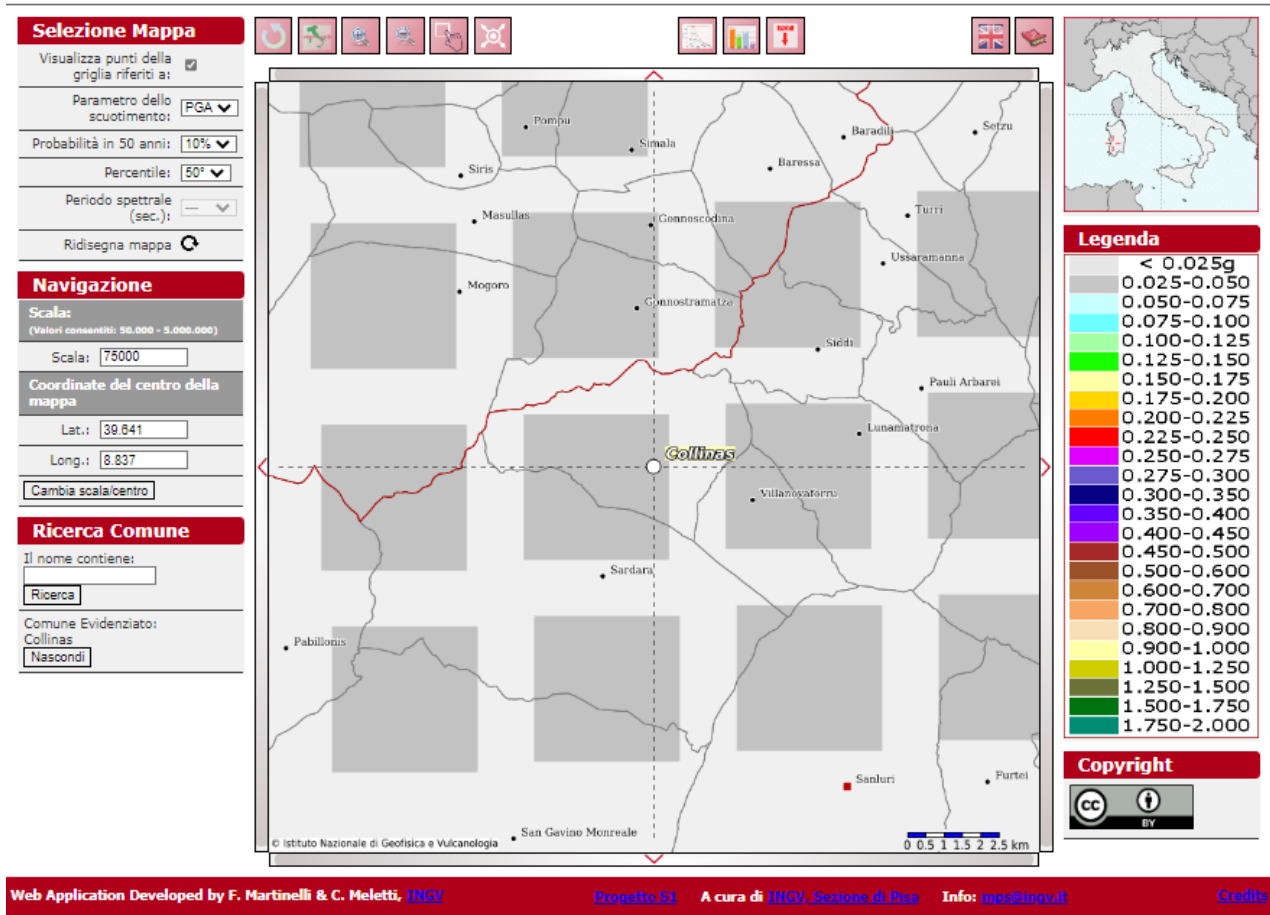


Figura 5-1: Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (da Meletti & Montaldo 2007) e della pericolosità sismica attesa al suolo ag sito-specifica, contenuta nel Progetto S1 dell'INGV-DPC (<http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>).

In particolare, con tale provvedimento è stato possibile superare il concetto di una classificazione sismica legata al singolo territorio comunale e si è posta nuova attenzione sul concetto di una pericolosità sismica uniforme a livello nazionale, stimata sulla base di quattro zone sismiche fondamentali. Infatti, la vecchia classificazione sismica produceva numerose situazioni in cui un comune classificato sismico era fisicamente confinante con un comune non classificato e, pertanto, si assisteva ad un brusco cambiamento nei parametri sismici in un breve arco di territorio.

Attualmente, la pericolosità sismica è stimata con una precisione maggiore e, di fatto, le variazioni tra le caratteristiche sismiche di aree adiacenti sono sempre continue e graduali.

Successivamente verrà mantenuta la classificazione del territorio nazionale in quattro differenti classi sismiche. All'attuale stato delle conoscenze e del progresso scientifico è possibile, attraverso l'applicazione WebGIS, consultare in maniera interattiva le mappe di pericolosità sismica.

Nello specifico, per le zone di interesse i valori di accelerazione al suolo (con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni risultano minori a 0,05 ag (accelerazione massima del suolo).

5.1 Zone sismogenetiche

Per sorgente sismogenica composta si intende una rappresentazione semplificata e tridimensionale di una faglia crostale contenente un numero imprecisato di sorgenti sismogeniche che non possono essere distinte singolarmente. Tali zone sono le principali considerate ad elevato rischio sismico in quanto, essendo caratterizzate dalla presenza di faglie attive, in esse vi è una elevata probabilità che si verifichino terremoti di elevata magnitudo.

L'ubicazione è riportata all'interno del DISS, ovvero il database georeferenziato edito dall'INGV riportante informazioni necessarie ad elaborare la pericolosità sismica di base a livello di pianificazione territoriale.

Da un punto di vista sismogenetico, l'area in esame non ricade all'interno di fasce sismogenetiche attive; la fascia più prossima al sito risulta distante circa 150 Km, come osservabile nel seguente estratto cartografico del progetto DISS riportato in Figura 5-2.

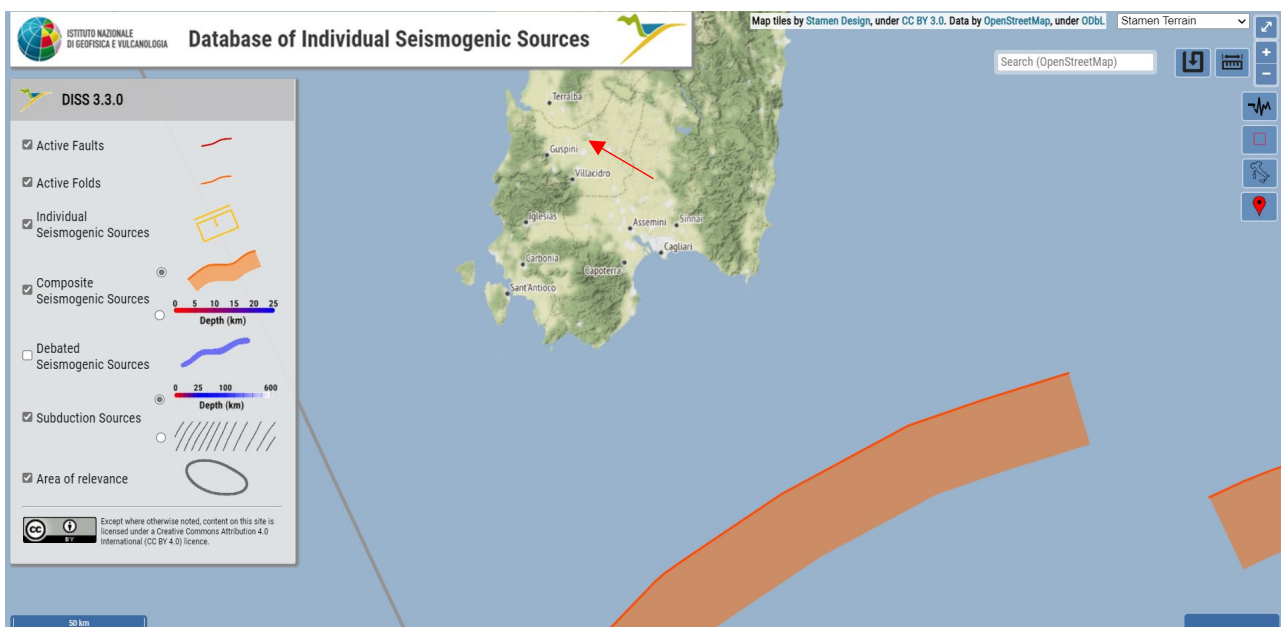


Figura 5-2: Sorgenti sismogenetiche (INGV-DISS); la freccia indica l'ubicazione del sito

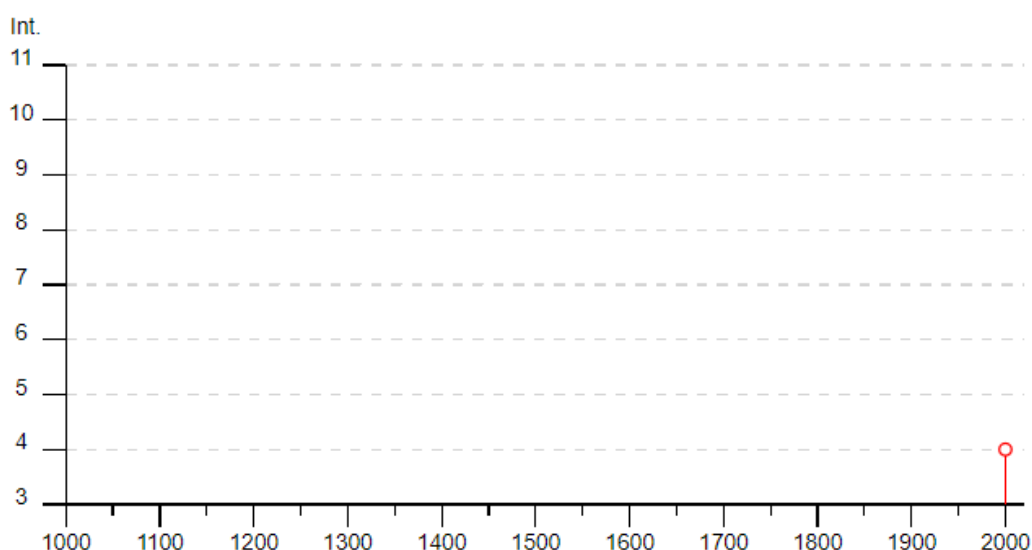
5.2 Storia sismica dell'area

L'area in esame non risulta essere stata storicamente interessata da fenomeni sismici rilevanti; il database macrosismico, utilizzato nel 2004 per la compilazione del catalogo CPTIO4 (Gruppo di lavoro CPTI, 2004), permette di visionare la storia sismica delle località italiane presenti almeno tre volte in DBMI04 (5325 località in totale).

Le informazioni contenute nel database hanno consentito una prima individuazione dei "centri sismici" rilevanti per il sito in esame e delle relative potenzialità in termini di intensità epicentrali storicamente documentate. Nel grafico sotto riportato si può osservare come, l'unico dato relativo a terremoti di rilevanza sia quello registrato nell'Aprile 2000 nel Tirreno centrale.

Collinas

PlaceID IT_68683
 Coordinate (lat, lon) 39.641, 8.840
 Comune (ISTAT 2015) Collinas
 Provincia Medio Campidano
 Regione Sardegna
 Numero di eventi riportati 1



► Personalizza il diagramma

| Effetti | In occasione del terremoto del | | | | | | | | | |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|------------------|------|----|------|
| Int. | Anno | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale | NMDP | Io | Mw |
| 4 | 2000 | 04 | 26 | 13 | 37 | 4 | Tirreno centrale | 265 | | 4.77 |

Figura 5-3: Serie storica dei sismi che hanno interessato l'area di studio

In conclusione, la distribuzione dei terremoti storici nell'area di interesse del progetto dimostra che la zona in studio è caratterizzata da un livello di sismicità molto basso, sia dal punto di vista della frequenza di eventi, che dei valori di magnitudo.

5.3 Sismicità dell'area

Di seguito viene fornito un inquadramento generale sulla classificazione sismica dell'area in esame nel rispetto delle disposizioni delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni del Decreto Ministeriale del 17/01/2018.

Secondo la normativa vigente la tipologia del suolo di fondazione è dipendente dal valore $V_{s,eq}$ definito dalla seguente equazione:

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

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le verifiche strutturali nei diversi stati limiti vanno condotte adottando le azioni sismiche che sono funzione della "pericolosità sismica" dell'area in esame. La "pericolosità sismica" è definita a partire dall'accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su suolo rigido, con piano campagna orizzontale.

Le azioni di progetto dovute al sisma si ricavano dalle accelerazioni a_g e dalle relative forme spettrali definite in funzione dei parametri:

- a_g = accelerazione orizzontale massima al sito
- F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per il presente progetto, i valori di tali parametri sono riportati nella tabella esposta nell'Allegato B del decreto, in quanto i parametri relativi alla Sardegna ed altre isole minori non rientrano all'interno del reticolo di riferimento INGV sul territorio. Utilizzando il software dedicato si ricavano gli spettri di risposta elastica delle componenti orizzontali di moto, per i diversi periodi di ritorno considerati dal D.M.

5.3.1 Effetti di amplificazione topografica

Le verifiche sugli effetti di amplificazione topografica si basano puramente su criteri di tipo morfometrico/morfologico. Inoltre, per le sezioni e le misurazioni si è preso come riferimento la cartografia disponibile.

Per quanto riguarda i valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica, questi sono riportati nella successiva tabella:

Tabella 5-3: categorie topografiche NTC 2018

| Categoria Topografica | Ubicazione opera | St |
|--|-------------------------|-----------|
| T1 (Sup. Pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$) | - | 1.0 |
| T2 (Pendii con inclinazione media $> 15^\circ$) | Sommità del pendio | 1.2 |
| T3 (Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media compresa tra 15° e 30°) | Cresta del rilievo | 1.2 |
| T4 (Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $> 30^\circ$) | Cresta del rilievo | 1.4 |

Nel caso specifico, in quanto gli aerogeneratori in progetto sono posti alla sommità di rilievi, il valore di riferimento è $St = 1.2$.

5.3.2 Categoria sismica dei terreni

In funzione delle risultanze ottenute dalle prove geofisiche condotte in sito, è stato possibile individuare la seguente classificazione di sottosuolo (così come indicato dalla normativa in vigore NTC 2018), valutata come la più cautelativa:

Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

5.3.3 Pericolosità sismica di base

Vita nominale (V_n): 50 [anni]

Classe d'uso: II

Coefficiente d'uso (C_u): 1.0

Periodo di riferimento (V_r): 50 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLO: 30 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLD: 50 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLV: 475 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLC: 975 [anni]

La Sardegna risulta esterna al reticolo di riferimento normalmente usato per calcolare, per mezzo di una media ponderata, i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c da utilizzare per definire l'azione sismica nei modi previsti dalle NTC. Per questo motivo risulta necessario utilizzare i valori tabellati in Allegato B al D.M., con i parametri validi (ritenuti costanti su tutto il territorio) per le isole (con l'esclusione della Sicilia, Ischia, Procida e Capri).

Punto d'indagine

Tabella 5-4: Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC, tratti da Allegato B alle NTC 2018 in quanto la Sardegna non è coperta dal reticolo di riferimento

| Stato limite | Tr [anni] | a_g [g] | F_0 [-] | T_c^* [s] |
|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| SLO | 30 | 0.186 | 2.61 | 0.273 |
| SLD | 50 | 0.235 | 2.67 | 0.296 |
| SLV | 475 | 0.500 | 2.88 | 0.340 |
| SLC | 975 | 0.603 | 2.98 | 0.372 |

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta = [10/(5+\xi)]^{(1/2)}$: 1.000

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T3

Tabella 5-5: Stabilità dei pendii e fondazioni NTC 2018

| Coefficienti | SLO | SLD | SLV | SLC |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| kh | 0.054 | 0.068 | 0.144 | 0.174 |
| kv | 0.027 | 0.034 | 0.072 | 0.087 |
| a_{max} [m/s ²] | 0.268 | 0.338 | 0.720 | 0.868 |
| Beta | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |

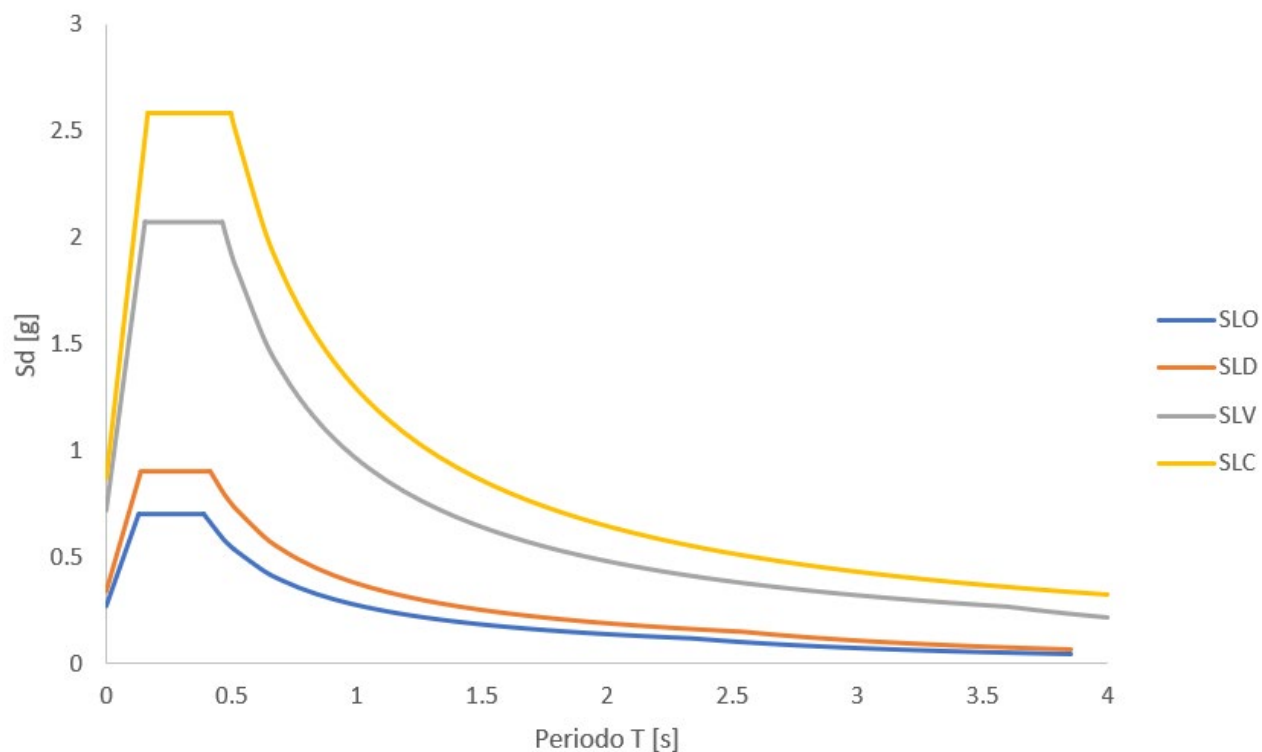


Figura 5-4: Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali – Spettro di Progetto

| | cu | ag [g] | F0 [-] | Tc* [s] | Ss [-] | Cc [-] | St [-] | S [-] | η [-] | TB [s] | TC [s] | TD [s] | Se(0) [g] | Se(TB) [g] |
|-----|-----|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| SLO | 1.0 | 0.186 | 2.610 | 0.273 | 1.2 | 1.426 | 1.2 | 1.44 | 1 | 0.130 | 0.389 | 2.344 | 0.268 | 0.700 |
| SLD | 1.0 | 0.235 | 2.670 | 0.296 | 1.2 | 1.403 | 1.2 | 1.44 | 1 | 0.138 | 0.415 | 2.540 | 0.388 | 0.902 |
| SLV | 1.0 | 0.500 | 2.88 | 0.340 | 1.2 | 1.365 | 1.2 | 1.44 | 1 | 0.155 | 0.464 | 3.600 | 0.720 | 2.076 |
| SLC | 1.0 | 0.603 | 2.980 | 0.372 | 1.2 | 1.341 | 1.2 | 1.44 | 1 | 0.166 | 0.499 | 4.012 | 0.868 | 2.585 |

5.4 Verifica alla liquefazione dei terreni di fondazione

Il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

In assenza di interventi di miglioramento del terreno, l'impiego di fondazioni profonde richiede comunque la valutazione della riduzione della capacità portante e degli incrementi delle sollecitazioni indotti nei pali.

Tuttavia, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesta almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata* $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate dalla normativa NTC 2018 nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$ (U_c rapporto D_{60}/D_{10} , dove D_{60} e D_{10} sono il diametro delle particelle corrispondenti rispettivamente al 60% e al 10% del passante sulla curva granulometrica cumulativa).

Rispetto a quanto sopra riportato, come definito al precedente capitolo 5, risulta che l'accelerazione sismica massima attesa a piano campagna in sito è minore di 0,05g dunque si esclude il pericolo associato al fenomeno.

6 CONCLUSIONI

L'analisi del contesto idrogeomorfologico e geotecnico dell'area in esame ha permesso di trarre le seguenti considerazioni:

L'area di impianto risulta caratterizzata da litologie riconducibili ad un complesso marnoso-arenaceo Miocenico, in cui prevalgono sedimenti fini costituiti da marne arenaceo-argillose e siltiti, e a effusioni laviche basaltiche.

Si sono caratterizzati i litotipi che rappresenteranno il substrato di fondazione dal punto di vista geotecnico, individuando i parametri di resistenza e deformabilità dei materiali dalle risultanze di prove geognostiche condotte in sito e da consultazione di bibliografia di consolidato uso. Si è osservato che gli aerogeneratori C001 e C002 sono ubicati in una zona caratterizzata da circa 6 m di coltre di sedimenti incoerenti, seguita poi dal bedrock litoide. Invece, i restanti aerogeneratori sono direttamente impostati in zone con bedrock subaffiorante.

Si osserva che, vista l'elevata differenza litologica caratterizzante il sito in esame, prima della successiva fase di progettazione si procederà a verificare ed aggiornare il modello geotecnico di calcolo di ogni WTG.

Dal punto di vista sismico, il territorio ricade in un areale caratterizzato da una pericolosità sismica molto bassa, con un'accelerazione al suolo attesa minore di 0,05 ag/g; la categoria sismica di sottosuolo individuata per mezzo di prove geofisiche è la categoria B (considerata la più cautelativa tra le prove eseguite). La verifica di liquefazione dei terreni può essere omessa in quanto l'accelerazione sismica attesa al suolo è minore di 0,1 g.

Impianto eolico di Collinas

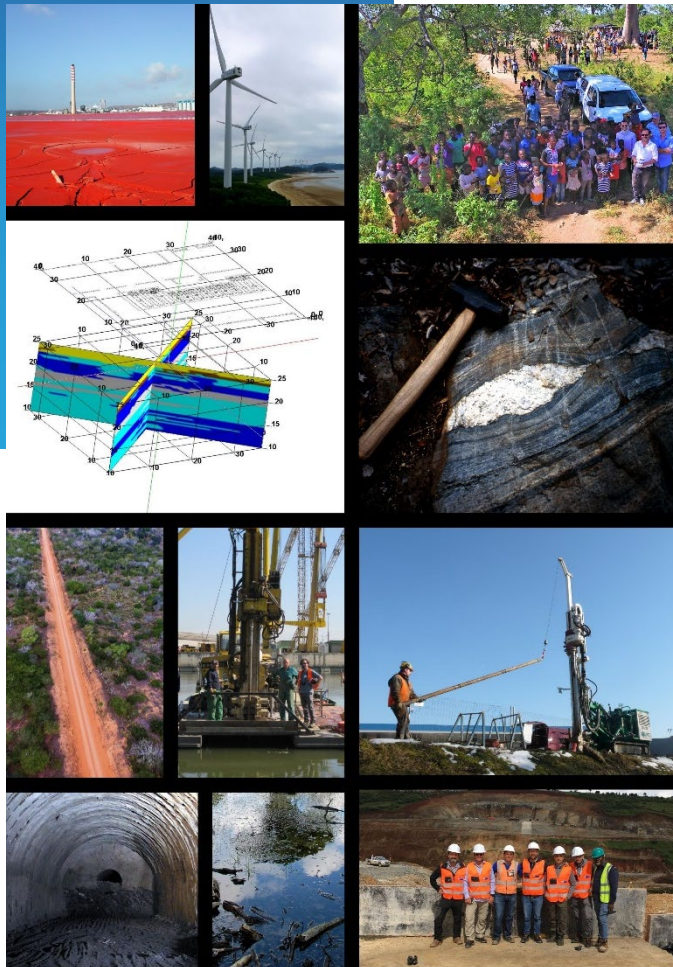
Progetto definitivo

Oggetto:

COL-22 – Relazione geotecnica

ALLEGATO 1

Relazione sulle indagini geognostiche



Report indagini geognostiche presso Collinas (SU)

A cura di:
Dr. Geol. Giovanni Coduri



| Job N° | Data | Cliente |
|--|--------------------|------------------|
| 1208 | 21/04/2023 | Stantec |
| Preparato | Controllato | Approvato |
| Coduri | | Coduri |
| Dr. Geol Giovanni Coduri P.IVA 01777890037 - CF: CDRGNN66S11L746G - CU: USA88PV Indirizzo ufficio: Via Partigiani 67 28925 Verbania (VB); Tel/Fax 0323/557599 Cell.: 3355468351 mail: info@petrageo.com Web: www.petrageo.com | | |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA E SCOPO DELL'INDAGINE | 3 |
| 2 | AREA DI STUDIO | 3 |
| 3 | INDAGINI GEOFISICHE | 3 |
| 3.1 | Prove eseguite | 3 |
| 3.2 | Strumentazione utilizzata | 3 |
| 3.3 | Metodologia applicata | 4 |
| 3.3.1. | HVSR (H/V) | 4 |
| 3.3.2. | Masw (curva di dispersione) | 6 |
| 3.3.3. | Elaborazione combinate H/v e Masw. | 7 |
| 3.4 | Risultati | 7 |
| 3.4.1. | Masw 1 | 8 |
| 3.5 | Risultati finali | 16 |
| 4 | PROVA PENETROMETRICA | 17 |
| 4.1 | Premessa | 17 |
| 4.2 | Elaborazione statistica delle prove | 18 |
| 4.3 | Elaborazione probabilistica e calcolo valori caratteristici dei terreni | 18 |
| 4.1 | Formula degli olandesi | 20 |

1 PREMESSA E SCOPO DELL'INDAGINE

Su incarico di Stantec, in previsione della realizzazione di un parco di aerogeneratori presso Collinas (SU), è stata condotta una campagna di indagini, consistita nell'esecuzione di 4 MASW ed una prova penetrometrica, finalizzata a fornire una caratterizzazione preliminare dei tipi litologici che verranno interessati dagli scavi e dalle opere di fondazione.

2 AREA DI STUDIO



Area di studio, ubicazione aerogeneratori in progetto e ubicazione indagini

L'area interessata dall'indagine è ubicata nell'intorno di Collinas.

3 INDAGINI GEOFISICHE

3.1 Prove eseguite

Nell'area sono state eseguite 4 prove HVSr (Horizontal over Vertical Spectral Ratio) e 4 stendimenti Masw (Multi-channel Analysis of Surface Waves)

3.2 Strumentazione utilizzata

Per la raccolta dei dati è stato utilizzato un ricevitore "Tromino" dotato delle seguenti caratteristiche tecniche:

- 3 canali velocimetri a guadagno e sensibilità variabile: dal microtremore (+/- 0.5 mm/s) alle vibrazioni forti (fino a +/- 5 cm/s)

- 3 canali accelerometrici (+/- 2 g)
- 1 canale analogico per trigger esterno
- Frequenze di lavoro (0.1-1024 Hz)
- Gps integrato
- Trasmettitore-ricevitore integrato.



Figura 7-1 Tromino Blu e wireless trigger

Con l'ausilio del trigger esterno è possibile l'esecuzione di prove ad energizzazione diretta (es. MASW) che permettono la raccolta di un dato più completo rispetto alla H/V.

3.3 Metodologia applicata

Per la caratterizzazione e l'identificazione delle caratteristiche del sottosuolo è stata utilizzata una tecnica di indagine che si basa sull'utilizzo combinato di 2 prodotti di indagine geofisica. Tali prodotti sono la curva H/V e la curva di dispersione ottenuta tramite metodologia MASW

3.3.1. HVSR (H/V)

La metodologia HVSR (Horizontal over Vertical Spectral Ratio) con singola stazione è stato inizialmente sviluppato in Giappone da Nogoshi e Igarashi (1971) per caratterizzare la risposta di sito sotto azione sismica ed è stato successivamente reso popolare e diffusa al mondo occidentale da Nakamura (1989). La tecnica HVSR è considerata una tecnica sismica passiva perchè sfrutta il rumore ambientale, quindi non necessita di un sistema di energizzazione. Il rumore generato consiste per lo più da onde superficiali, ovvero onde di Rayleigh e onde di Love prodotte dall'interferenza costruttiva delle onde P ed S negli strati superficiali.

Questa tecnica si basa sul metodo di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V, permettendo di ricavare la velocità delle onde di taglio, analizzare la sismicità degli edifici in progetto o quelli presenti e infine valutare la liquefazione dei terreni.

La tecnica HVSR, come la tecnica MASW, permette di definire la classificazione sismica dei suoli (NTC 2018); questa misurazione della velocità delle onde di taglio sono essenziali per la microzonazioni a grande e piccole scala.

I concetti base della tecnica si fondano sulla sismica tradizionale, ovvero rifrazione, riflessione e diffrazione e in parte alla teoria passiva dei microtrempi. Il rumore sismico registrato è il rumore ambientale, presente sulla superficie terrestre oppure generato da fenomeni atmosferici o attività antropiche. Il metodo, determina la “funzione di trasferimento del mezzo”, ovvero come il moto sismico viene alterato durante il passaggio di esso nel substrato partendo da un terreno alluvionale fino al raggiungimento del substrato rigido. Infatti, a causa di condizioni litostratigrafiche particolari possono verificarsi condizioni di amplificazione del moto sismico, definiti come “effetti di sito”.

La metodologia HVSR presenta dei vantaggi come per esempio il segnale ottenuto passivamente viene meno alterato rispetto ad una MASW attiva, possono raggiungere profondità più elevate fino ad una centinaia di metri e non richiede tempi lunghi di esecuzione rispetto altre tecniche sismiche.

La tecnica sismica passiva mostra le frequenze alle quali il moto del terreno viene amplificato per risonanza stratigrafica. Infatti, un terreno tende a vibrare non solo quando siamo in presenza di un sisma ma anche dovuto ad effetti locali, quali naturali o antropici; tale principio permette di misurare la frequenza fondamentale o di risonanza dei terreni. Le frequenze a cui si manifesta la risonanza vengono descritte dalla seguente relazione:

$$f = \frac{V_s}{4h}$$

dove V_s è la velocità delle onde di taglio e h è lo spessore dello strato. Dalla teoria di Nakamura il grafico del rapporto tra le componenti spettrali orizzontali e verticali evidenzia un picco di frequenza o di altri picchi di frequenza in caso di terreni eterogenei.

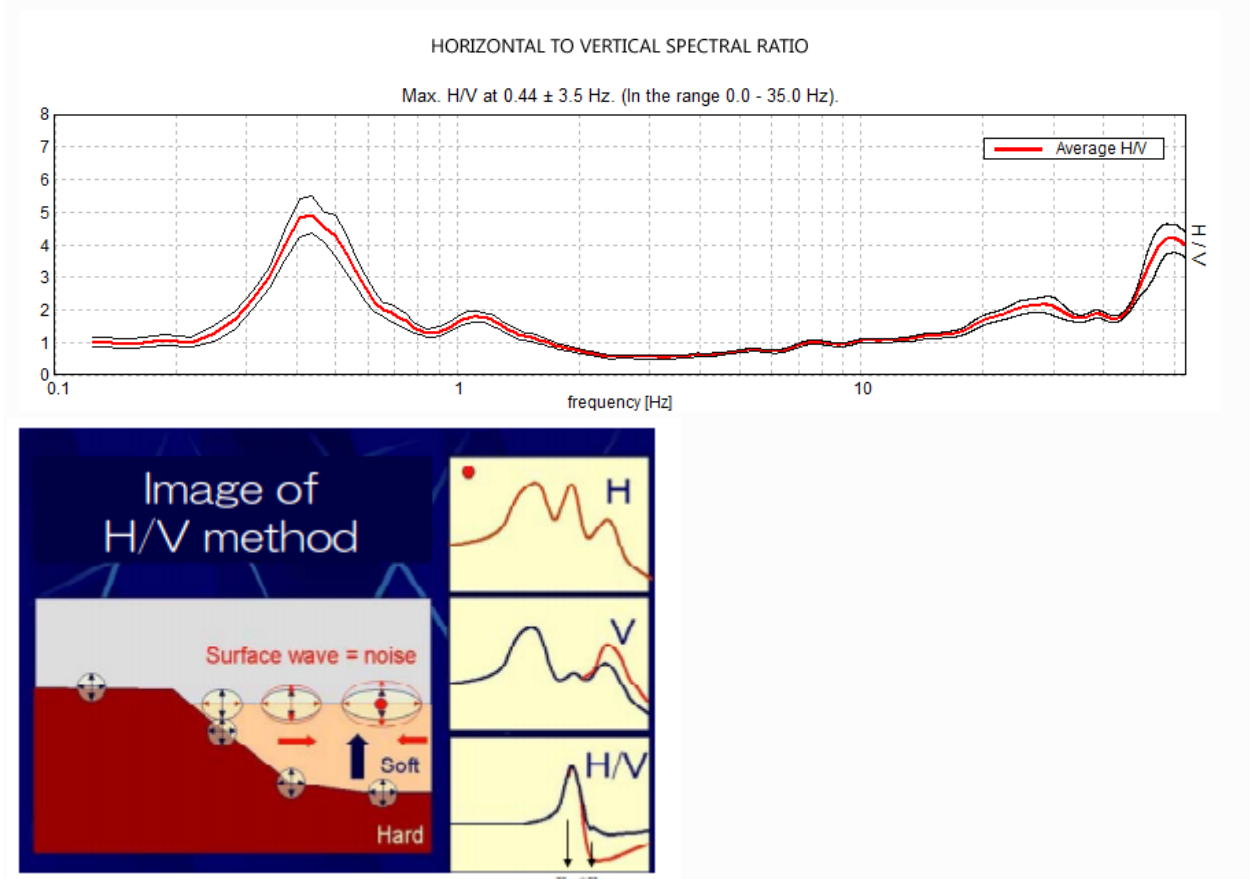


Figura 7-2 Schema esemplificativo metodo H/V

Tramite una decostruzione matematica delle onde è dunque ottenibile una ricostruzione della stratigrafia dell'area.

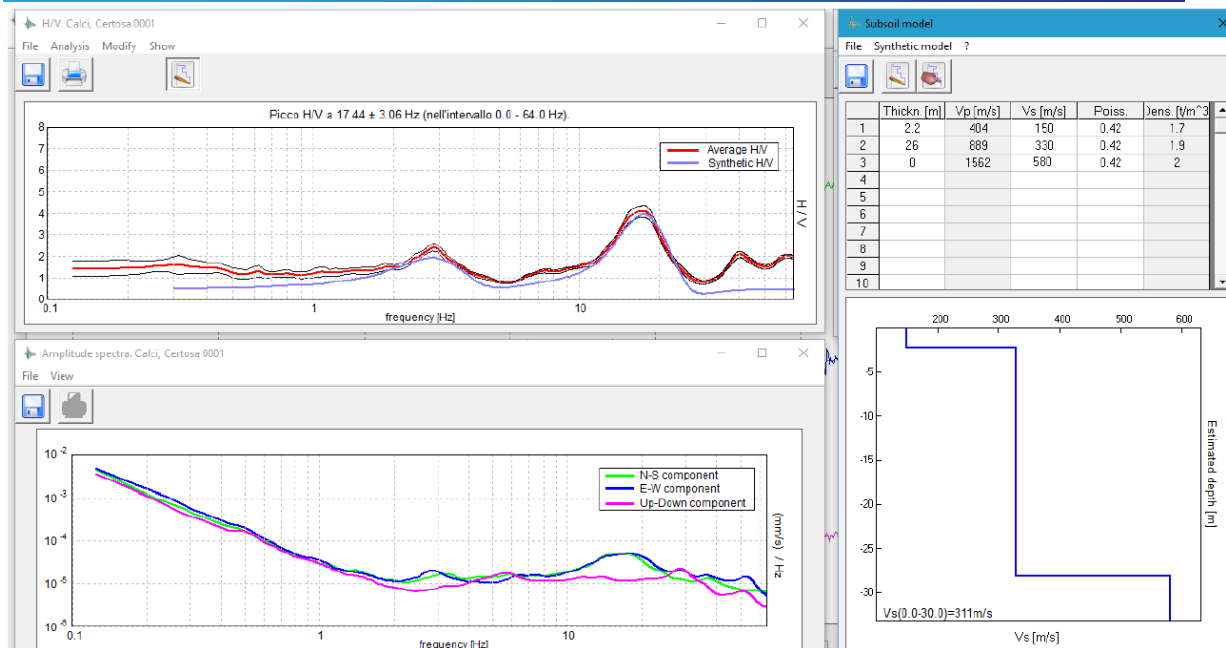


Figura 7-3 Esempio di curva di distribuzione H/V

3.3.2. Masw (curva di dispersione)

MASW è l'acronimo di Multi-channel Analysis of Surface Waves (Analisi Multicanale di Onde di Superficie). Tramite un'indagine MASW si analizza in dettaglio la dispersione delle onde di superficie che si propagano ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del mezzo.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio orizzontali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in conseguenza a diverse energizzazioni a distanza crescente o decrescente dal geofono. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo o in una combinazione di entrambi. Il metodo attivo consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30 m-50 m, in funzione della rigidezza del suolo.

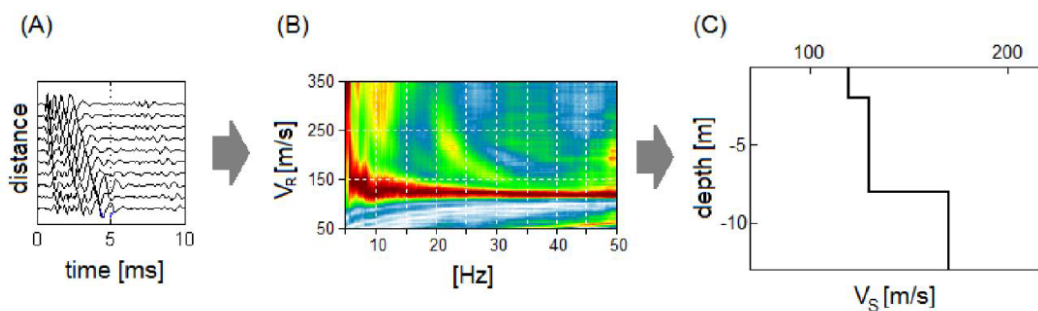


Figura 7-4 Esempificazione processo di elaborazione MASW

Dopo la creazione delle curve di dispersione è dunque possibile creare un modello del sottosuolo.

3.3.3. Elaborazione combinate H/v e Masw.

Dopo aver ottenuto sia la curva H/v che la curva di dispersione è possibile sfruttare i dati raccolti per poter ricostruire efficacemente il profilo delle Vs nel sottosuolo.

Il contributo della misura attiva (MASW) permette la ricostruzione di dettaglio delle caratteristiche del terreno a profondità, in base alle caratteristiche del terreno, relativamente superficiali; il metodo H/V permette di completare la ricostruzione fornendo i dati provenienti dai riflettori posti anche a profondità elevate.

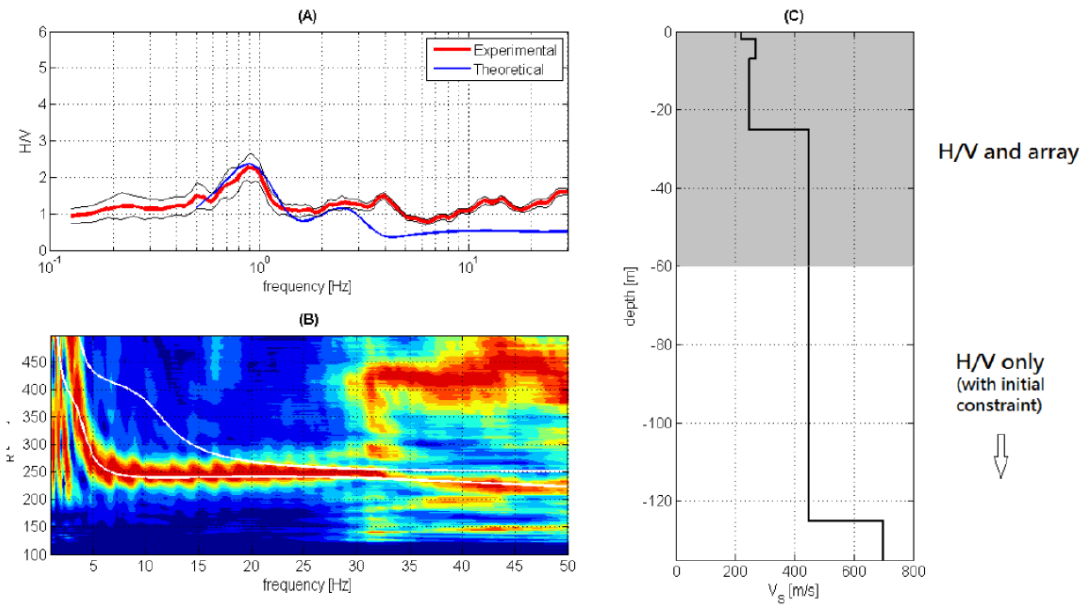
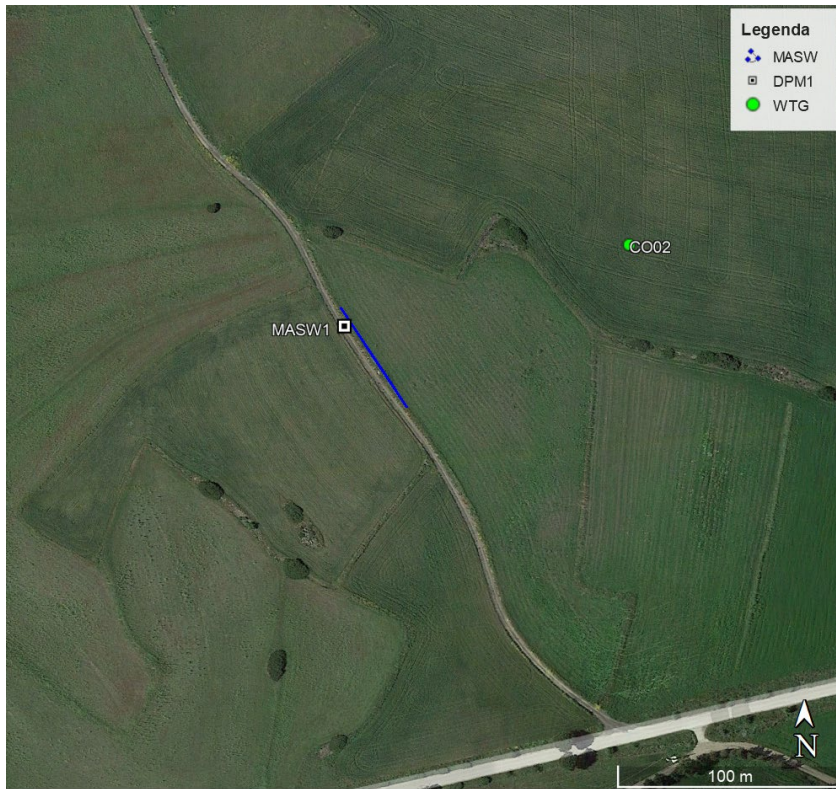


Figura 7-5 Elaborazione combinata H/v e MASW

3.4 Risultati

Le elaborazioni dei dati raccolti sul campo hanno fornito i seguenti risultati:

3.4.1. Masw 1



Ubicazione prova

Start recording: 13/04/2023 11:33:11

End recording: 13/04/2023 11:56:49

Trace length: 0h00'02".

Analysis performed on the entire trace.

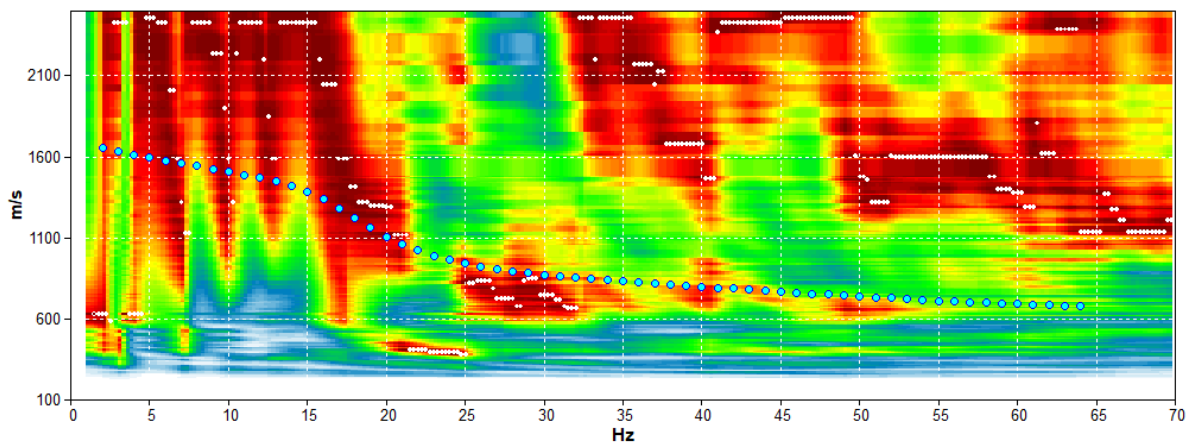
Sampling rate: 512 Hz

Channel labels:

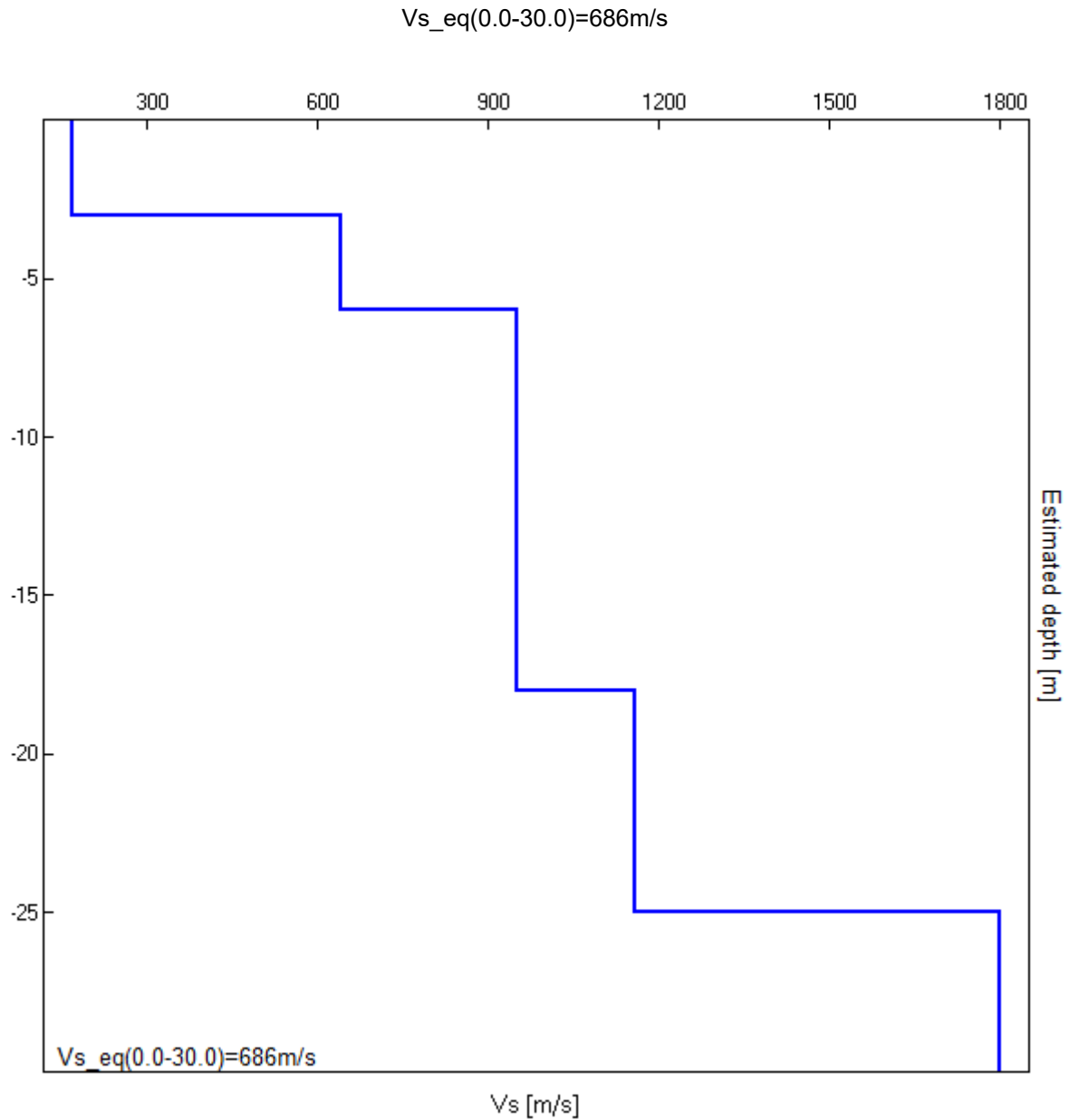
B1 ; B2 ; B3 ; B4 ; B5 ; B6 ; B7 ; B8 ; B9 ; B10
; B11 ; B12 ; B13 ; B14 ; B15 ; B16

Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 36.0 39.0 42.0 45.0 m.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE

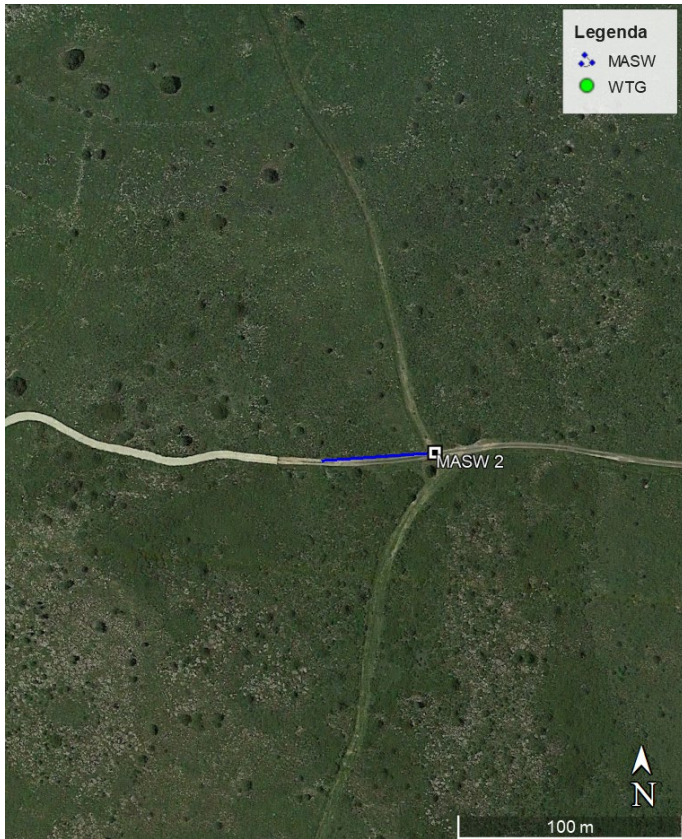


| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 3.00 | 3.00 | 170 | 0.45 |
| 6.00 | 3.00 | 643 | 0.38 |
| 18.00 | 12.00 | 950 | 0.38 |
| 25.00 | 7.00 | 1160 | 0.38 |
| inf. | inf. | 1800 | 0.38 |



$Vs_{eq}(0.0-30.0)=686\text{ m/s} = \text{Categoria B}$

3.4.1.1 H/v 2 Masw 2



Ubicazione prova

Start recording: 13/04/2023 11:33:11

End recording: 13/04/2023 11:56:49

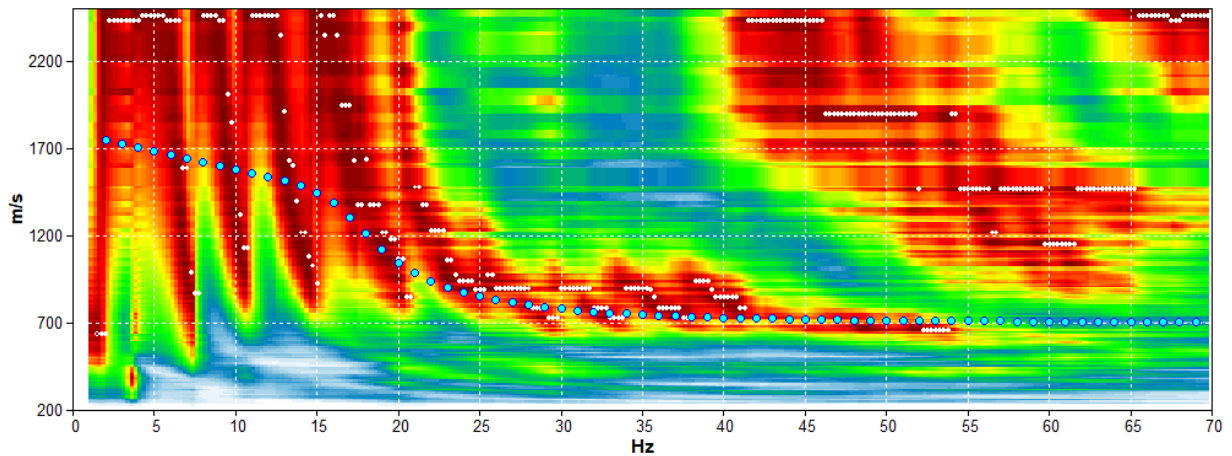
Trace length: 0h00'02".

Sampling rate: 512 Hz

Channel labels: B1 ; B2 ; B3 ; B4 ; B5 ; B6 ; B7 ; B8 ;
B9 ; B10 ; B11 ; B12 ; B13 ; B14 ; B15 ; B16

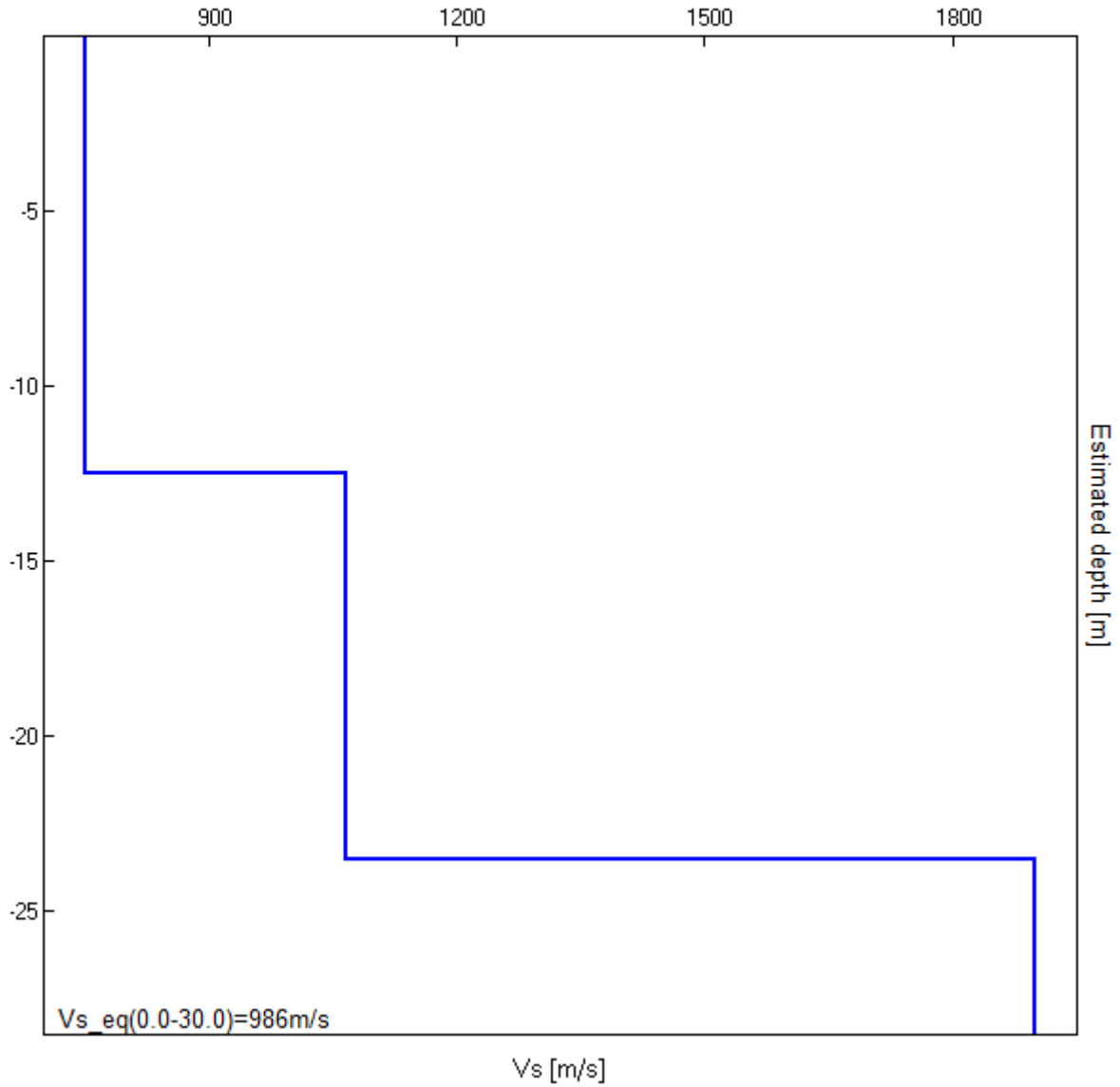
Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 36.0 39.0 42.0 45.0 m.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



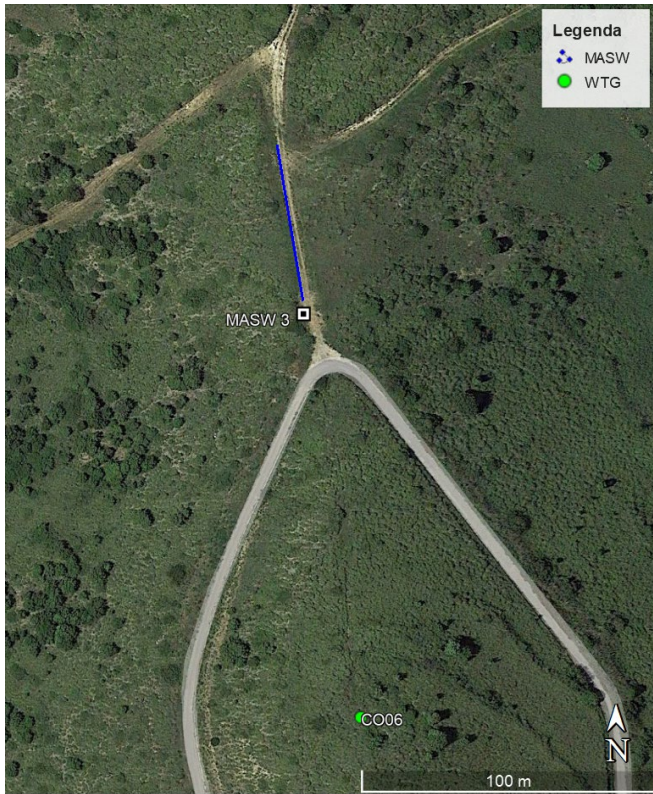
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 12.50 | 12.50 | 750 | 0.38 |
| 23.50 | 11.00 | 1065 | 0.38 |
| inf. | inf. | 1900 | 0.38 |

Vs_eq(0.0-30.0)=986m/s



Vs_eq(0.0-30.0)=986 m/s = Categoria A

3.4.1.2 H/v 3 Masw 3



Ubicazione prova

Start recording: 13/04/2023 15:28:48

End recording: 13/04/2023 15:35:43

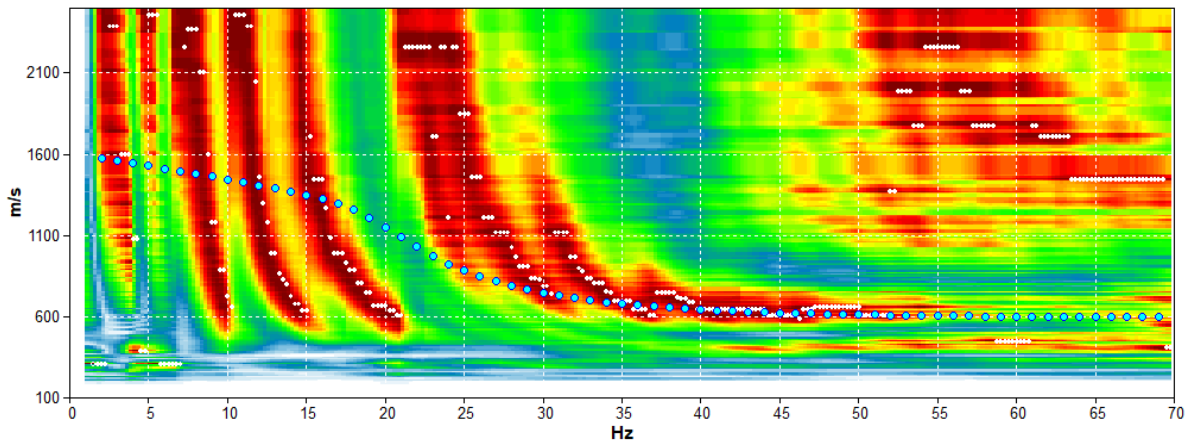
Trace length: 0h00'02".

Sampling rate: 512 Hz

Channel labels: B1 ; B2 ; B3 ; B4 ; B5 ; B6 ; B7 ; B8 ;
B9 ; B10 ; B11 ; B12 ; B13 ; B14 ; B15 ; B16

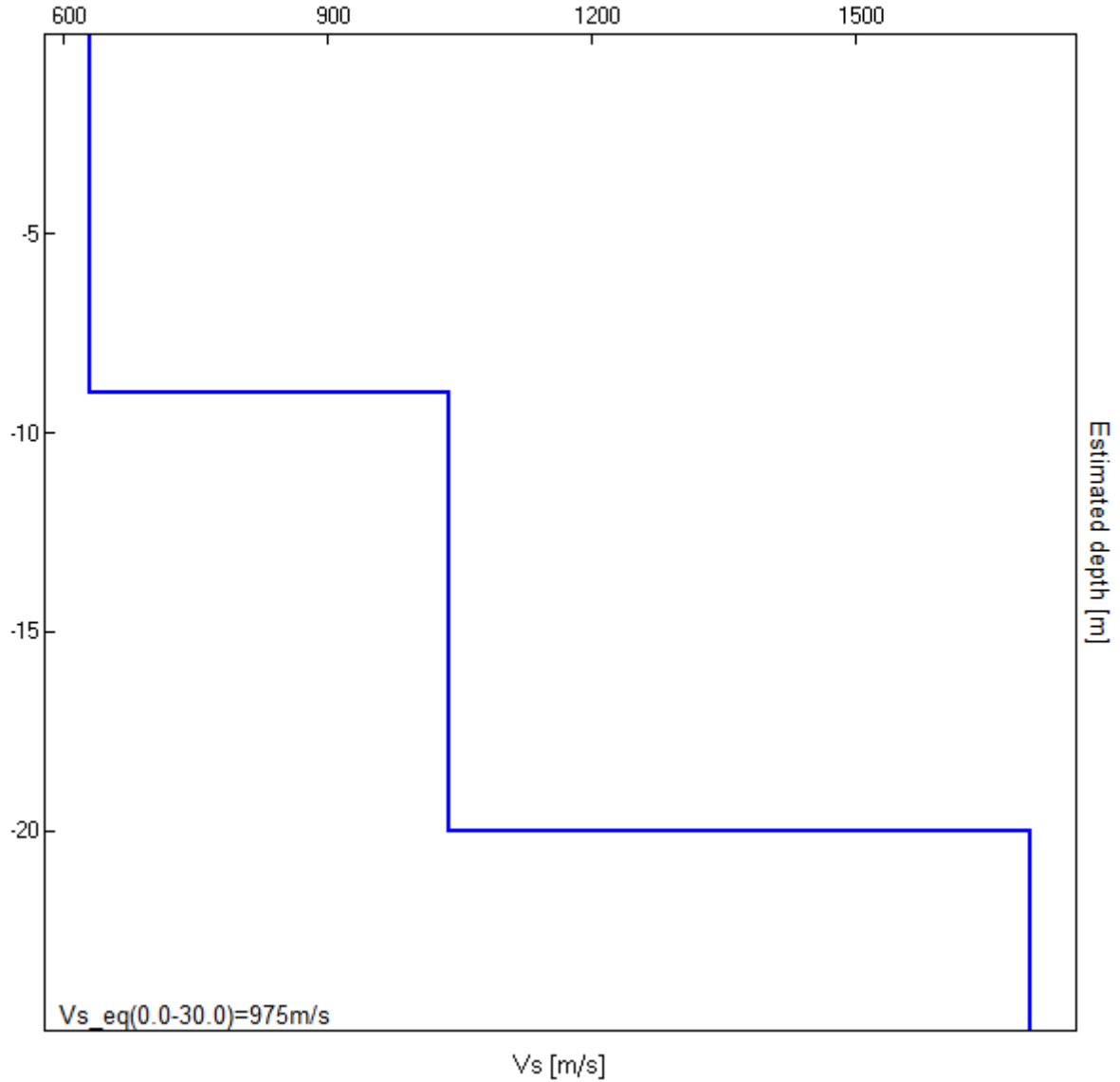
Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 36.0 39.0 42.0 45.0 m.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



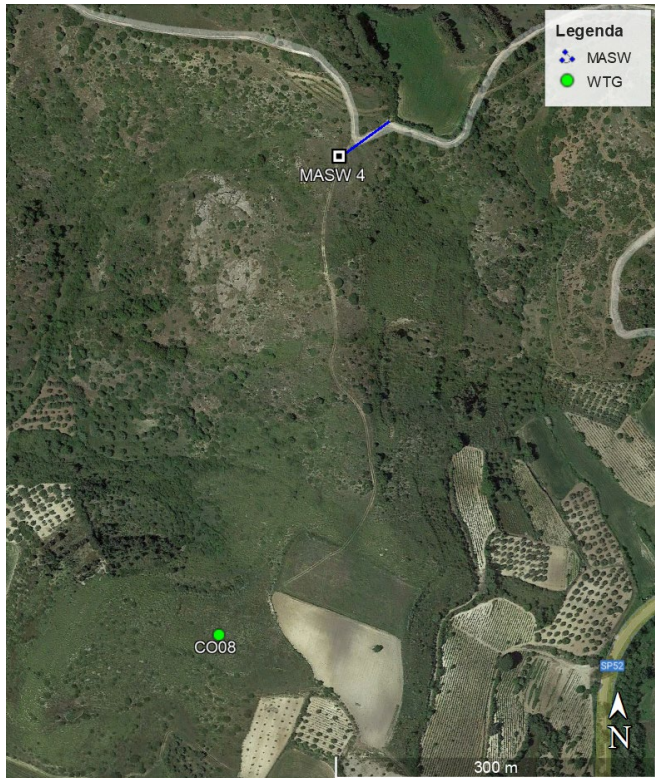
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 9.00 | 9.00 | 630 | 0.38 |
| 20.00 | 11.00 | 1039 | 0.38 |
| inf. | inf. | 1700 | 0.42 |

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=975\text{m/s}$



$V_{s_eq}(0.0-30.0)=975\text{ m/s} = \text{Categoria A}$

3.4.1.3 H/v 4 Masw 4



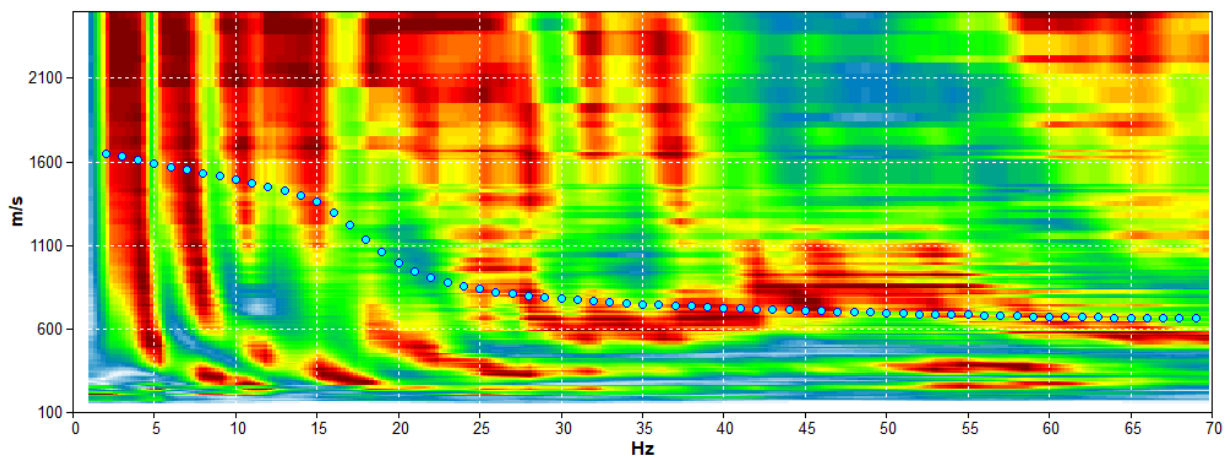
Ubicazione prova

Start recording: 14/04/2023 08:19:00
End recording: 14/04/2023 08:39:00
Trace length: 0h00'02".
Sampling rate: 512 Hz

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

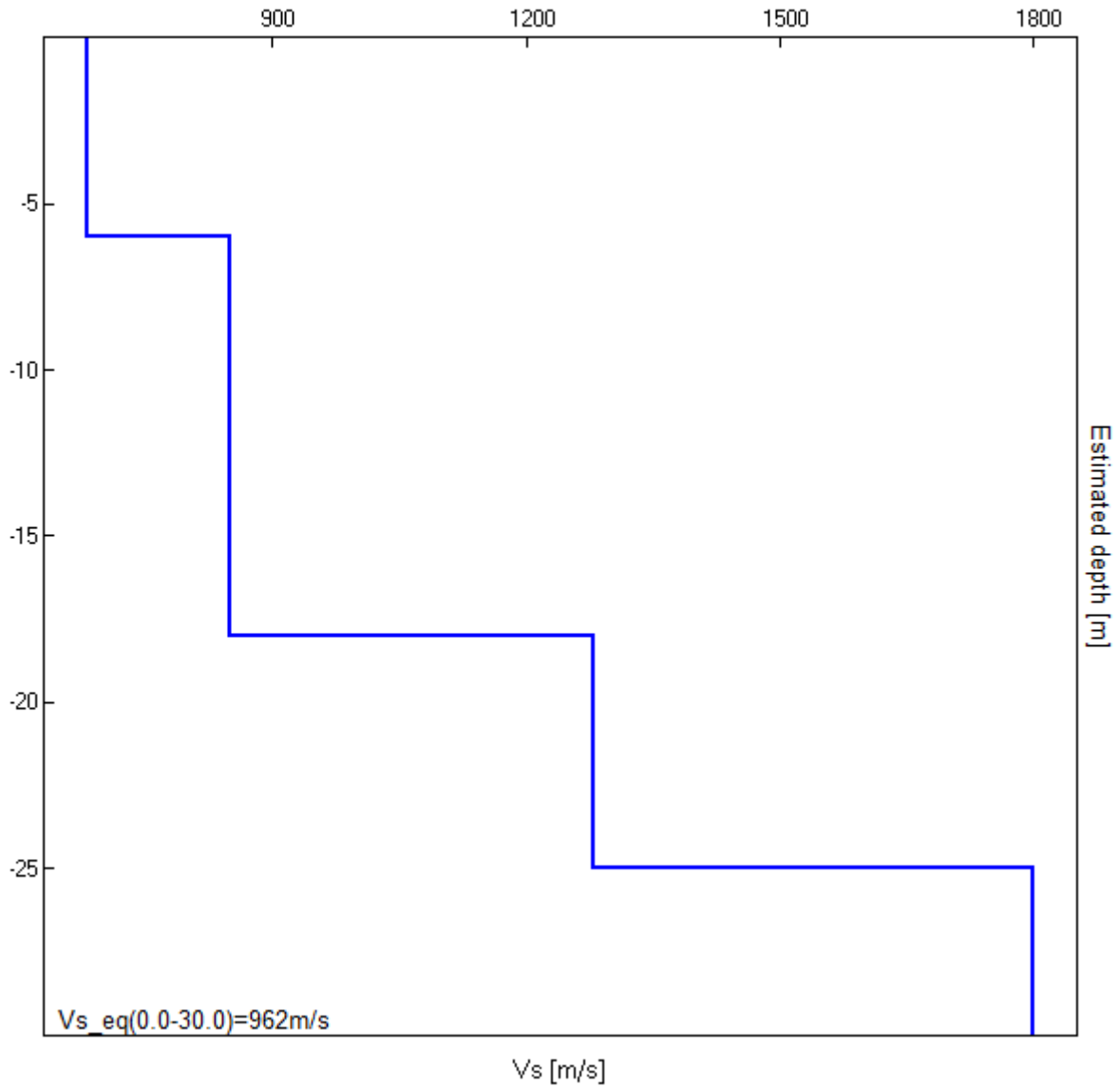
Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 36.0 39.0 42.0 45.0 m.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 6.00 | 6.00 | 680 | 0.38 |
| 18.00 | 12.00 | 850 | 0.38 |
| 25.00 | 7.00 | 1280 | 0.38 |
| inf. | inf. | 1800 | 0.38 |

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=962\text{m/s}$



$V_{s_eq}(0.0-30.0)= 962 \text{ m/s} = \text{Categoria A}$

3.5 Risultati finali

| MASW | Categoria | m/s |
|------|-----------|-----|
| 1 | B | 686 |
| 2 | A | 986 |
| 3 | A | 975 |
| 4 | A | 962 |

4 PROVA PENETROMETRICA

4.1 Premessa

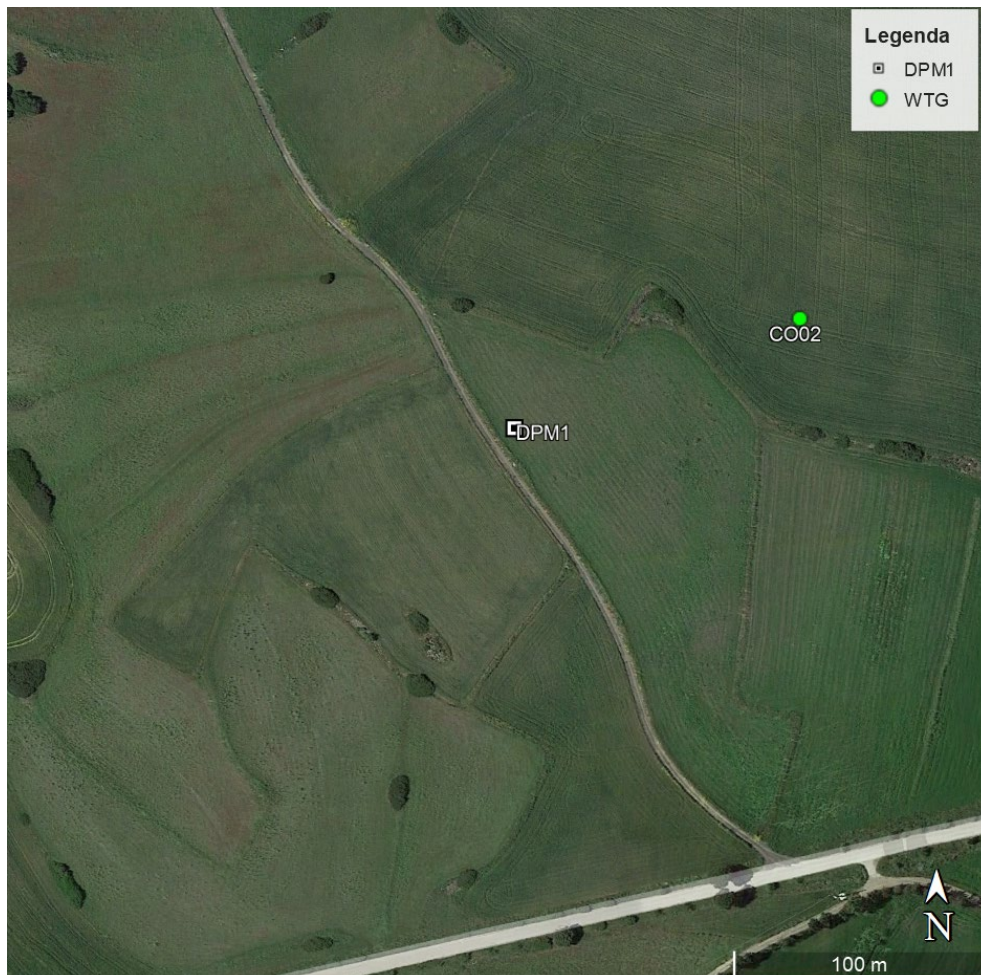
Le Prove Penetrometriche Dinamiche sono molto diffuse ed utilizzate nel territorio da geologi e geotecnici, data la loro semplicità esecutiva, economicità e rapidità di esecuzione.

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di catalogare e parametrizzare” il suolo attraversato con un’immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette inoltre di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la quota di eventuali falde e superfici di rottura sui pendii, e la consistenza in generale del terreno.

L’utilizzo dei dati, ricavati da correlazioni indirette e facendo riferimento a vari autori, dovrà comunque essere trattato con le opportune cautele.

Infatti una netta distinzione tra parametri drenati o non drenati è spesso di difficile applicazione, in quanto il tipo di prova non permette l’individuazione della litologia dei terreni attraversati. E’ possibile però avere una classificazione dello stato di consistenza dei terreni incoerenti e coesivi attraversati ed una indicazione della profondità dei livelli maggiormente addensati o del substrato roccioso.



Ubicazione prova

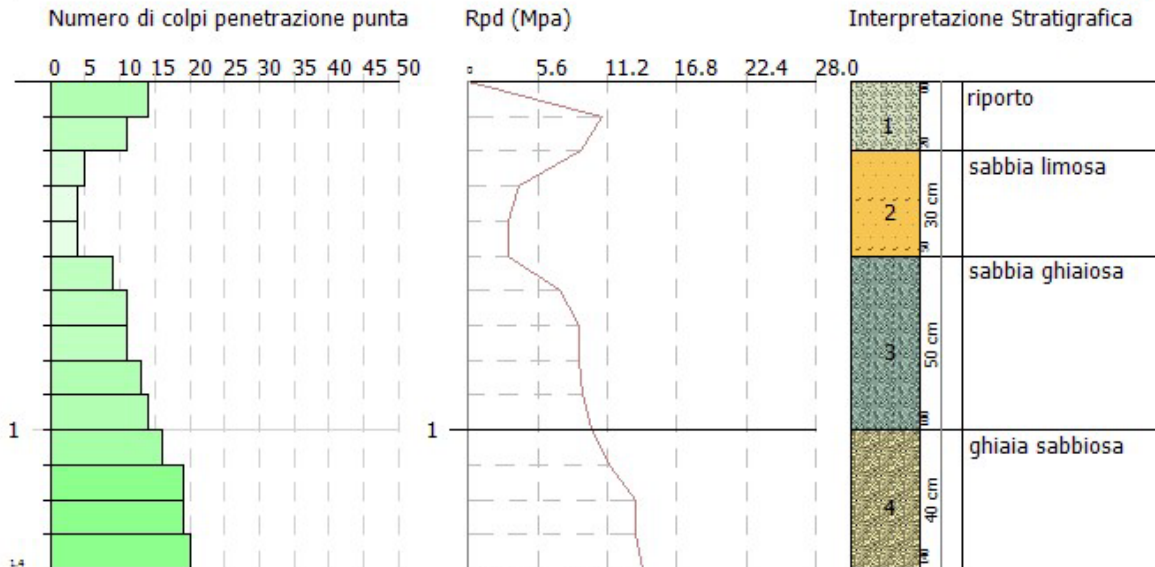
3

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.1
Strumento utilizzato... GeoDeepDrill DM30 50 cm

Committente:
Descrizione:
Localita':

19/04/2023

Scala 1:20



4Grafico prova

4.2 Elaborazione statistica delle prove

I risultati ottenuti dalle prove penetrometriche hanno permesso di suddividere ogni verticale penetrometrica in differenti litozone aventi uniformi caratteristiche geotecniche. Tali interpretazioni sono state estrapolate, assieme alle caratteristiche di portanza derivate dal metodo degli Olandesi, per ogni verticale penetrometrica e sono presenti nel capitolo contenete tutte le prove.

Dpm-1

| litozona | prof. (m) | Nspt | Tipo | Gamma (t/m ³) | Gamma sat (t/m ³) | Fi (°) | Cu (Kg/cm ²) | classificazione AGI |
|----------|--------------|-------|------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 0.2 | 13.53 | Incoerente | 14.92 | 19.09 | 33.72 | 0 | MODERATAMENTE ADDENSATO |
| 2 | 0.5 | 4.69 | Incoerente | 13.81 | 18.41 | 29.45 | 0 | POCO ADDENSATO |
| 3 | 1 | 12.55 | Incoerente | 14.8 | 19.02 | 33.26 | 0 | MODERATAMENTE ADDENSATO |
| 4 | 1.4 | 20.02 | Incoerente | 15.65 | 19.55 | 36.7 | 0 | MODERATAMENTE ADDENSATO |

4.3 Elaborazione probabilistica e calcolo valori caratteristici dei terreni

I valori ottenuti dalla verticale penetrometrica DPM-11 sono stati elaborati tramite software dedicato (Geostru dinamico), per ottenere i parametri geotecnici caratteristici dell'area dove dovrà essere realizzata la sottostazione secondo un approccio probabilistico, considerando quindi le quantità statistiche ricavate su un opportuno campione di prove.

Con l'introduzione del concetto di stato limite è stato sviluppato parallelamente anche quello di valore caratteristico.

L'Eurocodice 7, riguardante la progettazione geotecnica, introduce per la prima volta i valori caratteristici dei parametri geotecnici e attualmente le Norme Tecniche per le costruzioni (D.M. 17.01.2018) adottano tale concetto.

Il valore caratteristico, inteso come una stima cautelativa del parametro che influenza l'insorgere dello stato limite in considerazione, dovrà essere utilizzato in qualsiasi tipo di verifica geotecnica: le opere dovranno essere verificate per gli stati limite ultimi che possono presentarsi, in conseguenza alle diverse combinazioni delle azioni, e per gli stati limite di esercizio definiti in relazione alle prestazioni attese.

Nelle NTC 2018 lo stato limite viene definito come "la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze elencate nella presente norma".

Si parla di Stato limite ultimo quando lo stato limite è associato al valore estremo della capacità portante della struttura, il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile e si definisce collasso. Si parla invece di Stato limite di esercizio quando è legato al raggiungimento di un particolare stato dell'opera che pur non generando il collasso compromette aspetti funzionali importanti che limitano le prestazioni in condizione d'esercizio.

Definire il valore caratteristico significa pertanto scegliere il parametro geotecnico che influenza il comportamento del terreno in quel determinato stato limite, ed adottarne un valore, o stima, a favore della sicurezza.

Ai valori caratteristici trovati si applicano dei coefficienti di sicurezza parziali in funzione dello stato limite considerato.

I risultati dell'analisi sono riportati nel paragrafo che segue.

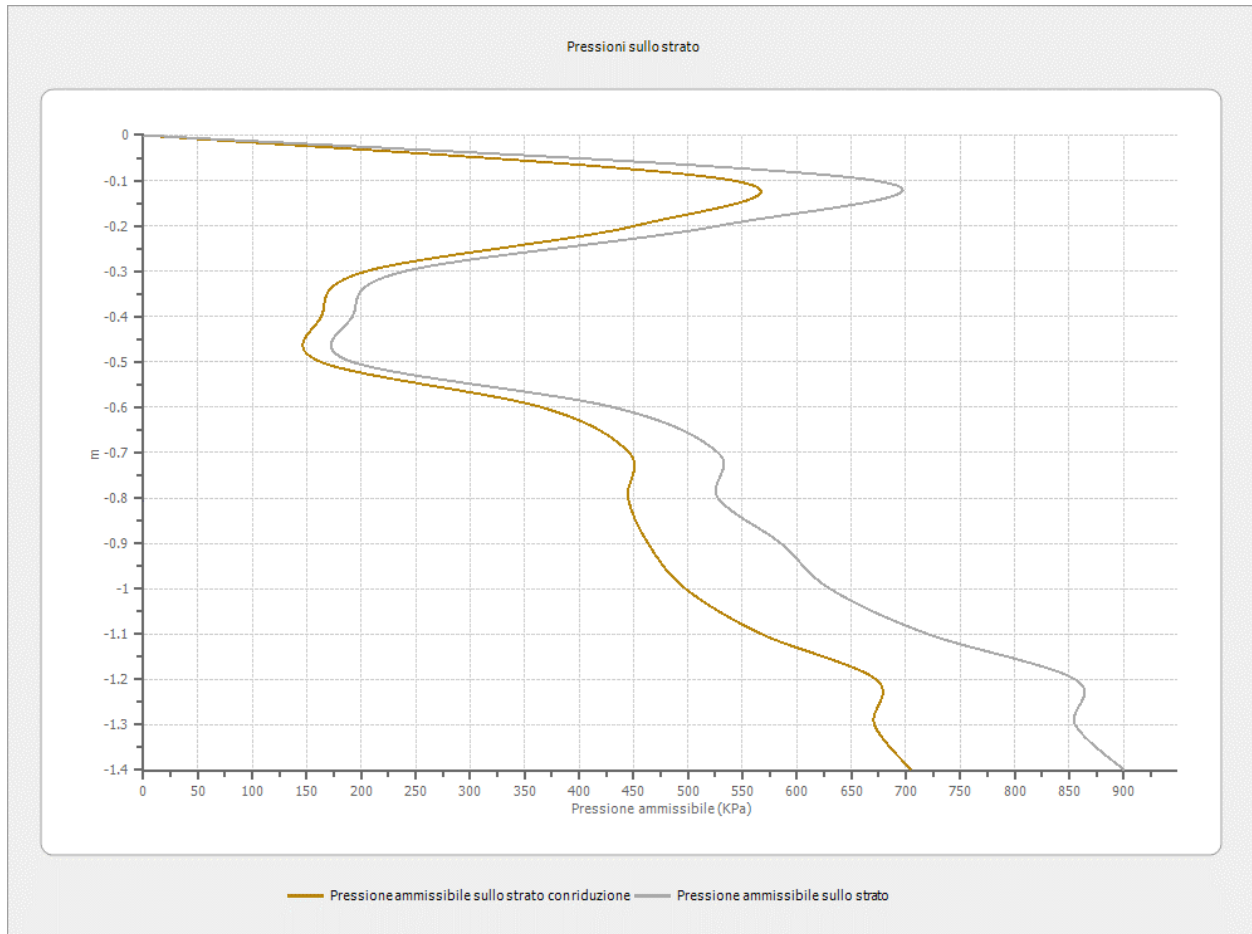
| | |
|----------------------------|-------------------|
| Nome | Dpm-1 |
| Tipo di prova | Dinamica continua |
| Profondità prova[m] | 1.40 |
| Falda | Non presente |
| Categoria del suolo | B |
| Note | |

Risultati elaborazione

| | Angolo di resistenza al taglio [°] | Coesione drenata [kN/mq] | Coesione non drenata [kN/mq] | Densità relativa [%] | Modulo di compressibilità edometrica [kN/mq] | Modulo di Young [kN/mq] | N spt [n.] | Peso di volume naturale [kN/mc] | Peso di volume saturo [kN/mc] | Modulo di Poisson [-] |
|-----------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|--|-------------------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| riporto | 31.94 | -- | -- | 76.89 | 4656.84 | 12133.09 | 9.74 | 14.47 | 18.81 | 0.31 |
| sabbia limosa | 28.95 | -- | -- | 45.73 | 3431.50 | -- | 3.66 | 13.67 | 18.32 | 0.34 |
| sabbia ghiaiosa | 31.62 | -- | -- | 72.29 | 4522.74 | 12543.17 | 9.08 | 14.38 | 18.76 | 0.32 |
| ghiaia sabbiosa | 35.54 | -- | -- | 92.44 | 6212.48 | 15657.50 | 16.93 | 15.31 | 19.34 | 0.30 |

4.1 Formula degli olandesi

Come stima diretta della portanza dei terreni superficiali, desunta dalle prove penetrometriche è stata adottata la correlazione proposta da da Herminier (formula degli Olandesi), che fornisce un valore di portanza su strato ammissibile generalmente cautelativa.



Portanza su strato (formula degli Olandesi FS mediamente pari a 4)

La Formula degli Olandesi non permette di correlare la portanza alle caratteristiche geometriche della fondazione, e in particolare al parametro D (profondità di posa della fondazione). Va quindi usata con molta prudenza e solo per prime stime. La portanza ricavata fornisce direttamente la portanza ammissibile.

Si evidenzia come la portanza non risulti inferiore a $1,5 \text{ Kg/cm}^2$ lungo il tratto indagato e raggiunge valori superiori ai 6 Kg/cm^2