

Dott. Geologo BERTOLDI ANDREA

Via Sara 287
16039 Sestri Levante, GE
Tel. 3282952472 e-mail: geo.bertoldi@gmail.com

P.IVA: 02023990993
C.F.: BRTNDR84A27C621A

ISCRITTO ALL'ORDINE DEI
GEOLOGI DELLA LIGURIA
CON IL N° AP 623

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

PARCO EOLICO "VENTO DI TORNOLO"

Località: COMUNE DI TORNOLO,
Provincia di Parma
Località Monte Foppo

Committente: Gea Energie S.r.l.

Geologo Andrea Bertoldi



Sestri Levante, 17 Settembre 2020

INDICE

1) INTRODUZIONE	3
2) GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	4
3) IDROGEOLOGIA	4
4) INDAGINI	5
4.1) RILEVAMENTO GEOMECCANICO	5
4.2) PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE	7
4.3) INDAGINI SISMICHE	9
4.4) CARATTERISTICHE GEOTECNICHE PRELIMINARI DEI TERRENI	21
5) SISMICITA' DEL SITO	23
8) CONCLUSIONI	27

Allegati:

- ◆ Corografia;
- ◆ Estratti cartografici del PTCP;
- ◆ Carta geologico-geomorfologica di dettaglio, scala 1:2000;
- ◆ Carta geologico-geomorfologica di dettaglio cabina elettrica, scala 1:800;
- ◆ Sezioni geologiche piazzole, scala 1:400
- ◆ Sezioni geologiche tracciato, scala 1:200;
- ◆ Sezione geologica cabina elettrica, scala 1:400;
- ◆ Istogrammi penetrometrici;

1) INTRODUZIONE

Su incarico della Società Gea Energie S.r.l. si redige la presente Relazione Geologica di Fattibilità in merito al progetto di installazione di due turbine eoliche e relativo tracciato stradale di accesso e servizio, nonché la realizzazione di una cabina primaria per la gestione delle connessioni elettriche, il tutto sito in Località Monte Foppo nel Comune di Tornolo, Provincia di Parma.

L'indagine, è stata condotta in conformità con le nuove Norme Tecniche Costruzioni NTC 2018, in vigore dal 22 marzo 2018; per quanto riguarda il P.T.C.P. della Provincia di Parma, in particolare sulla Carta del Dissesto, l'intervento a progetto lambisce, ma non le interessa, due zone censite a frana attiva. L'area interessata dall'installazione della cabina primaria è censita a pericolosità geomorfologica moderata, facente riferimento all'Art. 22 bis delle Norme di Attuazione.

Nell'area non sono presenti rii appartenenti ai Bacini Idrografici Principali.

In questa fase di indagine, ai fini dell'ottenimento delle autorizzazioni necessarie da parte degli enti preposti, le indicazioni riportate nel presente studio sono scaturite dalla sintesi delle seguenti indagini:

- dettagliato rilevamento di campagna relativo anche alla zona circostante e mirante a determinare tutti i parametri necessari alla caratterizzazione geologica e strutturale del sito;
- definizione e verifica della stratigrafia locale sugli affioramenti e/o fronti di sbancamento più prossimi;
- esecuzione di n. 1 stesa sismica con interpretazione MASW;
- esecuzione di n. 2 analisi di microtremore con tecnica Nakamura;
- esecuzione di n. 3 prove penetrometriche dinamiche per la definizione degli spessori e delle caratteristiche dei terreni di copertura;
- acquisizione di tutti i parametri fisici dei terreni presenti mediante ricerca sulla più recente letteratura tecnica-specifica o desumibili da analoghi studi eseguiti in zona.

2) GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

L'area in cui è prevista l'installazione dei due aerogeneratori è situata sul crinale spartiacque tra Liguria ed Emilia Romagna, ad una quota compresa tra i 1125 m s.l.m. e i 1180 m s.l.m. il versante Emiliano degrada con pendenza media verso Nord-Est, interessato da zone boscate alternate a zone adibite a pascolo, la morfologia è caratterizzata da colline poco acclivi intervallate da leggere incisioni costituenti il reticolo idrografico superficiale; nell'area oggetto di studio non sono state individuate zone affette da problematiche di natura geologica. Lungo i versanti non si sono osservati indicatori cinematici di scivolamento e gli alberi ad alto fusto presenti mantengono la verticalità.

Per quanto concerne la zona in cui è prevista l'installazione della cabina primaria, l'area è caratterizzata da un repentino cambio di pendenza in corrispondenza del tracciato stradale esistente, la morfologia è riconducibile ad un accumulo gravitativo detritico di versante. Non si sono osservati indicatori di movimento del terreno.

Nell'area oggetto di studio il substrato roccioso affiora diffusamente, spesso nella sua porzione più alterata, in quanto appartenente alle Argille e Calcari di Canetolo, costituite da peliti grigio nere non carbonatiche in strati medi e spessi, alternate a calcilutiti grigie in strati medio-sottili e calcari marnosi in strati spessi e molto spessi. Intercalazioni di arenarie e siltiti in strati gradati medio-sottili.

I litotipi suddetti si presentano in affioramento mostrando un marcato grado di fratturazione e alterazione superficiale presentando una giacitura d'immersione variabile, a causa di fenomeni plicativi, da Nord-Est a Sud-Ovest con inclinazione medio-bassa, osservabile principalmente sui livelli di argillite e arenaria.

Laddove il substrato roccioso non affiora è ricoperto da una coltre d'alterazione eluvio-colluviale di spessore variabile da 2 a 4 metri circa, in corrispondenza dei punti in cui sono state eseguite le prove penetrometriche.

3) IDROGEOLOGIA

SCORRIMENTO SUPERFICIALE

L'area in cui è previsto l'intervento a progetto è situata sul crinale del versante, pertanto gli apporti idrici superficiali risultano di scarsa entità. Sul versante Emiliano sono presenti due impluvi che raccolgono le acque provenienti dai versanti adiacenti e le convogliano verso nord, andando a costituire il reticolo idrografico del bacino del Fiume Taro.

DEFUSSO SOTTERRANEO

Nelle verticali indagate tramite l'esecuzione delle prove penetrometriche non è stato rilevato un livello di falda, le aste infatti, una volta estratte, risultavano asciutte.

Per quanto concerne le caratteristiche idrogeologiche dei litotipi presenti nella zona, possiamo distinguere i seguenti comportamenti in base alla diversa permeabilità:

Argille e Calcari di Canetolo - sono impermeabili in condizioni di integrità, limitatamente permeabili per fratturazione e fessurazione in quanto il materiale d'alterazione di natura argillosa s'infiltra nelle fratture e tende a sigillarle.

Coltri detritiche eluvio-colluviali - permeabili per porosità: sono costituite da materiale terroso detritico di copertura con permeabilità proporzionale alla frazione di materiale lapideo presente e crescente con essa.

4) INDAGINI

4.1) RILEVAMENTO GEOMECCANICO

All'interno dell'area oggetto d'intervento è stato effettuato un rilievo geostrutturale sugli affioramenti presenti, la cui collocazione planimetrica è riportata nella tavola geologica e geomorfologica di dettaglio riportata in allegato, al fine di valutare le caratteristiche strutturali e qualitative del substrato roccioso.

Sono state individuate tre famiglie di superfici di discontinuità compressive della stratificazione; e si è inoltre constatata la presenza di un certo numero di fratture indipendenti.

Vengono riportate di seguito le giaciture delle famiglie di giunti per le stazioni geomeccaniche indagate, la cui ubicazione è riportata in allegato.

G 1	Dir. Imm	Incl
Strat.	190°	40°
Set 1	305°	65°
Set 2	30°	35°



L'affioramento G1 interessa una bancata di arenaria presente lungo il crinale

G 2	Dir. Imm	Incl
Strat.	35°	20°
Set 1	285°	40°
Set 2	185°	85°



L'affioramento G2 interessa una porzione di argillite.



Si può notare che immediatamente al di sotto della ridotta copertura detritica superficiale è presente la porzione più alterata del substrato roccioso, costituita da scaglie di argillite.

4.2) PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

In questa fase di indagine sono state eseguite n. 3 prove penetrometriche per definire gli spessori delle coltri di copertura ed i loro parametri geotecnici.

Le prove 1 e 2 sono state condotte con strumentazione medio-leggera (TECNOTEST) dotata di maglio da 30 Kg con volata da 20 cm, mentre la prova 3 è stata eseguita con maglio da 10 kg e volata da 50 cm.

Al termine di tutte le prove, le aste, una volta estratte, sono risultate asciutte.

Vengono di seguito commentate le singole prove, mentre l'ubicazione è riportata in allegato.

Prova 1



La prova 1 ha raggiunto la profondità di 1,60 metri sino al rifiuto strumentale all'avanzamento, presumibilmente per il raggiungimento del substrato roccioso o comunque della sua porzione più alterata, può essere così schematizzata:

-da p.c. a 1,0 metri: terreno eterogeneo a grana fine poco addensato;

-da 1,0 a 1,60 metri: terreno di alterazione del substrato roccioso.

Prova 2



La prova 2 ha raggiunto la profondità di 4,0 metri sino al rifiuto strumentale all'avanzamento, presumibilmente per aver raggiunto il substrato roccioso.

La prova può essere così schematizzata:

- da p.c. a 1,40 metri: terreno eterogeneo a grana fine poco addensato;
- da 1,40 a 3,80 metri: terreno eterogeneo a grana grossa mediamente addensato;
- da 3,80 a 4 metri: terreno di alterazione del substrato roccioso;

Prova 3



La prova 3 è stata eseguita in corrispondenza dell'area in cui verrà realizzata la cabina elettrica primaria, necessaria per le connessioni elettriche tra le turbine e la rete di distribuzione. L'indagine ha raggiunto la profondità di 3,60 metri dal p.c. sino al rifiuto strumentale all'avanzamento, probabilmente per il raggiungimento della porzione più alterata del substrato roccioso

4.3) INDAGINI SISMICHE

E' stata eseguita una stesa sismica a rifrazione e due acquisizioni di microtremore con tecnica Nakamura. Le indagini sono di seguito commentate.

Metodo MASW

Il metodo MASW (Park et al., 1999) è una tecnica d'indagine non invasiva che permette di definire il profilo di velocità delle onde di taglio a partire da registrazioni di onde superficiali ottenute mediante l'impiego di più geofoni posti sulla superficie del terreno. Specificamente, tale tecnica consiste nell'analizzare la dispersione delle onde di Rayleigh, le quali viaggiano con una velocità dipendente dalla rigidità dei livelli di terreno interessati dalla propagazione delle onde stesse. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive nel senso che componenti del segnale a frequenza (lunghezza d'onda) differente si propagano a diversa velocità in funzione delle caratteristiche del mezzo attraversato. In altri termini, la velocità di fase (o di gruppo) delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. Componenti ad alta frequenza (breve lunghezza d'onda), più lente, permettono d'investigare gli strati più superficiali mentre quelle a bassa

frequenza (lunghezza d'onda maggiore), generalmente con velocità di propagazione maggiore, forniscono informazioni sugli strati più profondi.

In questo studio è stata effettuata un'indagine MASW di tipo attivo, sufficiente ad investigare gli strati di terreno più superficiali. Analogamente ad un'indagine sismica a rifrazione, la MASW necessita della generazione e successiva acquisizione di onde sismiche longitudinali. Più precisamente, la procedura per indagini MASW consiste in tre fasi:

- 1) Acquisizione del dato mediante l'impiego di un acquisitore multi-canale
- 2) Analisi della dispersione delle onde superficiali (definizione della curva di dispersione sperimentale)
- 3) Processo d'inversione per la determinazione del profilo di velocità a partire dalla curva di dispersione sperimentale

La profondità d'indagine (Z_{max}) varia in funzione della rigidità del suolo, della lunghezza della stesa e dell'energizzatore impiegato. Una stima approssimativa di Z_{max} può essere ottenuta come:

$$Z_{max} = \frac{D}{m} \quad (1)$$

dove D indica la lunghezza della linea sismica e m varia tra 2 e 3.

Le prime due fasi sono descritte nei paragrafi successivi; la terza sarà descritta al termine del report dal momento che si eseguirà un'inversione congiunta prendendo in considerazione anche le risultanze della misura di microtremore.

Acquisizione del segnale sismico

Per l'acquisizione del segnale sismico della stesa è stata installata una linea di 24 ricevitori con distanza inter-geofonica di 1,5m per una lunghezza complessiva di 34,5m (uno schema di acquisizione generico è mostrato in Figura 1). Nel dettaglio, la strumentazione impiegata consiste in:

- un sistema di energizzazione costituito da una mazza del peso di 8kg battente verticalmente su una piastra circolare d'acciaio del diametro di 20cm posta sul piano campagna (p.c.)
 - un sistema di ricezione costituito da 24 geofoni verticali Oyo Geospace SNG 11D/PC-21 con frequenza naturale pari a 4.5Hz ed un opportuno cavo di collegamento per la trasmissione del segnale all'apparato di acquisizione
 - un sistema di acquisizione costituito da un acquisitore Geode (Geometrics Inc.), le cui caratteristiche tecniche sono specificate in Tabella 1, ed un Personal Computer, dotato di un opportuno software di acquisizione (Geometrics SeisModule Controller v. 9.09.0.0) per l'immagazzinamento del flusso di dati
- Caratteristiche tecniche dell'apparato di acquisizione Geode (Geometrics Inc.).

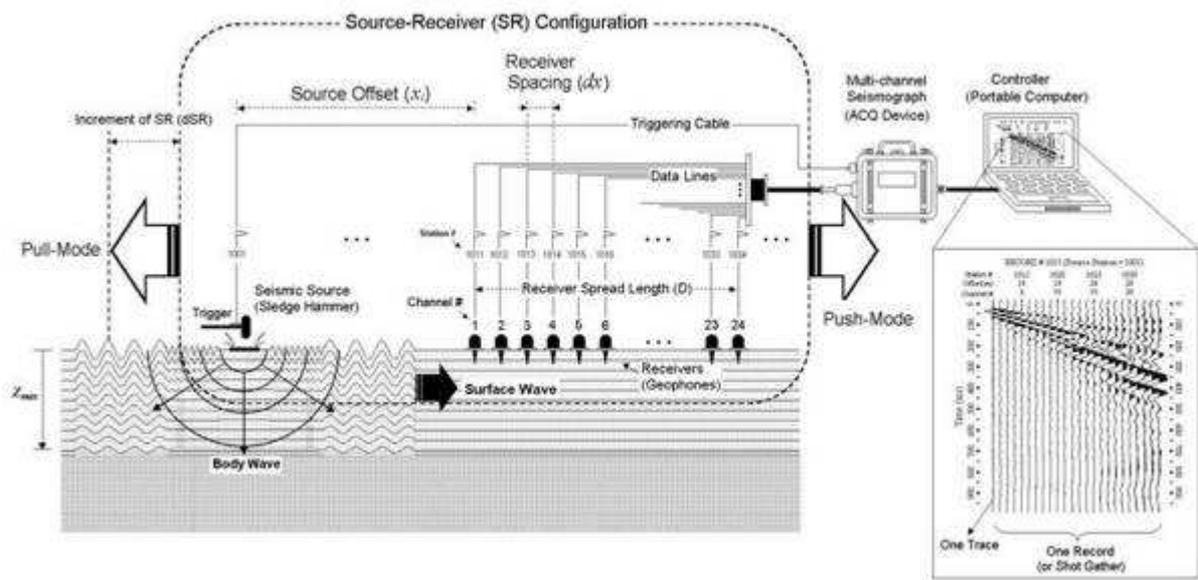


Figura 1



Figura 2 Profilo sismico e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P.

Caratteristiche tecniche GEODE	
A/D Conversion	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
Dynamic Range	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2 ms, 24 dB
Distortion	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
Bandwidth	1.75 Hz to 20 kHz. Low corner frequency option available
Common Mode Rejection	> 100dB at <= 100 Hz, 36 dB
Crosstalk	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
Noise Floor	0.20 uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
Sample Interval	0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
Stacking Trigger Accuracy	1/32 of sample interval
Maximum Input Signal	2.8V PP at 0dB
Input Impedance	20 kOhm, 0.02 uF
Pre-trigger Data	Up to 4,096 Samples
Preamplifier Gains	Software selectable between 24 and 36 dB. Can be jumpered to allow selection of 12 or 24 dB or jumpered to 0
Anti-alias Filters	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
Acquisition and Display Filters	Low Cut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth. Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency. High Cut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave
Maximum Record Length	16,384 samples per channel standard, 65,536 samples per channel optional
Data Formats	SEG-2 standard with SGOS. SEG-D and SEG-Y available2
System Software	Single Geode Operating Software (SGOS): Includes full compliment of acquisition, display, plotting, filtering and storage features
Power	Requires 12V external battery. Uses 0.65W/channel during acquisition, sleep mode reduces power consumption by 70% while in standby.
Environmental	Geode: -30 to 70degrees C. Waterproof and submersible. Withstands a 1 m drop onto concrete on 6 sides and 8
Operating System	Windows 98/NT/XP/2000

Tabella 1

L'acquisizione, è stata effettuata impostando un passo di campionamento di 0.25ms per una durata complessiva del segnale pari a 1s. Il segnale è stato generato impiegando una mazza del peso di 8kg impattante su un disco metallico posto esternamente alla stesa a distanze di -12m, -2m, 36.5m e 46.5m (cioè a distanze di 12m e 2m dalle due estremità dello stendimento di ricevitori). Inoltre, sono state effettuate tre energizzazioni interne alla stesa (due a distanza di 8.25m dagli estremi e una a centro stesa), utili per l'analisi del dato secondo la tecnica della sismica a rifrazione, qui impiegata per ottenere un modello di velocità delle onde longitudinali VP a supporto del processo d'inversione numerica.

In considerazione dell'elevato rumore ambientale presente nell'area, per ciascuna base esterna allo stendimento (shot point), in aggiunta ad energizzazioni singole, sono state effettuate energizzazioni a battuta triplice (stacking); per le altre basi, invece, è stata sufficiente un'unica energizzazione. Il livello del rumore di fondo presente nell'area di studio, può essere apprezzato in Figura 3.

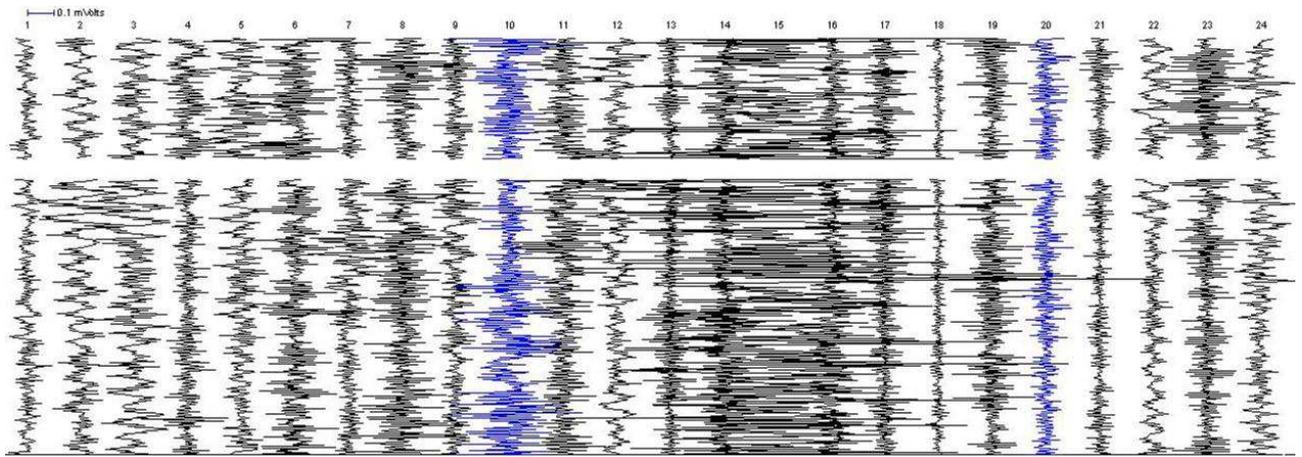


Figura 3: rumore di fondo.

Riassumendo, l'acquisizione è stata effettuata con la seguente configurazione (figura 4)

- lunghezza totale dello stendimento: 34,5m
- numero di geofoni: 24
- distanza inter-geofonica: 1,5m
- numero di basi di energizzazione per ciascun estremo: 2 a distanza di 12m e 2m rispetto al primo/ultimo geofono dello stendimento
- numero di basi di energizzazione interne alla stesa: 3, di cui una a centro stesa e 2 poste a 8.25m dagli estremi dello stendimento
- numero di energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*): 1 o 3 a seconda punto di energizzazione
- durata acquisizione: 1s
- intervallo di campionamento: 0.25ms
- numero di campioni per traccia: 4000

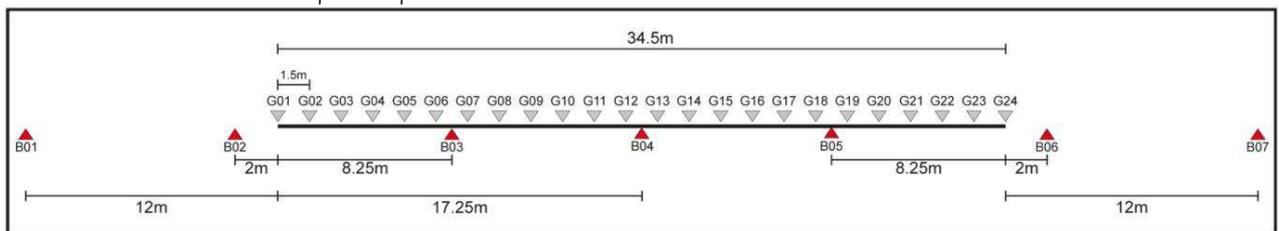


Figura 4

Analisi di dispersione delle onde superficiali

Il dato acquisito così come descritto nel paragrafo precedente è stato processato al fine di ricavare la velocità di fase apparente (o curva di dispersione) delle onde di superficie.

Innanzitutto, le registrazioni multicanale nel dominio spazio-tempo (Figura 5) sono state trasformate nel dominio frequenza (f)-velocità di fase (c) mediante l'applicazione del metodo phase-shift (Park et al., 1998).

Dal grafico f - c (Figura 6) è possibile ricavare la curva di dispersione individuando (procedura di picking), manualmente o mediante algoritmi automatici, il massimo di

coerenza del segnale (aree di colore verde-blu). Più precisamente, è possibile determinare sia la curva dispersione corrispondente al modo di vibrazione fondamentale che, eventualmente, le curve relative ai modi superiori, utili al fine di determinare la VS degli strati più profondi (es. Xia et al., 2003; Dal Moro, 2008). Nel presente studio è stata determinata la curva di dispersione relativa al modo fondamentale che è stata successivamente utilizzata nel processo d'inversione numerica per il calcolo del profilo di velocità VS.

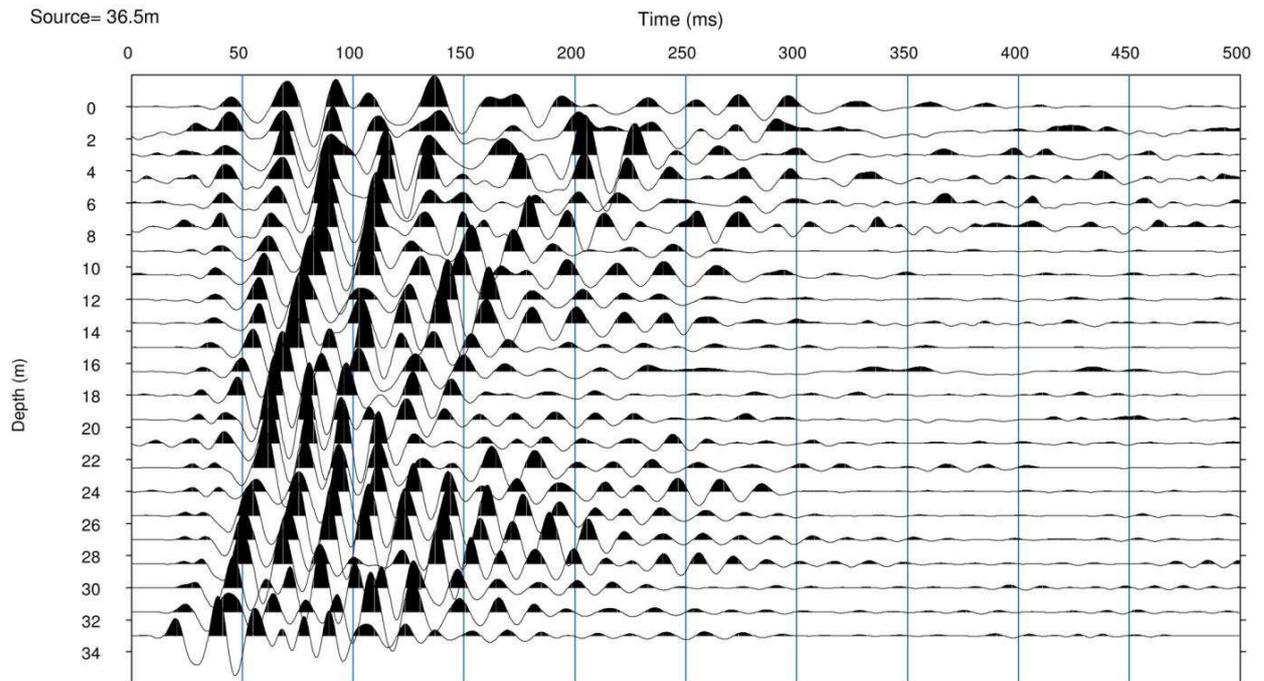


Figura 5

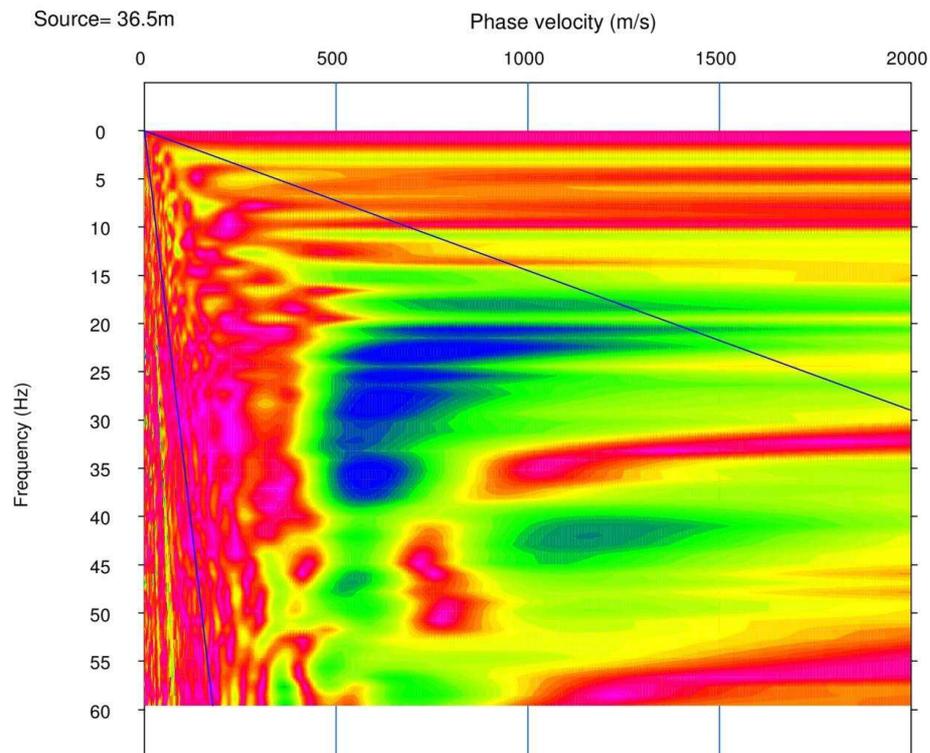


Figura 6

In figura 7 si riportano le dromocrone ottenute dall'analisi delle onde superficiali e il conseguente modello 2D della sezione tomografica (figura 8).

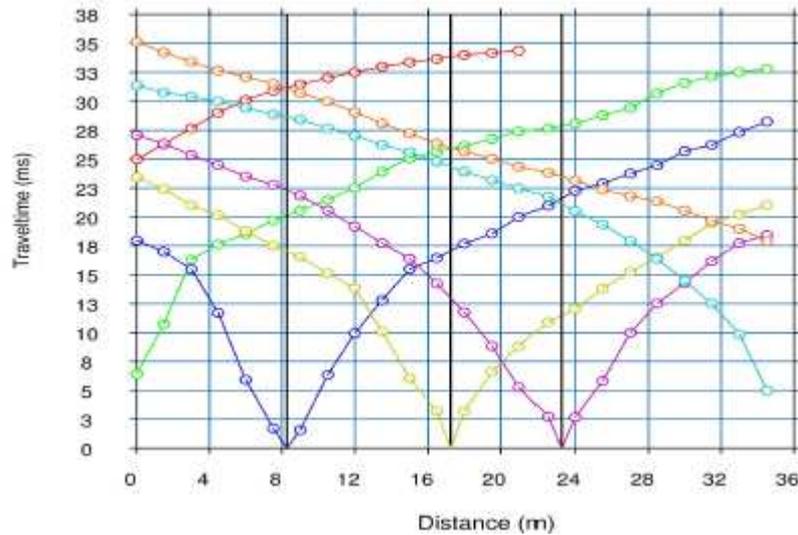


Figura 7

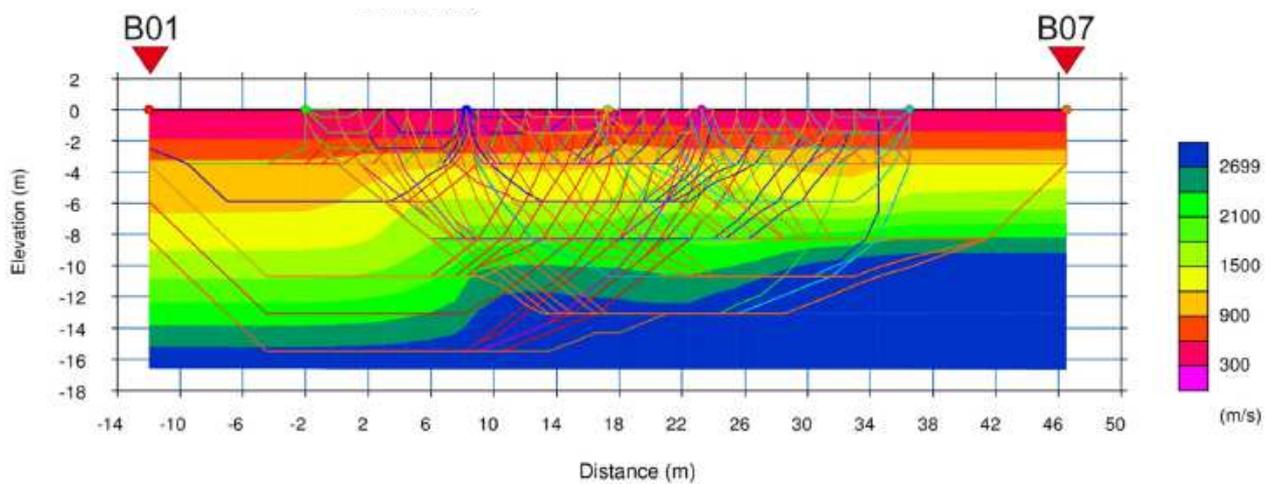


Figura 8

Metodo Nakamura

Il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) è una tra le tecniche più utilizzate per lo studio della risposta sismica di un sito. Tale metodo, ormai consolidato a livello scientifico (es. SESAME Working Group, 2004; De Ferrari et al., 2008; Castellaro & Mulargia, 2009) e professionale, consente di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno (o frequenza di risonanza), f_0 , a partire da registrazioni di microtremore. Quest'ultimo si assume sia principalmente costituito da onde sismiche superficiali, nella fattispecie onde di Rayleigh. Il contrasto d'impedenza sismica² tra gli strati di terreno superficiali ed il substrato roccioso è la causa dell'amplificazione al sito.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il metodo Nakamura è quella per cui la componente verticale del moto sia esente da effetti di amplificazione. Verificata tale ipotesi, la funzione di amplificazione è determinabile come il rapporto tra le

componenti spettrali orizzontali (H) e quella verticale (V) di una stessa registrazione in superficie. Tale funzione è propriamente indicata come curva H/V (per questo spesso si parla di tecnica HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio technique), la quale esprime la variazione dell'amplificazione del terreno in funzione della frequenza.

La frequenza fondamentale (f_0) del terreno corrisponde al primo picco di amplificazione individuabile sulla curva H/V [con ampiezza maggiore di 2 in base a quanto indicato nelle linee guida stilate nell'ambito del progetto internazionale SESAME (SESAME Working Group, 2004)]. Nel caso di terreno a comportamento lineare, il parametro f_0 può essere messo in relazione allo spessore (h) e alla velocità media di propagazione delle onde di taglio (V_s) dei terreni sovrastanti il substrato roccioso (es. Kramer, 1996):

$$f_0 = \frac{V_s}{4h}$$

Si specifica che, per definizione, la curva H/V non può considerarsi quale significativa del livello assoluto di amplificazione del sito.

Nei paragrafi successivi sono descritte le procedure di acquisizione ed elaborazione del microtremore.

Acquisizione del microtremore

L'acquisizione del rumore ambientale, per i due siti di misura (indicati come NK01 e NK02), ha previsto l'installazione di una stazione sismica velocimetrica. La strumentazione adottata è elencata di seguito e mostrata in Figura 9:

-Sismometro: Solgeo Veloget 3D, velocimetro tridirezionale di classe I per misure di vibrazioni conformi alle normative DIN4150-3, DIN45669-1, UNI9916 e UNI 9614

-Acquisitore: Solgeo Dymas24 a 6 canali e 24bit con frequenza di campionamento impostata a 200Hz.

Il *survey* ha previsto due punti di misura, uno per ogni turbina eolica, presso cui sono state effettuate due registrazioni di durata pari a circa 30 minuti.

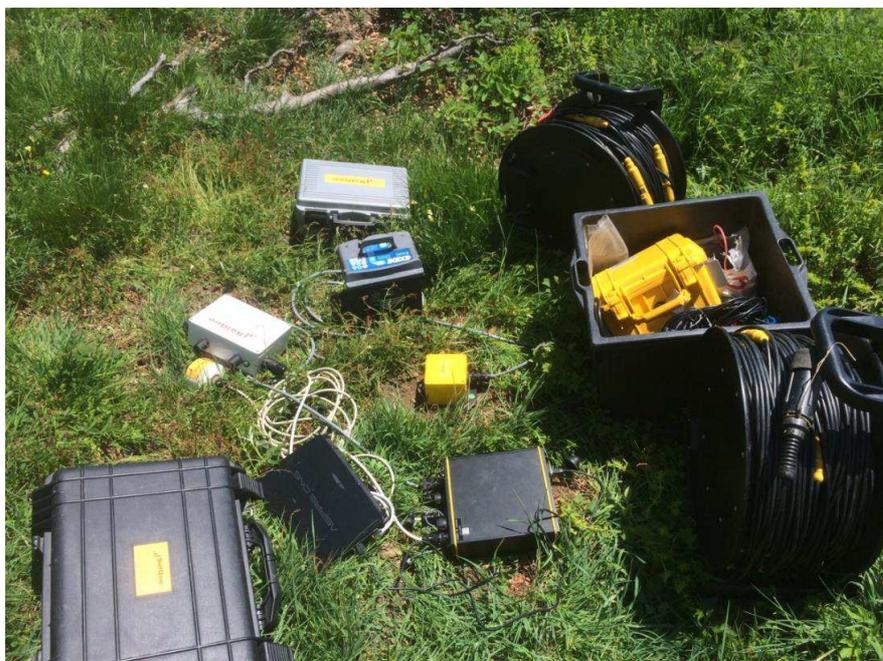


Figura 9

Elaborazione del microtremore

Come osservato precedentemente, il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) consiste nel calcolo dei rapporti degli spettri di Fourier relativi alle componenti orizzontali e verticale del segnale registrato (rapporti H/V). Per ogni sito di misura saranno quindi calcolati due rapporti spettrali (poi mediati in fase di elaborazione): uno relativo alla componente Nord-Sud (NS) rispetto a quella verticale (Z) ed uno relativo alla componente Est-Ovest (EW) sempre rispetto alla verticale (Z).

Ai fini della determinazione dei rapporti H/V è stato impiegato il *software* di elaborazione Geopsy V. 2.6.3 (<http://www.geopsy.org/>). Ciascun segnale registrato è stato suddiviso in finestre temporali della durata di 30s ciascuna. Successivamente è stata effettuata un'analisi spettrale (calcolo dello spettro di Fourier) per ciascuna finestra e, al fine di eliminare eventuali *spike* (es. variazioni improvvise del segnale dovute a rumore antropico) e facilitare così l'interpretazione dei rapporti H/V, gli spettri di Fourier sono stati "lisciati" applicando una opportuna funzione di *smoothing* (funzione Konno & Ohmachi con coefficiente di *smoothing* uguale a 20). Infine, la funzione di amplificazione è stata determinata come la media dei rapporti H/V degli spettri di Fourier relativi a ciascuna finestra di segnale.

Analisi ed interpretazione delle curve H/V

Figura 10 e 11 mostrano gli spettri di Fourier calcolati per i siti d'indagine per ciascuna componente del segnale acquisito (gli spettri relativi alle componenti NS e EW sono indicati rispettivamente dalla curva verde e dalla curva rossa mentre quello relativo alla verticale dalla curva blu). Le curve H/V (determinate come la media delle curve H/V per le due componenti NS e EW) sono presentate in Figura 12 e 13. La linea continua rappresenta la curva media mentre quelle tratteggiate delimitano la banda d'incertezza.

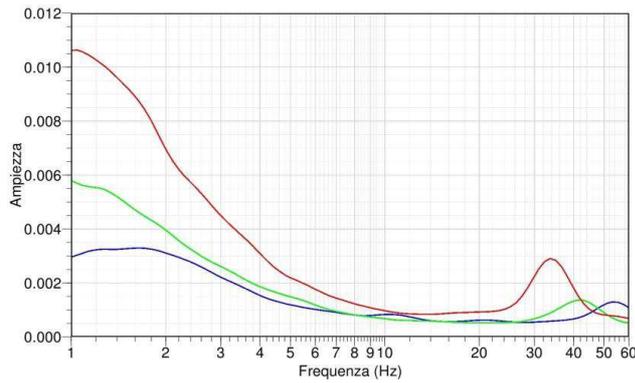


Figura 10 (NK01)

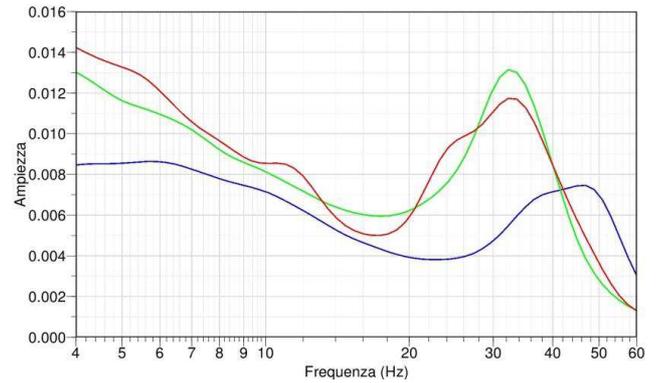


Figura 11 (NK02)

Dalle curve H/V si evince un marcato effetto di amplificazione a circa 30Hz associabile alla frequenza fondamentale dei depositi superficiali (coltre superficiale), cioè al contrasto di impedenza tra questi ed il livello argillitico sottostante.

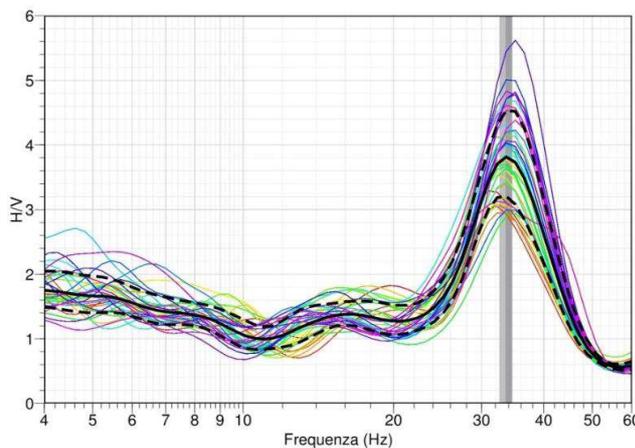


Figura 12 (NK01)

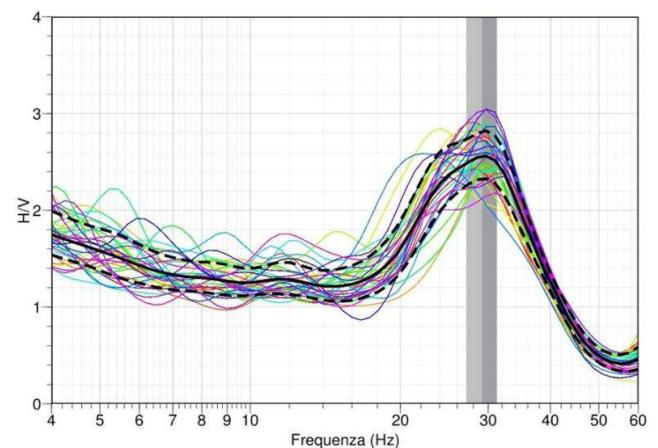


Figura 13 (NK02)

Inversione numerica e determinazione del profilo di velocità

Al fine di determinare l'andamento della velocità VS nel sottosuolo, necessario per la determinazione della categoria di sito, è stata condotta un'inversione numerica congiunta (il processo è schematizzato in Figura 14) impiegando simultaneamente quali dati di input la curva di dispersione sperimentale ed il fianco (destra) della curva H/V (NK01) in corrispondenza del massimo di amplificazione (Fäh et al., 2001). Si precisa che la curva H/V sperimentale è stata corretta di un fattore empirico pari a $\sqrt{2}$ al fine ridurre il contributo delle onde sismiche di volume e delle onde di Love (Fäh et al., 2003; Fäh et al., 2008; Fritsche and Fäh, 2009).

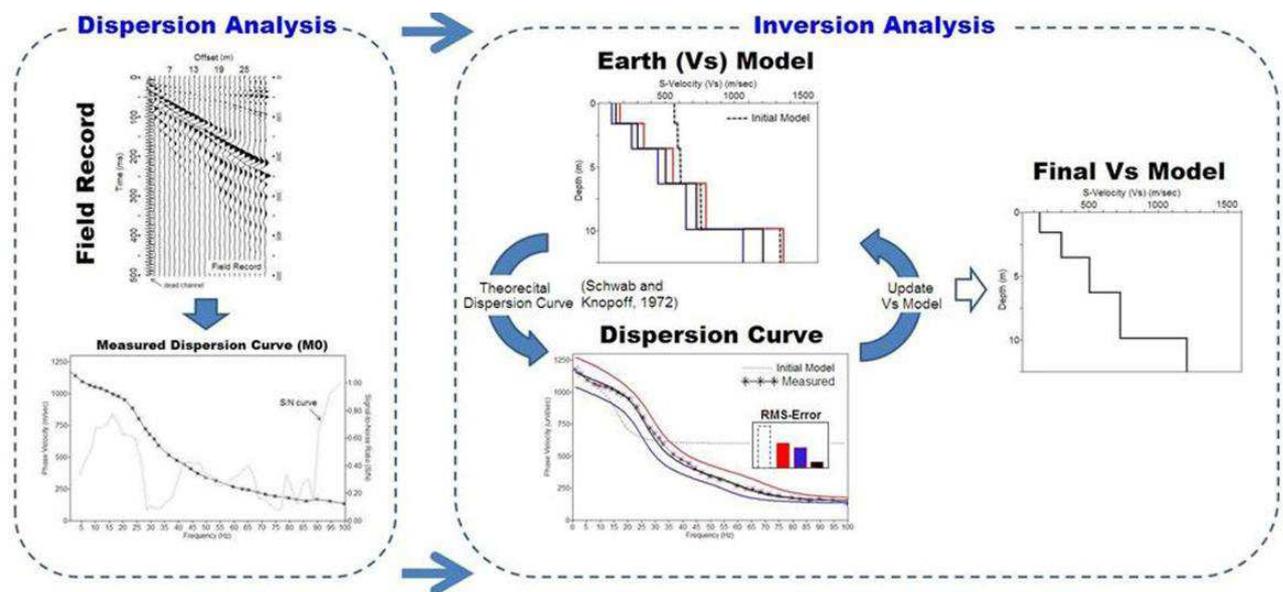
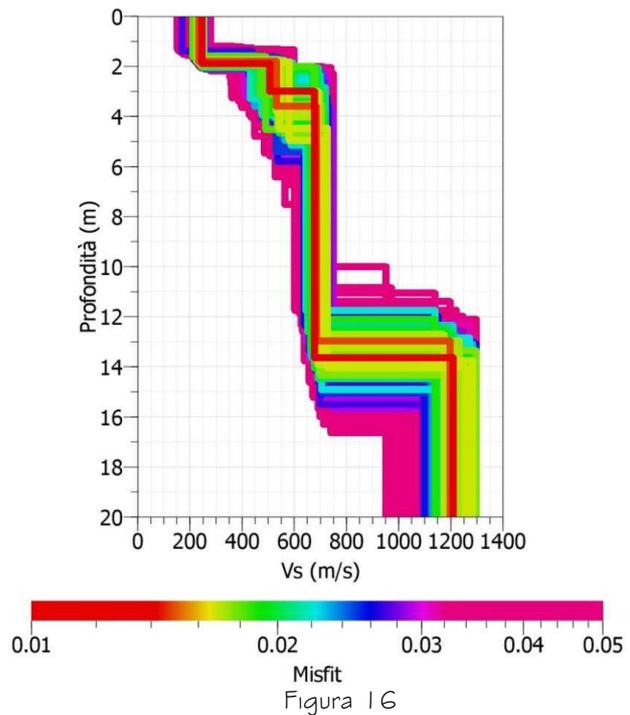
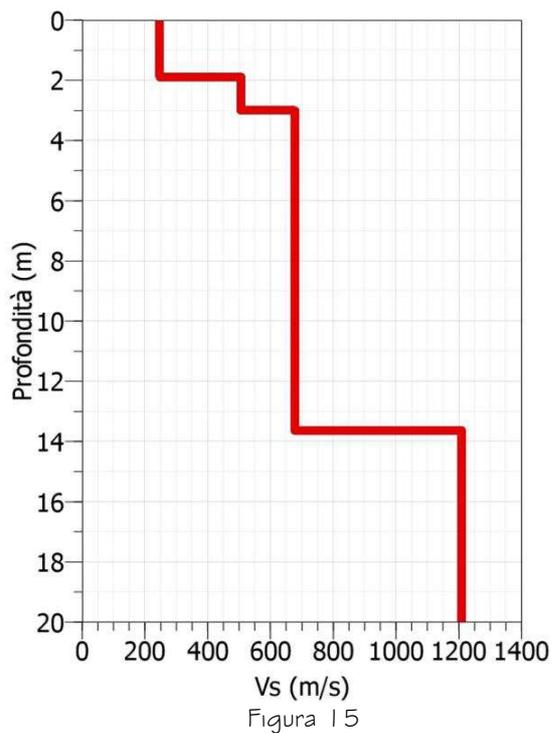


Figura 14

Per l'inversione numerica, è stato impiegato il software Dinver V. 1.3.5 del pacchetto Geopsy (<http://www.geopsy.org/>), software che sfrutta la tecnica denominata "Conditional Neighbourhood Algorithm" (Sambridge, 1999; Wathlet, 2008) per l'inversione della curva di dispersione e/o di ellitticità (assunta corrispondente alla curva H/V). Più precisamente, tale algoritmo di calcolo sfrutta un metodo stocastico finalizzato alla ricerca dei modelli parametrici del terreno (all'interno di uno spazio campionario) a cui corrisponde una minimizzazione degli scarti (*misfit*) tra le curve sperimentali e quelle numeriche. La peculiarità di questo algoritmo risiede nell'utilizzo di un campionamento "intelligente" tale da confinare la ricerca delle soluzioni in date regioni dello spazio dei parametri, scartando quelle soluzioni meno plausibili.

In termini semplici, il metodo consiste nel confrontare la curva di dispersione sperimentale (in questo caso la curva relativa al modo fondamentale M0) e/o la curva di ellitticità con quella numerica calcolata per diversi modelli del terreno (definiti da strati di dato spessore, velocità delle onde sismiche e densità). Il confronto viene effettuato per un prefissato numero di iterazioni, durante le quali si variano i valori dei parametri del modello numerico entro un *range* prefissato, fino a raggiungere un accordo ottimale (minimizzazione degli scarti) tra le curve sperimentali e quelle numeriche. In genere, quando lo scarto tra le curve è inferiore al 10% l'accordo può considerarsi soddisfacente ed il problema risolto. In questo studio, il modello numerico iniziale del terreno o, più precisamente, lo spazio campionario relativo a ciascun parametro (es. intervallo di valori di V_S per ciascun strato) è stato definito a partire dalle indicazioni stratigrafiche fornite dalla committenza e dalla sezione tomografica ottenuta dall'elaborazione delle registrazioni associate ai 7 *shot point* secondo la tecnica della tomografia sismica.

Il profilo di V_S ottenuto dall'inversione numerica è presentato in Figura 15 e Tabella 2. Va osservato che, nei limiti dell'incertezza, risultati simili sono stati ottenuti utilizzando le curve di dispersione relative alle altre basi di energizzazione.



Profondità (m)	V_s (m/s)
1.9	246.7
3.0	505.8
13.6	677.8
	1209.2

Tabella 2

Dal profilo di velocità in Figura 15 e da Tabella 2 sono evidenti due incrementi netti della velocità delle onde sismiche: uno alla profondità di circa 2m e uno a circa 14m dal piano campagna (p.c.). A queste profondità corrisponderebbero rispettivamente l'interfaccia tra i terreni superficiali ed il livello argillitico sottostante e l'interfaccia tra quest'ultimo livello ed il substrato roccioso sano, il quale è definito dalle NTC 2018 come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800m/s.

Il livello d'incertezza nei risultati, ovvero nei valori di V_s e nello spessore degli strati, può essere desunto dal fascio di profili stratigrafici in Figura 16.

A seguito dei risultati ottenuti è possibile definire un modello sismo-stratigrafico caratterizzato da un livello di coltre superficiale (di spessore pari a circa 2m) sovrapposto ad un livello argillitico di spessore pari a circa 10m, a sua volta sovrapposto al substrato roccioso sano ad una profondità di circa 14m da p.c.

4.4) CARATTERISTICHE GEOTECNICHE PRELIMINARI DEI TERRENI

Ammasso roccioso

Una stima della qualità dell'ammasso roccioso è stata compiuta effettuando un rilievo geostrutturale su stazioni geomeccaniche in corrispondenza della zona di studio.

Per stimare i parametri geotecnici dell'ammasso roccioso si è ricorsi al criterio di rottura (Edizione 2002) di Hoek-Brown.

Con questa versione della formulazione del criterio vengono fornite funzioni uniche e continue, definite in tutto il campo di valori che può assumere GSI (Geological Strength Index), per la determinazione dei parametri del criterio.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \times \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a$$

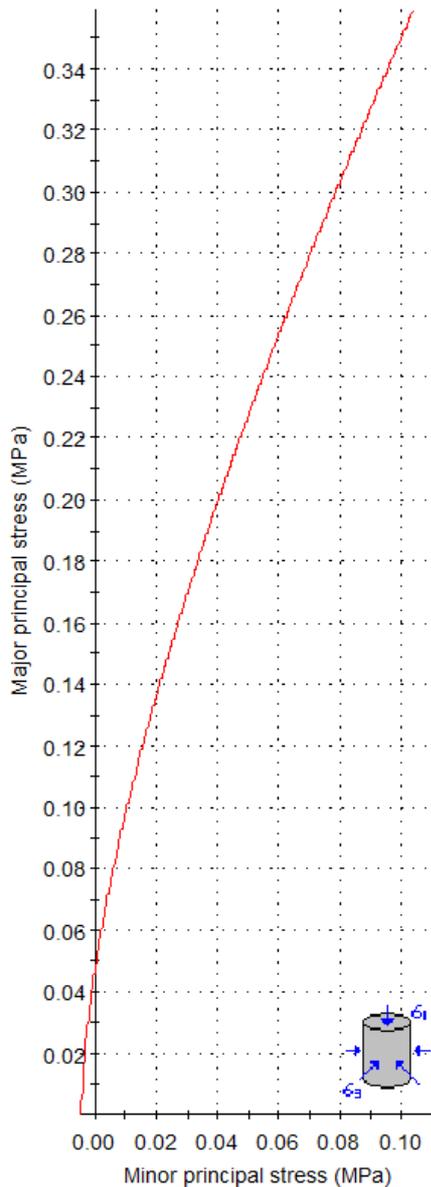
dove:

- σ_1 è lo sforzo principale massimo applicato a rottura;
- σ_3 è lo sforzo principale minimo applicato a rottura;
- σ_{ci} è la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- m_b , S e a sono coefficienti dipendenti dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso ed in particolare:

$$m_b = m_i \times e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad S = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Tale criterio di rottura, dopo l'introduzione del fattore di disturbo D che definisce i pendii come ammassi "molto disturbati", risulta adatto a descrivere il comportamento di ammassi rocciosi a matrice debole.

Per quanto riguarda i parametri geotecnici (coesione e angolo d'attrito) dell'ammasso roccioso, pur considerando il limitato grado di approfondimento di questa fase d'indagine, si rimanda al grafico seguente.



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 15 MPa
 GSI = 25 $m_i = 4$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (Ei) = 11000 MPa

Hoek-Brown Criterion

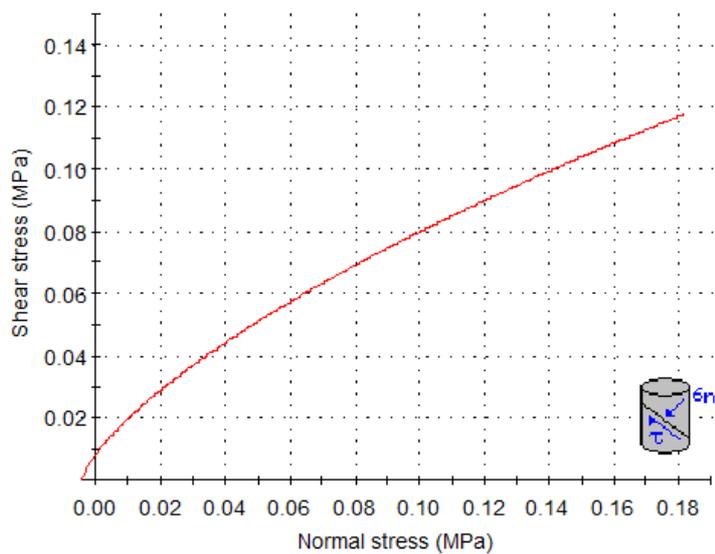
$m_b = 0.065$ $s = 1.9e-5$ $a = 0.531$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.020 MPa friction angle = 29.51 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.004 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.047 MPa
 global strength = 0.408 MPa
 deformation modulus = 332.47 MPa



Coltri di copertura detritiche

Per quanto concerne i terreni di copertura è possibile fornire una parametrizzazione geotecnica dei materiali attraversati mediante correlazioni dell'indice N_{10} della prova penetrometrica medio-leggera all'indice N_{spt} della prova Standard Penetration Test secondo la correlazione di Bruzzi e Cestari ('83), per cui si ha $N_{spt} \approx 0.75 N_{10}$. I valori di N_{spt} possono essere utilizzati per stimare l'angolo di resistenza al taglio ϕ' della coltre con correlazione diretta $N_{spt}-\phi'$ mediante le relazioni proposte da Meyerof e Peck-Hanson.

Prova I

Profondità (m)	Indice N_{10}	Valore N_{spt}	Angolo d'attrito ϕ'
0 - 1.0	6	4	$26^\circ < \phi' < 28^\circ$
1.0 - 1.60	26	19	32°

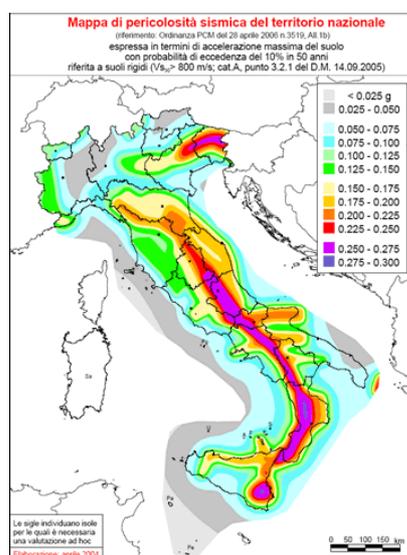
Prova 2

Profondità (m)	Indice N_{10}	Valore N_{spt}	Angolo d'attrito ϕ'
0 - 1.40	4	3	$25^\circ < \phi' < 28^\circ$
1,40 - 3.80	11	8	$28^\circ < \phi' < 30^\circ$

I valori di coesione sono da ritenersi nulli in condizioni di pressioni efficaci. Il peso di volume (γ) è approssimativamente pari a $18,5 \text{ kN/m}^3$.

5) SISMICITA' DEL SITO

Con l'entrata in vigore del DM 14/01/08, la normativa sismica italiana prevede, che l'azione sismica di riferimento, sia determinata per ogni sito sulla base delle sue coordinate, a partire dalla mappa di pericolosità sismica calcolata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.



Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

Per la definizione dell'azione sismica in superficie si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica

orizzontale (sottosuolo di categoria A).

Ad ogni categoria di suolo è associato uno spettro di risposta elastico che tiene conto, attraverso vari parametri, delle condizioni locali quali stratigrafia e topografia. Lo spettro di risposta elastico costituisce la base per la progettazione antisismica.

Il 22 marzo 2018 sono entrate in vigore le Norme Tecniche Costruzioni NTC 2018 alle quali la presente modellazione si è conformata.

- Nel caso in esame, la classe di sottosuolo di fondazione su cui è prevista l'installazione delle due turbine eoliche è stata determinata dalle indagini sismiche eseguite e descritte nel paragrafo 4.3.

In particolare le NTC 2018 prevedono che la classe di sottosuolo sia determinata in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, definita come:

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

dove h_i e $V_{S,i}$ indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato di terreno al di sopra del substrato roccioso ed H è profondità di quest'ultimo.

Per quanto concerne l'area sulla quale verranno installate le turbine eoliche è stato possibile definire, sulla base del profilo di velocità, i valori di $V_{S,eq}$ per diverse quote (rispetto al p.c.) del piano di fondazione

Quota p.f. (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)	Categoria NTC 2018
0	533.0	B
-2	658.5	B
-4	677.8	B

Come da indicazioni del Progettista, si può indicare una vita nominale V_n (numero di anni d'uso della struttura) uguale a 50, una Classe d'uso (C_u) pari a II a cui corrisponde quindi un coefficiente d'uso pari a 1.

Come periodo di riferimento per l'azione sismica si dovrà considerare:

$$V_r = V_n \times C_u = 50 \times 1 = 50 \text{ anni}$$

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica (S_s) è pari a 1,2 e il coefficiente di amplificazione topografica (S_t) è da considerarsi pari a 1,2.

Pertanto il coefficiente S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche è espresso dalla seguente relazione:

$$S = S_s \times S_t = 1,47$$

I parametri sismici dedotti per la stabilità dei pendii sono i seguenti:

Sito in esame.

latitudine: 44,426630 °
longitudine: 9,615050°
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

	ID	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Distanza [m]
Sito 1	16927	44,420160	9,570822	3585,2
Sito 2	16928	44,422450	9,640713	2090,3
Sito 3	16706	44,472390	9,637490	5391,1
Sito 4	16705	44,470100	9,567617	6127,1

Parametri sismici:

Categoria sottosuolo: B
Categoria topografica: T2
Periodo di riferimento: 50 anni
Coefficiente cu: 1

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	30	0,051	2,400	0,233
Danno (SLD)	63	50	0,067	2,439	0,246
Salvaguardia della vita (SLV)	10	475	0,181	2,439	0,274
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	975	0,235	2,443	0,278

Coefficienti sismici

	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	Kh [-]	Kv [-]	Amax [m/s ²]	Beta [-]
SLO	1,200	1,470	1,200	0,015	0,007	0,727	0,200
SLD	1,200	1,460	1,200	0,019	0,010	0,951	0,200
SLV	1,200	1,430	1,200	0,063	0,031	2,557	0,240
SLC	1,170	1,420	1,200	0,092	0,046	3,235	0,280

- Per quanto riguarda invece l'area su cui verrà installata la cabina primaria elettrica, la categoria di sottosuolo, determinata dalla prova penetrometrica, corrisponde alla categoria E (Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m).

Come da indicazioni del Progettista, si può indicare una vita nominale Vn (numero di anni d'uso della struttura) uguale a 50, una Classe d'uso (Cu) pari a II a cui corrisponde quindi un coefficiente d'uso pari a 1.

Come periodo di riferimento per l'azione sismica si dovrà considerare:

$$V_r = V_n \times C_u = 50 \times 1 = 50 \text{ anni}$$

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica (S_s) è pari a 1,2 e il coefficiente di amplificazione topografica (S_t) è da considerarsi pari a 1,2.

Pertanto il coefficiente S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche è espresso dalla seguente relazione:

$$S = S_s \times S_t = 1,47$$

I parametri sismici dedotti per la stabilità dei pendii sono i seguenti:

Sito in esame.

latitudine: 44,434116 °

longitudine: 9,622153 °

Classe: 2

Vita nominale: 50

Siti di riferimento

	ID	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Distanza [m]
Sito 1	16927	44,420160	9,570822	4361,5
Sito 2	16928	44,422450	9,640713	1963,4
Sito 3	16706	44,472390	9,637490	4426,6
Sito 4	16705	44,470100	9,567617	5894,8

Parametri sismici:

Categoria sottosuolo: E

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50 anni

Coefficiente c_u : 1

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	a_g [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	30	0,052	2,400	0,234
Danno (SLD)	63	50	0,068	2,440	0,246
Salvaguardia della vita (SLV)	10	475	0,182	2,441	0,273
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	975	0,236	2,445	0,278

Coefficienti sismici Stabilità dei pendii e fondazioni

	S_s [-]	C_c [-]	S_t [-]	K_h [-]	K_v [-]	A_{max} [m/s ²]	Beta [-]
SLO	1,600	2,060	1,000	0,017	0,008	0,812	0,200
SLD	1,600	2,020	1,000	0,022	0,011	1,063	0,200
SLV	1,510	1,930	1,000	0,066	0,033	2,696	0,240
SLC	1,360	1,920	1,000	0,090	0,045	3,151	0,280

8) CONCLUSIONI

L'insieme delle analisi svolte corredate anche dalle prove dirette ed indirette descritte ed analizzate nei precedenti paragrafi hanno consentito allo scrivente tecnico di effettuare una caratterizzazione geologico-stratigrafica dei siti oggetto d'intervento. In relazione alla presenza di condizioni di dissesto geomorfologico rappresentate dalla cartografia del PTCP è possibile affermare che le stesse interessano direttamente solo un breve tratto di linea elettrica interrata, peraltro posta in adiacenza ad un elettrodotto già esistente, inoltre in virtù degli approfondimenti svolti ed analizzati nella trattazione della presente relazione è possibile escludere ogni controindicazione di carattere geologico rispetto alla realizzazione delle opere in progetto, in quanto saranno adottati accorgimenti costruttivi tali da non aumentare il grado di suscettività al dissesto dei terreni limitrofi, ma andando addirittura a migliorarne le condizioni di stabilità.

In fase pre-esecutiva, al fine di confermare ed aumentare la precisione della stratigrafia già individuata dalle prove svolte e descritte nella presente relazione, sarà necessario l'esecuzione di n.2 sondaggi a carotaggio continuo associati ad endoscopie televisive in foro.

Per quanto concerne la realizzazione della pista di accesso e delle piazzole, il deflusso delle acque provenienti dal versante e fluenti verso la strada andranno intercettate con apposite cunette, caditoie e pozzetti, collettati ad una adeguata rete di smaltimento, così come le acque fluenti sul tracciato stradale andranno raccolte e incanalate attraverso opportune opere e accompagnate in solchi di corrivazione.

Il piano di fondazione di tutte le nuove opere murarie dovrà essere attestato in una fascia di terreno roccioso dalle caratteristiche uniformi.

Le opere in riporto dovranno prevedere la stesura di strati di terreno dello spessore non superiore a 30 centimetri debitamente rullati e costipati, al fine di scongiurare cedimenti e assestamenti del materiale riportato.

Per quanto concerne l'installazione delle due turbine eoliche si prevede il ricorso a fondazioni profonde, necessarie a radicare ed ammorsare la fondazione direttamente nel substrato roccioso sano.

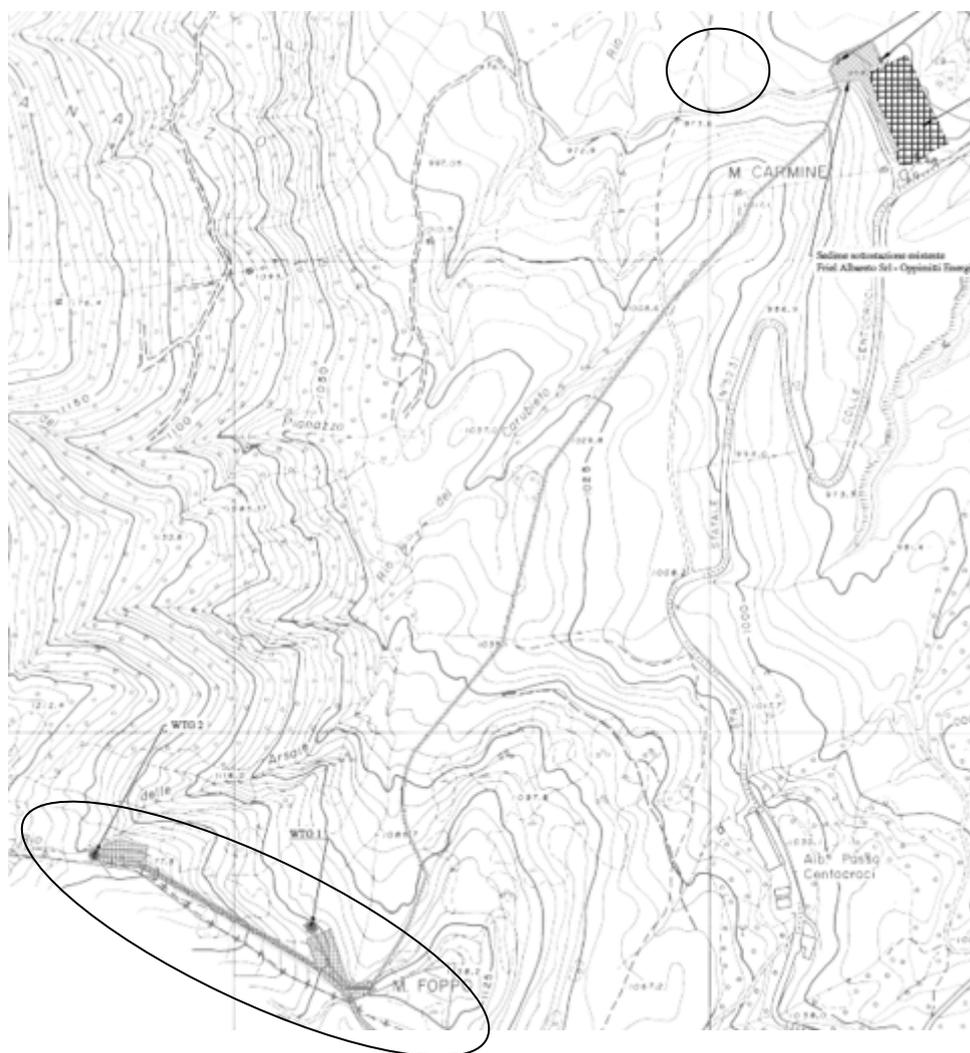
Per l'installazione della cabina primaria è prevista principalmente la regolarizzazione del profilo del terreno, con scavi non superiori a 2 metri e riporti fino a 3 metri circa. Si consiglia di ammorsare le fondazioni sul substrato roccioso,

anche eventualmente in maniera indiretta con l'utilizzo di micropali, o in alternativa, ricorrere a fondazioni a platea, al fine di distribuire in maniera uniforme il carico e scongiurare cedimenti differenziali.

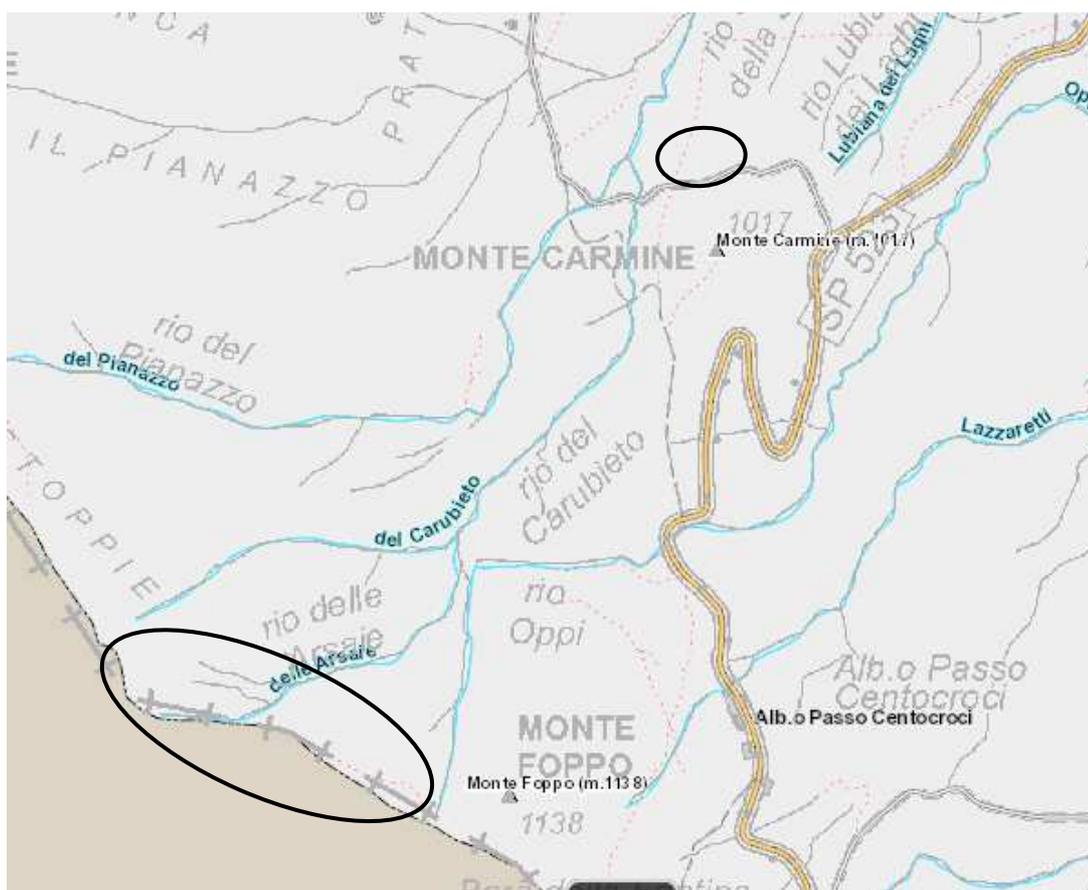
Geol. Andrea Bertoldi



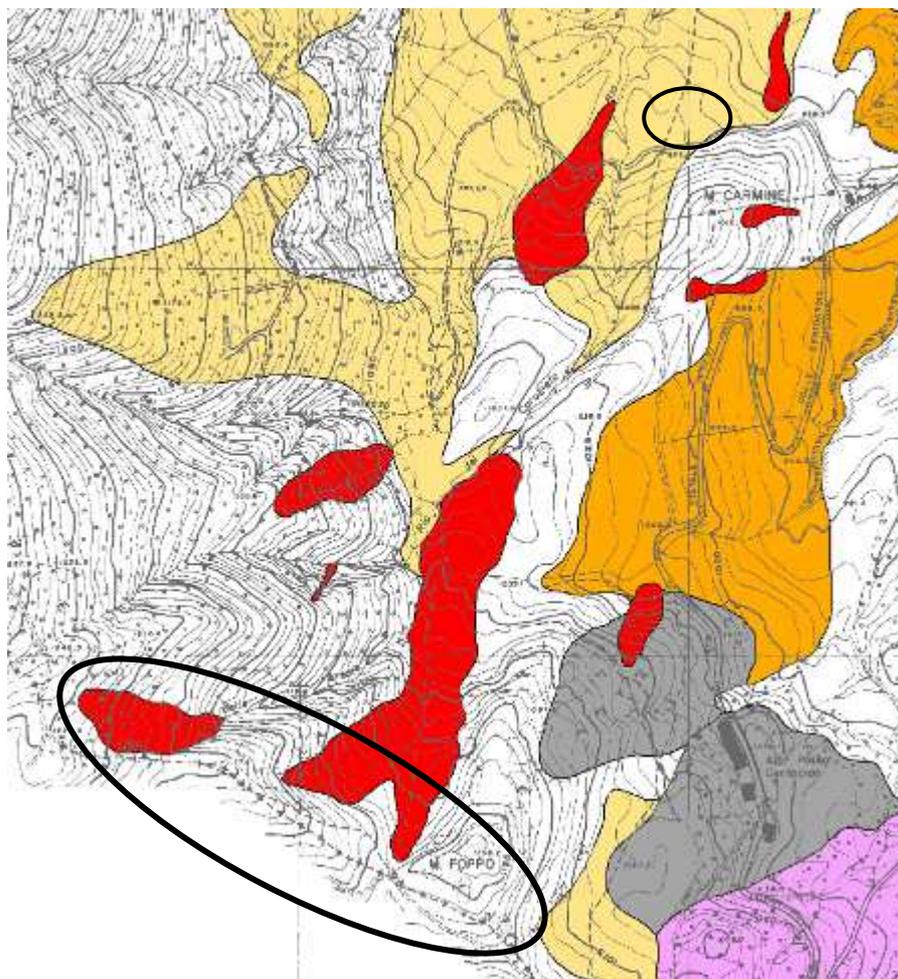
COROGRAFIA



CARTA DEI CORPI IDRICI SUPERFICIALI



CARTA DEL DISSESTO

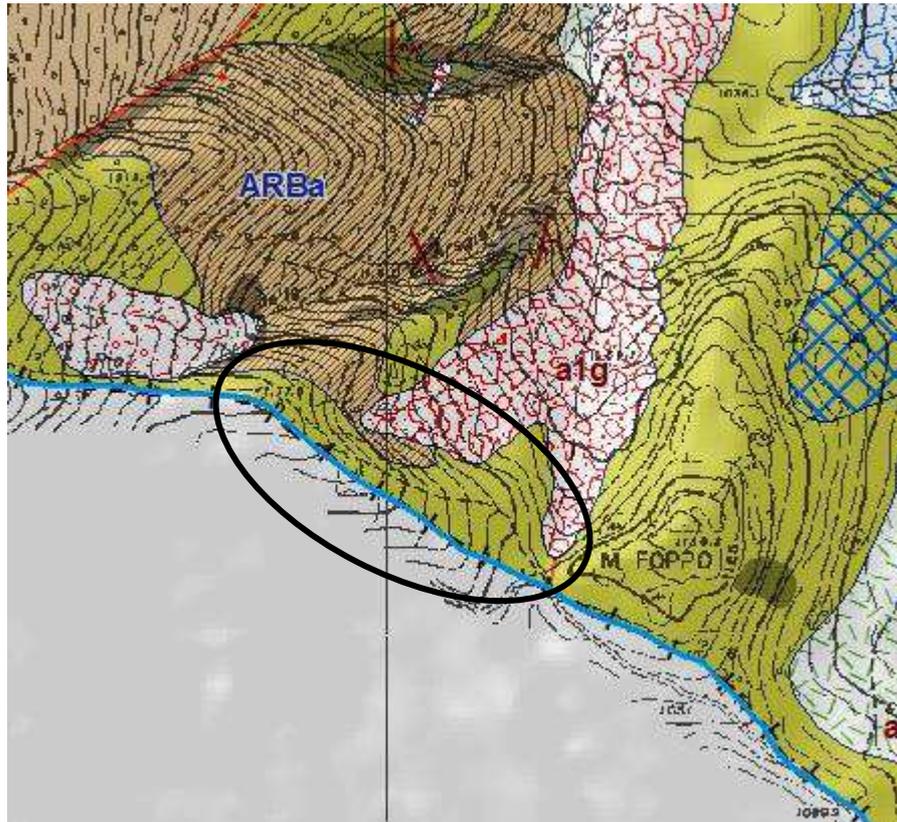


TAV. C2 sezione. 215160

LEGENDA

Art.21 N.T.A.	AREE A PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA MOLTO ELEVATA	
		Frane attive
		Aree soggette a decorticamento superficiale e/o soliflusso
		Aree calanchive e sub-calanchive
		Scarpate di degradazione in atto
		Aree Ee (PAI)
Art.22 N.T.A.	AREE A PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA ELEVATA	
		Frane quiescenti
		Parti di versante inglobati in corpi di frana quiescente
		Aree Eb (PAI)
Art.22 bis N.T.A.	AREE A PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA MODERATA	
		Versanti interessati da scivolamenti planari o rotazionali in massa
		Frane relitte
		Deformazione gravitativa profonda di versante
		Detrito di versante
		Depositi di conoide alluvionale
		Depositi alluvionali

CARTA GEOLOGICA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA



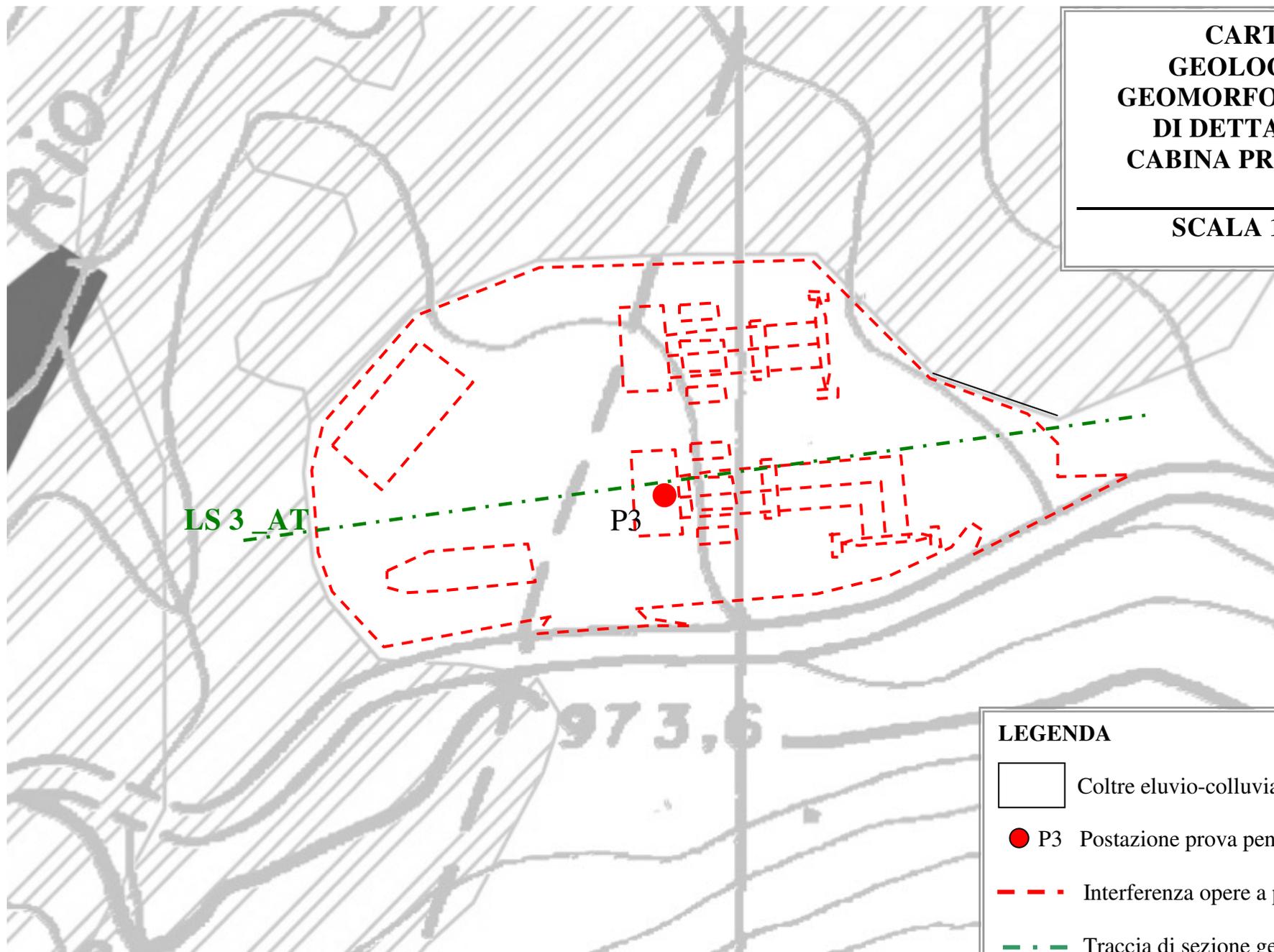
LEGENDA

UNITÀ TETTONICA BRATICA

Eocene - Oligocene		ARENARIE DI PONTE BRATICA
	ARB	Areniti fini e siltiti in strati gradati sottili e molto sottili. Si distingue una litozona siltosa (ARB _s) costituita da siltiti, silt marnose e subordinate areniti fini in strati sottili. Torbiditi ed emipelagiti di ambiente marino profondo. <i>OLIGOCENE SUP.</i>
		ARGILLE E CALCARI DI CANETOLO
	ACC	Peliti grigio nere non carbonatiche in strati medi e spessi alternate a calcilutiti grige in strati medio-sottili e calcari marnosi in strati spessi e molto spessi. Intercalazioni di arenarie e siltiti in strati gradati medio-sottili. Torbiditi ed emipelagiti di ambiente bacinale. <i>EOCENE INF.-MEDIO</i>
		a₁ Frane in evoluzione. Accumuli gravitativi caotici di materiali eterogenei ed eterometrici con evidenze di movimenti in atto.
		a₂ Frane quiescenti. Accumuli gravitativi caotici di materiali eterogenei ed eterometrici attualmente quiescenti o stabilizzati.
		a₃ Detriti di versante. Depositi eterogenei ed eterometrici per gravità e ruscellamento lungo i versanti.
		a₄ Depositi eluvio-colluviali. Coperture detritiche dovute ad alterazione "in situ" e, in seguito mobilizzate da processi di versante, costituite da clasti eterometrici di varia litologia in matrice pellica e/o sabbiosa.

**CARTA
GEOLOGICA
GEOMORFOLOGICA
DI DETTAGLIO
CABINA PRIMARIA**

SCALA 1:800



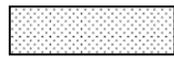
LEGENDA

-  Coltre eluvio-colluviale
-  P3 Postazione prova penetrometrica
-  Interferenza opere a progetto
-  Traccia di sezione geologica

SEZIONI GEOLOGICHE INTERPRETATIVE

SCALA 1 : 400

LEGENDA



Coltri di copertura eluvio colluviali



Substrato roccioso (Argille e Calcari di Canetolo)
(alterate e fratturate)



Substrato roccioso (Argille e Calcari di Canetolo)
(di discreta qualità)

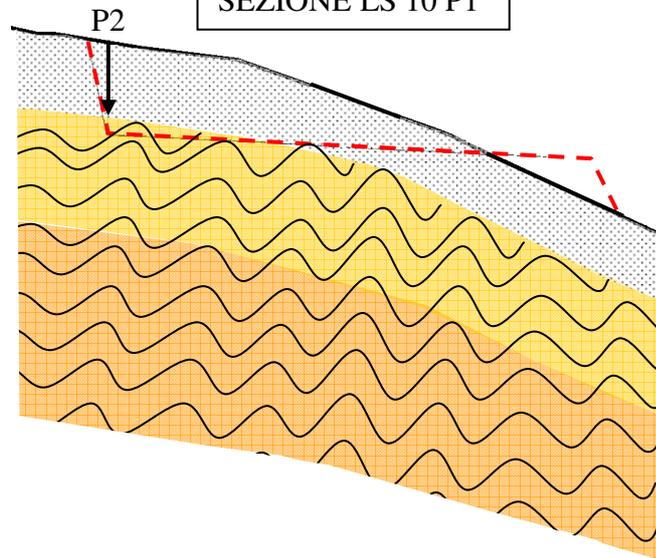


Interferenza delle opere a progetto

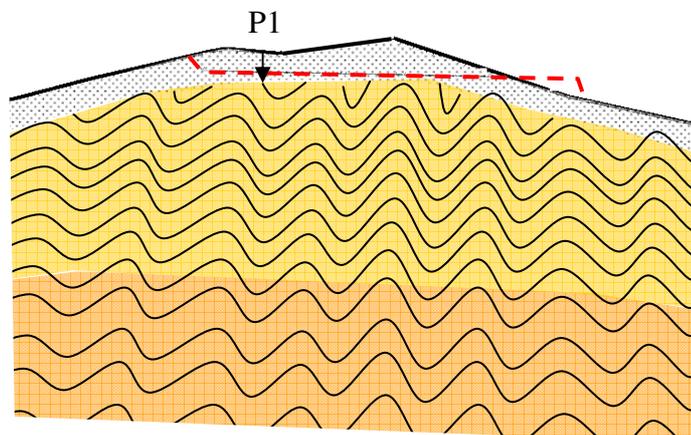


Prova penetrometrica

SEZIONE LS 10 P1



SEZIONE LS 6 P2



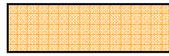
SEZIONI GEOLOGICHE INTERPRETATIVE

SCALA 1 : 200

LEGENDA



Coltri di copertura eluvio colluviali

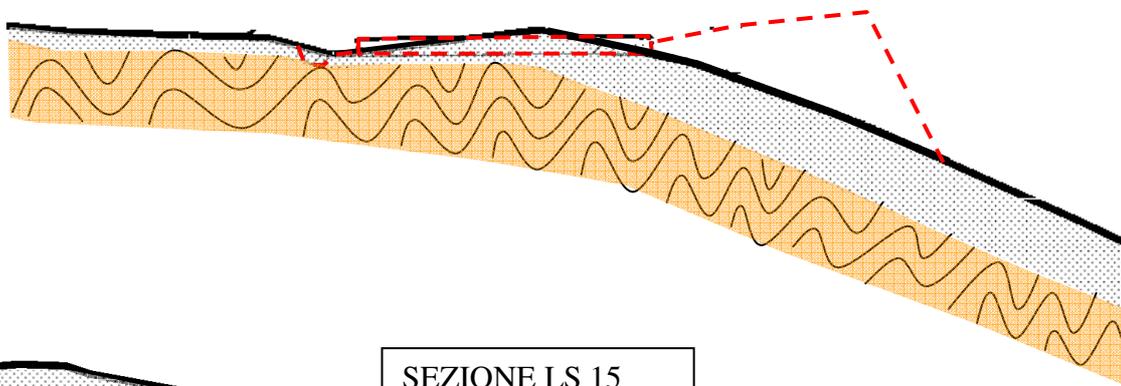


Substrato roccioso (Argille e Calcari di Canetolo)

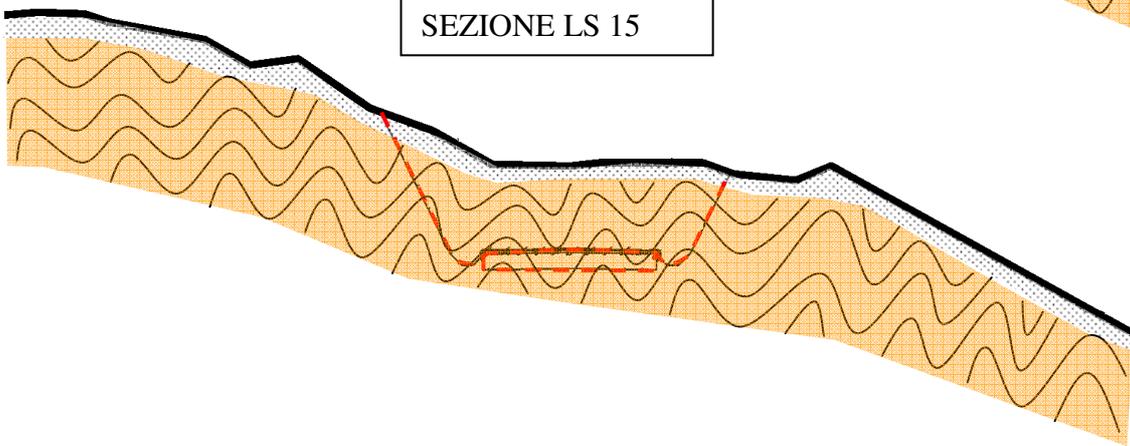


Interferenza delle opere a progetto

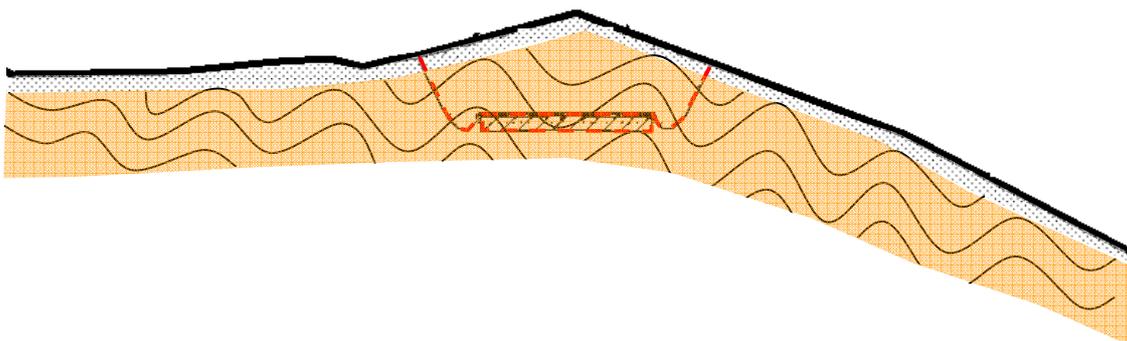
SEZIONE LS 5



SEZIONE LS 15



SEZIONE LS 23



SEZIONE GEOLOGICA INTERPRETATIVA

SCALA 1 : 400

LEGENDA



Coltri di copertura eluvio colluviali



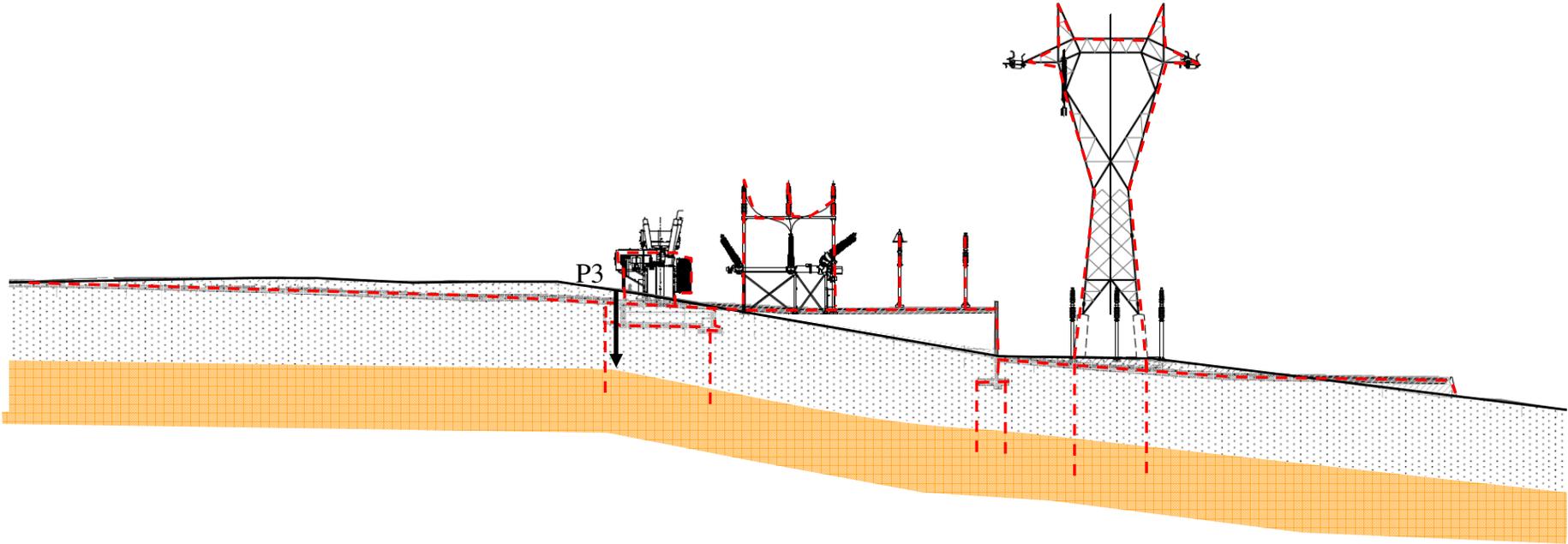
Substrato roccioso (Argille e Calcari di Canetolo)



Interferenza delle opere a progetto

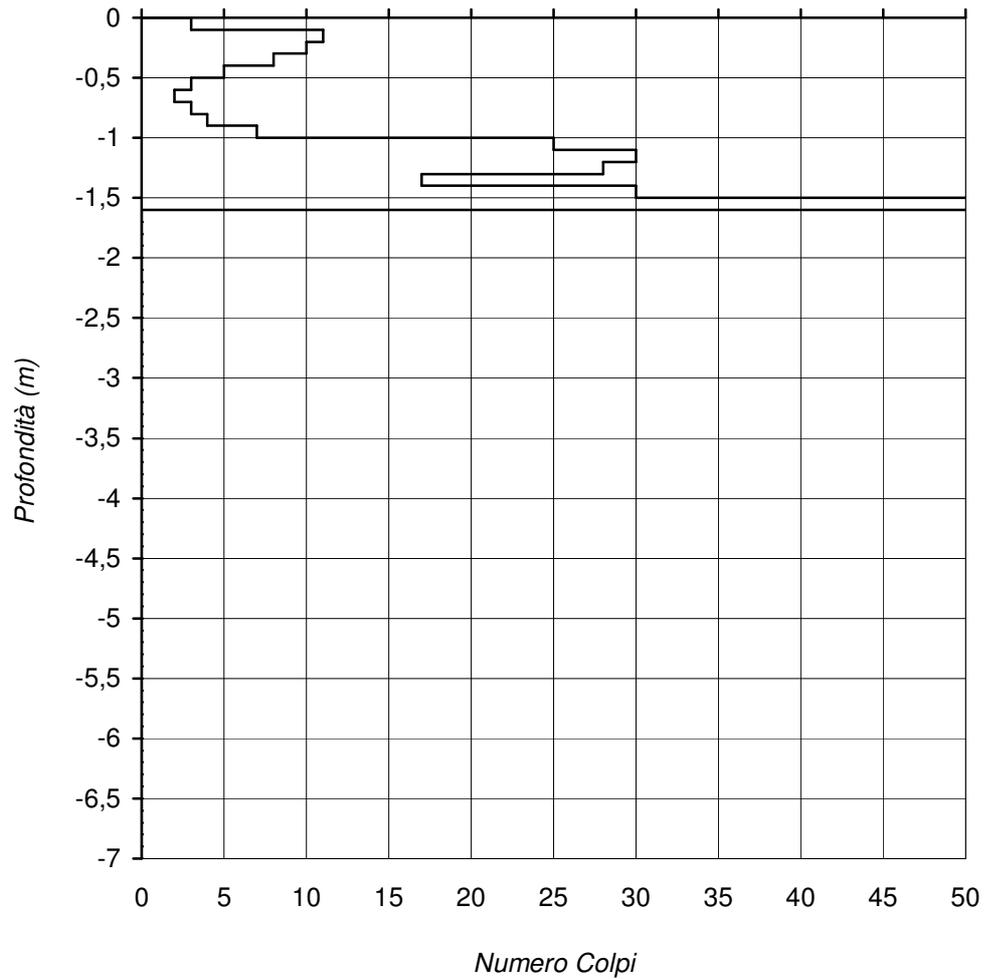


Prova penetrometrica



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Esecutore: Geol. Bertoldi Andrea	P 1
Commitente: Gea Energie S.r.l.	Data: 29/5/19
Progetto: Installazione turbine eoliche	Località: monte Foppo - Tornolo

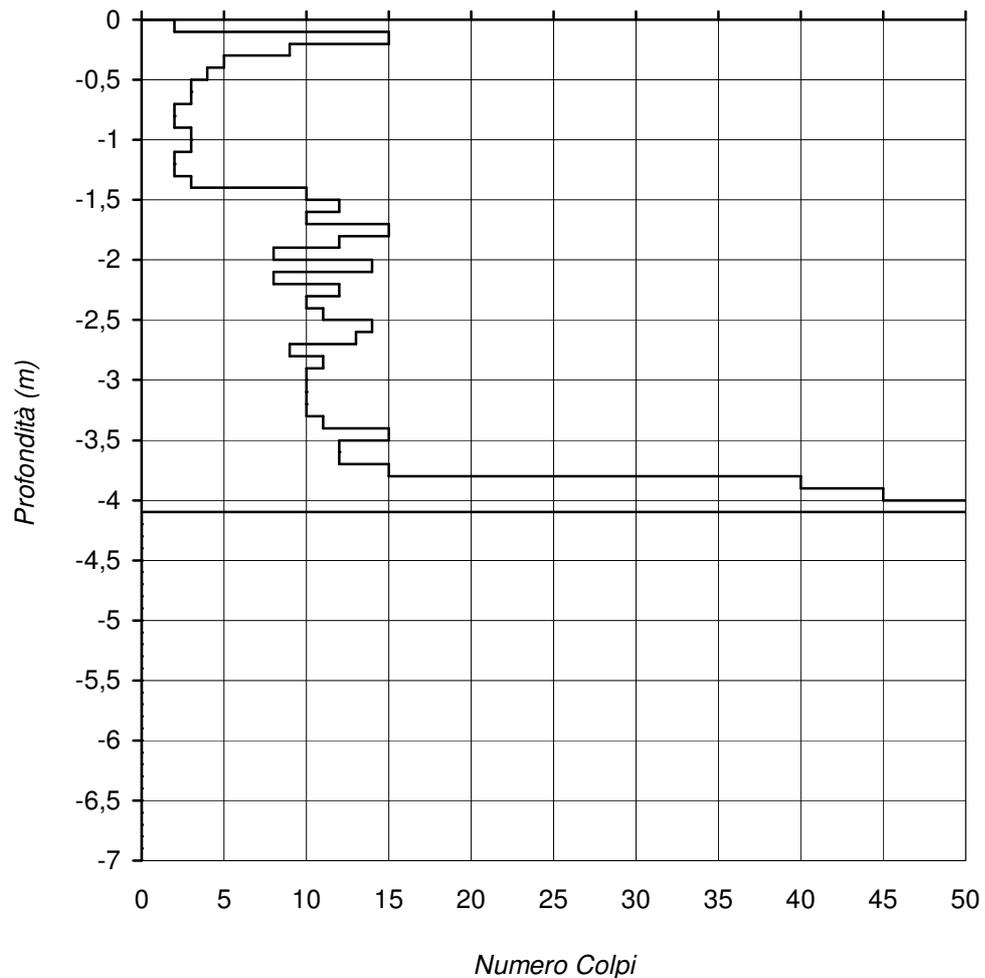


CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO

Massa	Kg	30
Volata del maglio	cm	20
Sezione della punta	cm ²	10
Passo di misura	cm	10
Massa dell'incudine	Kg	6
Lunghezza dell'asta	cm	100
Massa dell'asta	Kg	2

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Esecutore:	Geol. Bertoldi Andrea	P 2
Commitente:	Gea Energie S.r.l.	Data: 29/5/19
Progetto:	Installazione turbine eoliche	Località: monte Foppo - Tornolo



CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO

Massa	Kg	30
Volata del maglio	cm	20
Sezione della punta	cm ²	10
Passo di misura	cm	10
Massa dell'incudine	Kg	6
Lunghezza dell'asta	cm	100
Massa dell'asta	Kg	2

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Esecutore: Geol. Bertoldi Andrea

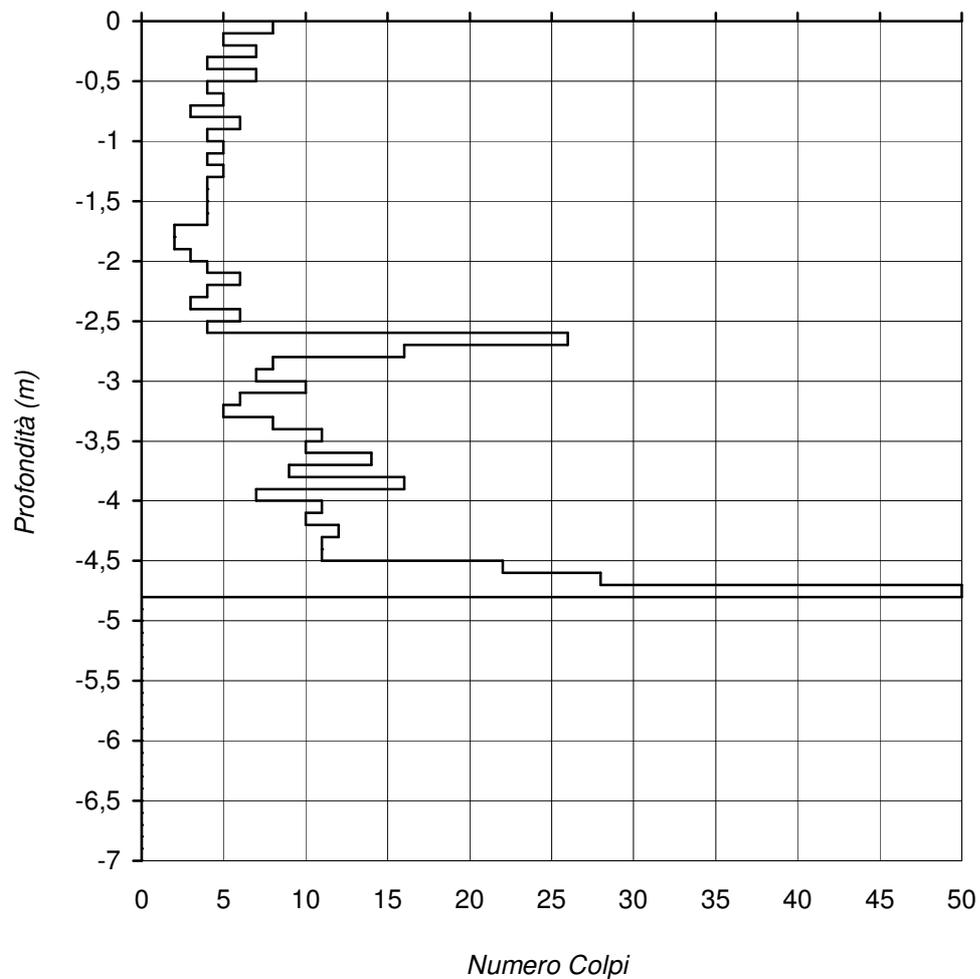
P 3

Commitente: Gea energie S.r.l.

Data: 12/5/20

Progetto: Installazione turbine eoliche e cabina prima

Località: Tornolo



CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO

Massa Kg 10

Volata del maglio cm 50

Sezione della punta cm^2 10

Passo di misura cm 10

Massa dell'incudine Kg 6

Lunghezza dell'asta cm 100

Massa dell'asta Kg 2