

**IMPIANTO FOTOVOLTAICO A TERRA COLLEGATO ALLA RTN
POTENZA NOMINALE 29 MWp
*Comune di Bessude (SS)***

PROPONENTE:

TEP RENEWABLES (BESSUDE PV) S.R.L.
Viale SHAKESPEARE, 71 – 00144 Roma
P. IVA e C.F. 16376271009 – REA RM - 1653248

PROGETTISTI:

ING. MATTEO BERTONERI
Iscritto all'Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara
al n. 669

DOTT. GEOL. ALESSANDRO FORCI
Iscritto all'Ordine dei geologi della Sardegna
al n. 346

PROGETTO DEFINITIVO IMPIANTO FOTOVOLTAICO
(art. 23 del D. Lgs 152/2006 e ss. mm. ii)

Relazione geologica e geotecnica

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
21-000-13 IT_BESSUDE_RS_R02_Rev0_Relazione Geologica e Geotecnica	02/2022	Prima emissione	AF	MB	F.Battafarano

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO	4
3. INTERVENTI PREVISTI.....	7
4. GEOLOGIA GENERALE DELL'AREA.....	8
5. GEOLOGIA DEL SITO DI INTERVENTO.....	10
6. GEOMORFOLOGIA DEL SITO DI INTERVENTO	15
7. ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE	19
8. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE	20
9. ZONIZZAZIONE DEL PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI)	23
10. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE	25
11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	29

Allegato 1 – Relazione sulle indagini sismiche

1. PREMESSA

La presente relazione illustra lo studio geologico redatto per l'installazione di un Impianto fotovoltaico da 29,7 MW sul rilievo di Monte Cheia in Comune di Bessude (Provincia di Sassari).

In base alle NTC18 (D.M. 17/01/2018 - parr. 6.2; 6.2.1) la relazione geologica viene redatta sulla base di specifiche indagini geognostiche con lo scopo di fornire la descrizione delle formazioni presenti nel sito, dei tipi litologici, della struttura e dei caratteri fisici del sottosuolo, in modo da definire il modello geologico del sottosuolo, illustrando e caratterizzando gli aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici, nonché il conseguente livello di pericolosità geologica.

Lo studio è stato effettuato attraverso il rilevamento geologico e geomorfologico di superficie che ha consentito l'esauritiva rappresentazione dei caratteri geologici, geomorfologici ed idrogeologici. Le indagini geognostiche sono state eseguite tramite indagine sismica a rifrazione nell'area di affioramento di depositi di alterazione superficiali, valutati di spessore non trascurabile, ricavando in via preliminare anche i parametri geotecnici delle terre.

Per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi ci si è avvalsi dei metodi di rilevamento propri della meccanica delle rocce, con analisi strutturale dei fronti rocciosi esposti utilizzando semplice strumentazione da campo (sclerometro, bussola da geologo, pettine di Barton) per la stima dei i parametri fondamentali di resistenza da utilizzare nella fase di progettazione geotecnica.

È stata analizzata inoltre la circolazione delle acque superficiali e sotterranee per valutare l'eventuale interferenza con le opere in progetto.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO

La zona di intervento è localizzata nella regione storica del Meilogu, in Comune di Bessude (SS), in località Monte Cheia. Dal punto di vista cartografico si colloca nella Sez. 479 I "Ittiri" della cartografia IGM (Fig. 1) in scala 1:25000 e nelle Sezz. 479_040 "Diga 'e su Bidighinzu" e 479_080 "Monte Cheia" della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (Fig.2).

L'area è ubicata sulla sommità del rilievo di Monte Cheia, un tavolato vulcanico allungato secondo NS che culmina nei 638 m di Monte Cheia che domina la vallata del Lago Bidighinzu prodotto dallo sbarramento dell'omonimo rio (Figg. 3-4).

L'uso del suolo è caratterizzato dal pascolo naturale non irriguo a servizio dell'allevamento estensivo di ovini. Gli unici fabbricati presenti sono costituiti da un capannone utilizzato come sala mungitura e una piccola casa appoggio.

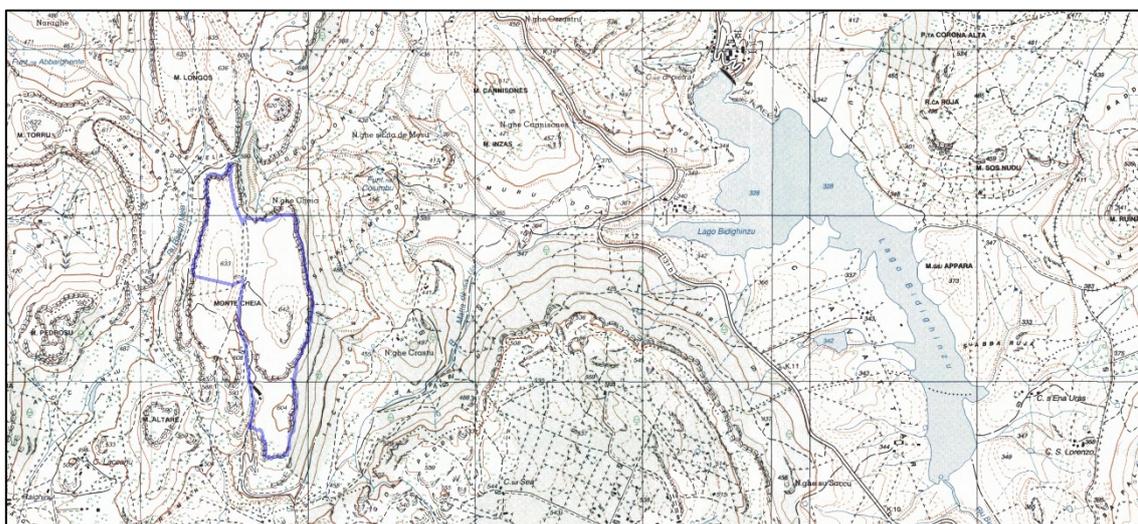


Figura 1: area oggetto di intervento (in blu) nella Sez. IGM 479 I "Ittiri". Scala come da reticolo chilometrico.

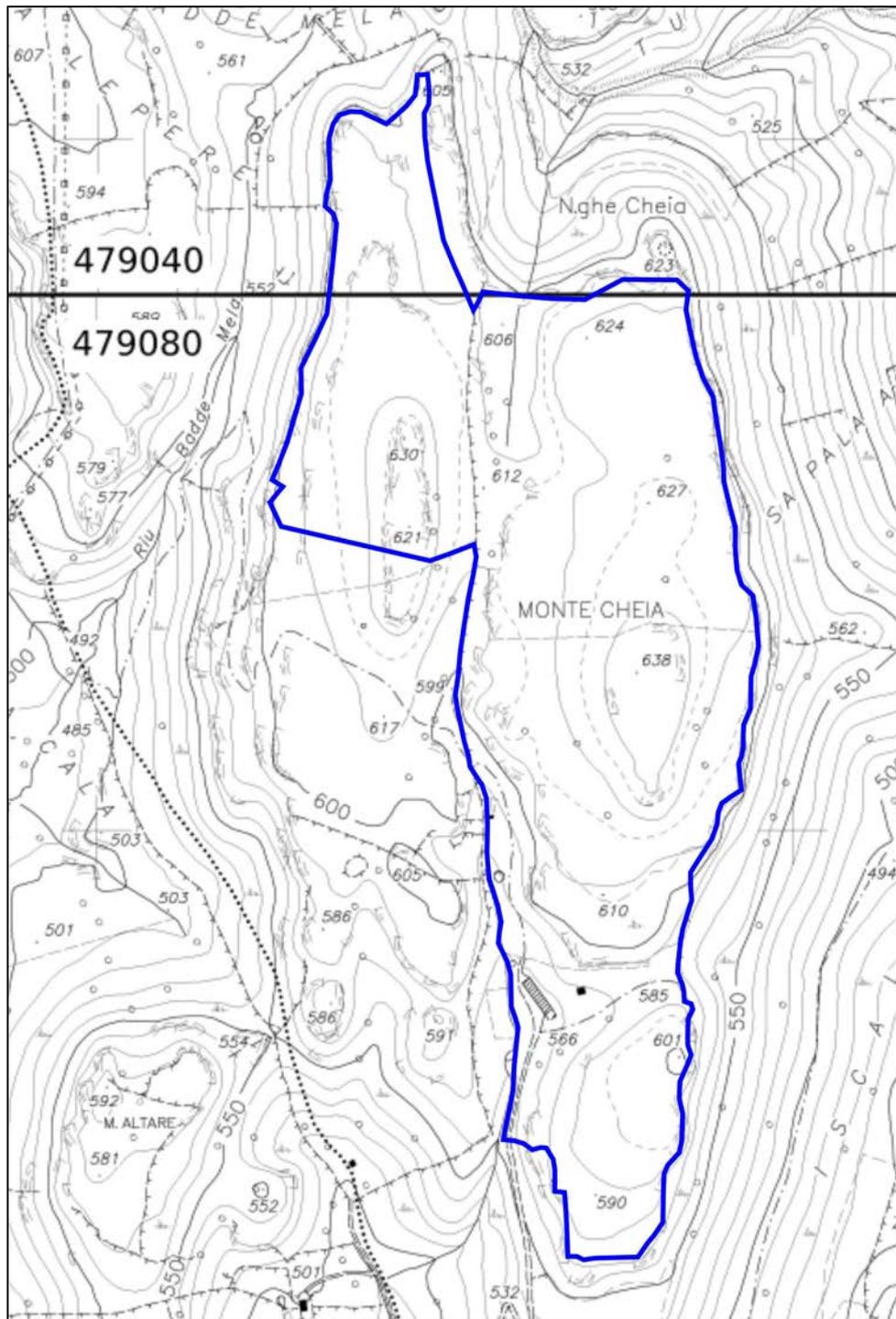


Figura 2: Area oggetto di intervento (in blu) nelle Sezz. CTR 479040 "Dida 'e su Bidighinzu" e 479080 "Monte Cheia".



Figura 3: panoramica verso nord dell'area interessata dal progetto.

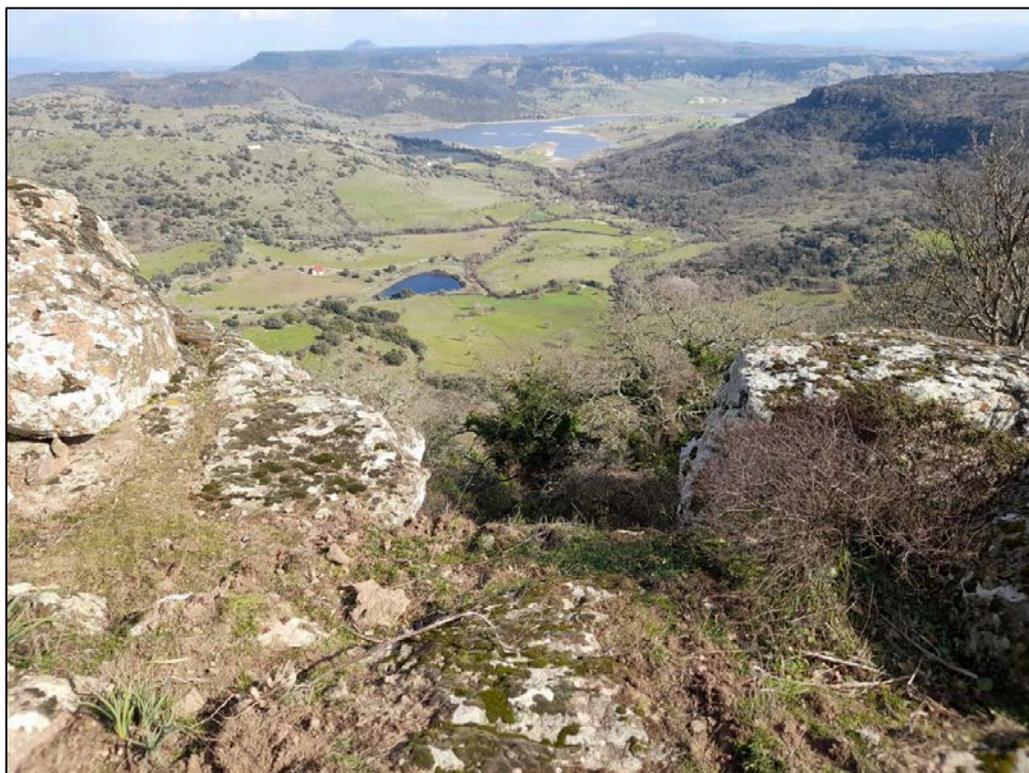


Figura 4: Lago Bidighinzu dal bordo est dell'altopiano

3. INTERVENTI PREVISTI

Come accennato in premessa l'intervento consiste nella posa in opera di un impianto fotovoltaico di potenza nominale pari a 29 Mwp su una superficie superiore a 30 ha con pannelli che presentano un'elevazione massima di 2,5 m rispetto al livello del suolo, questi saranno fissati direttamente al terreno tramite pali metallici di tipologia variabile in base alle caratteristiche del terreno. Sono previsti altresì alcuni manufatti a servizio dell'impianto dotati di fondazioni di tipo superficiale da dettagliare nelle successive fasi progettuali.

4. GEOLOGIA GENERALE DELL'AREA

La Sardegna, insieme alla Corsica, costituisce la parte emersa di una microplacca, con spessore crostale di circa 30 km e litosferico di circa 70 km, parte del complesso mosaico di placche e microplacche litosferiche che caratterizza l'area mediterranea. La geologia dell'isola è caratterizzata da un basamento cristallino varisco, su cui poggiano una successione vulcano-sedimentaria permiana, una successione carbonatica mesozoica, una successione prevalentemente silicoclastica del Paleocene-Eocene, una successione vulcano-sedimentaria oligo-miocenica, le vulcaniti basaltiche plio-pleistoceniche e infine i sedimenti pleistocenici e olocenici.

La zona si colloca all'interno di una profonda struttura tettonica conosciuta in letteratura come *rift oligo-miocenico sardo*, colmato da una sequenza vulcano-sedimentaria di molte centinaia di metri di spessore, in particolare l'area risulta interamente occupata dai prodotti vulcanici del ciclo calco-alcalino oligo-miocenico costituito da lave e piroclastiti con prodotti di alterazione e coperture quaternarie alluvionali e di versante. Uno schema generale della geologia del settore di intervento è riportato in Fig. 5 (da Carmignani et al., 2001).

Più nello specifico, nel Logudoro – Meilogu e nel Bosano, affiora la più completa successione vulcanica connessa con il ciclo magmatico oligo-miocenico dell'isola, potente circa 1000 m, costituita da prodotti lavici da andesitici a basaltici e da potenti espandimenti ignimbrici essenzialmente rio-dacitici. La successione vulcanica è il prodotto di un'attività eruttiva pressoché continua, intercalata solo a tratti da episodi sedimentari marini e continentali.

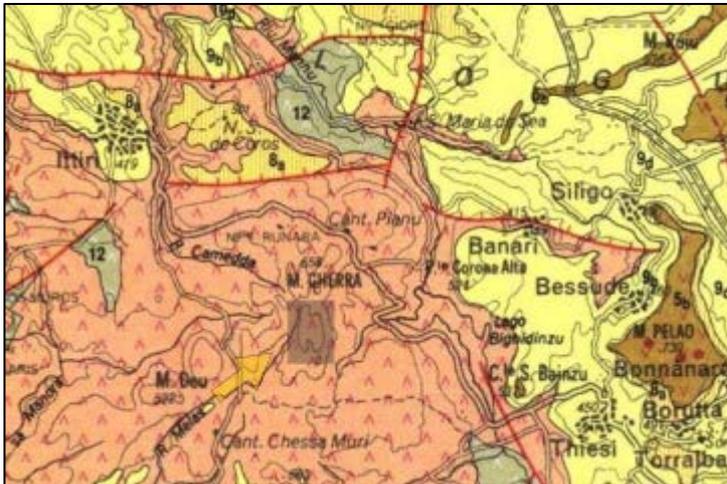


Figura 5: stralcio della Carta geologica della Sardegna in scala 1:200.000. In Verde lave oligo-mioceniche intermedio-basiche. In rosa Ignimbrici rio-dacitici oligo-miocenici. In giallo sedimenti silicoclastici e carbonatici del Miocene inferiore – medio. In marrone vulcaniti basaltiche del ciclo plio-pleistocenico. La freccia gialla indica l'area di studio.

Il ripetersi degli eventi vulcanici ha messo in posto:

- una prima successione eruttiva del ciclo oligo-miocenico (“Serie Andesitica Inferiore”, SAI di Coulon, 1977), attualmente affiorante estesamente lungo la costa presso Capo Marrargiu, a N di Bosa, costituita prevalentemente da andesiti, in morfologia di lave generalmente alterate e di dicchi molto inclinati o sub-verticali, da piroclastici riconducibili ad eventi di caduta e di flusso e da epiclastiti massive. Essa pare essere in stretta relazione col basamento paleozoico cristallino, affiorante nell’alto struttu-

rale rappresentato, nella piattaforma continentale occidentale della Sardegna, dall'affioramento granitoide nell'Isola di Maldiventre, per via della presenza di abbonanti facies brecciate con xenoliti di metamorfiti paleozoiche.

- una seconda successione, dal carattere ignimbrico ("Serie Ignimbrica Inferiore", SII di Coulon 1977), che rappresenta l'evento vulcanico più diffuso nella Sardegna occidentale, in appoggio sulla successione SAI. Questa successione, costituita da una sovrapposizione di flussi piroclastici pomiceo-cineritici a composizione rio-dacitica, della potenza di circa 500 m, affiora poco a nord di Bosa e si sviluppa in continuità verso Alghero, costituendo una morfologia monoclinale a cuestas con inclinazione media intorno a 20° 30° ed immersione verso NE.

- una successione clastica, sia marina sia continentale, intercalata alle sequenze vulcaniche, costituita da un'alternanza di arenarie e conglomerati rosso-violacei, eteropici con i sedimenti marini ad elevato contenuto detritico, di ambiente infra-circa litorale, attribuiti all'Oligocene.

- una ulteriore successione di carattere andesitico ("Serie Andesitica Superiore", SA2), che costituisce una serie di affioramenti nella valle del Temo ed alcune cupole e dicchi verso la costa occidentale

- un'ultima successione ignimbrica ("Serie Ignimbrica Superiore", S12), che si estende nel Logudoro e in Anglona, dalle caratteristiche vulcanologiche e modalità di messa in posto simili alla SII. Come termine ultimo del ciclo calc-alcalino di carattere esplosivo, è presente infine la "Formazione dei tufi pomicei", che contribuisce a costituire i prodotti della sedimentazione lacustre e fluvio-lacustre diffusamente affiorante nella Sardegna settentrionale.

5. GEOLOGIA DEL SITO DI INTERVENTO

Nell'area in esame affiora solo una parte della sequenza vulcanica oligo-miocenica del Logudoro Mejlugu, le rocce più antiche sono rappresentate dalle andesiti dell'Unità di Pala Mantedda, che affiora verso est, e dalle lave dacitiche di Monte Frusciu presenti più a sud (Fig. 4). Le andesiti di Pala Mantedda appaiono costituite da alternanze di lave e domi di spessore complessivo di circa 100 m, così come le daciti dell'unità di Monte Frusciu, ambedue vengono sormontate dalla successione piroclastica della Serie Ignimbrica Superiore (Coulon, 1977) del Burdigaliano che in carta viene distinta, dal basso verso l'alto in Piroclastiti di Uri, Piroclastiti di Romana e Piroclastiti di Monte Longos (Figure 6-7-8).

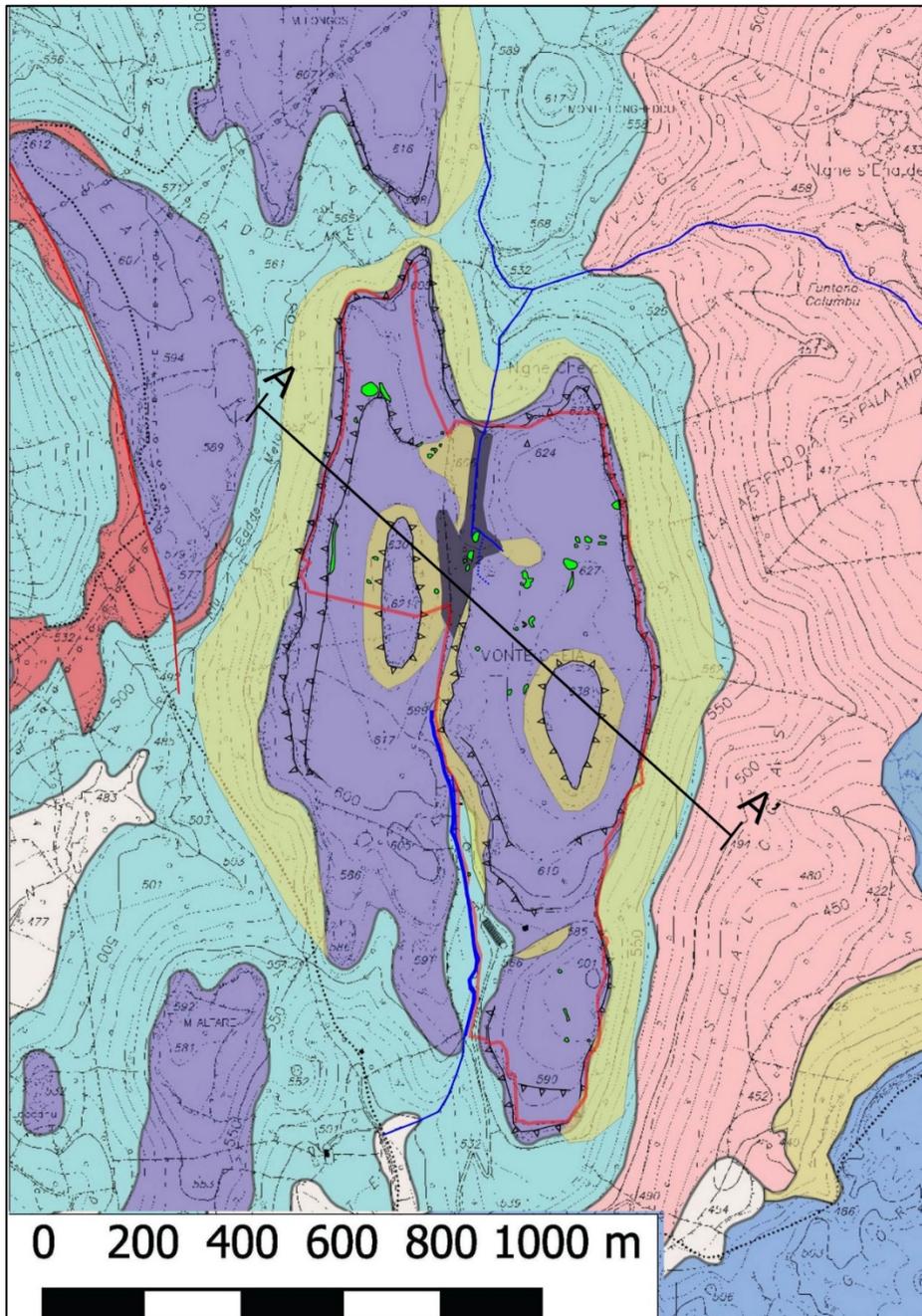


Figura 6: schema geologico del settore oggetto di intervento. Da RAS – Geoportale, modificata. Legenda in Figura 7.

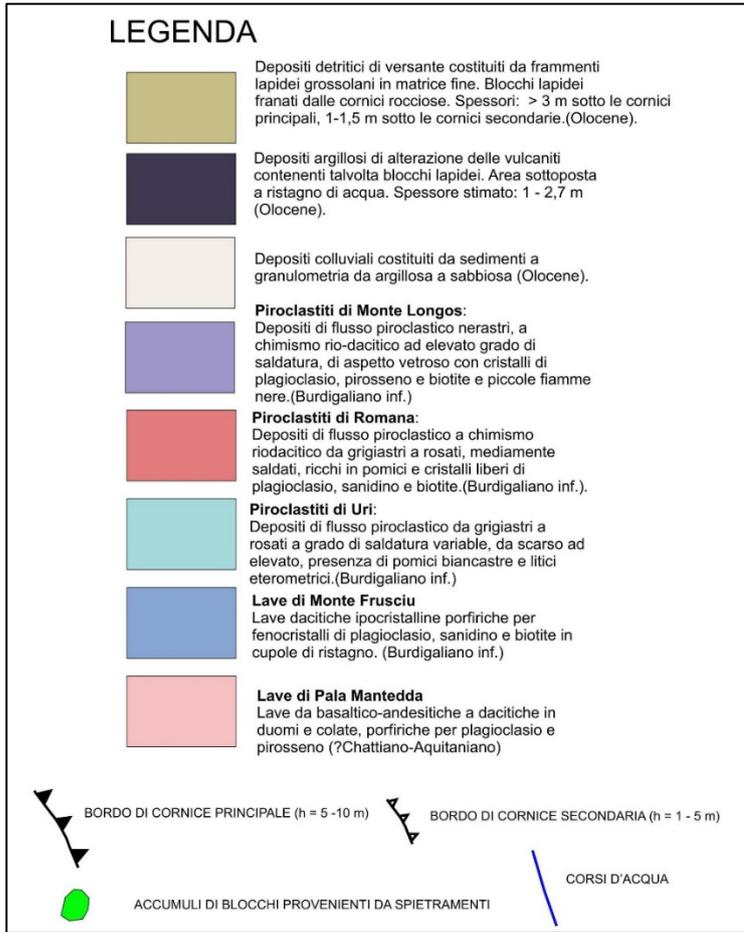


Figura 7: legenda della Carta geologica/geomorfologica di Figura 6.

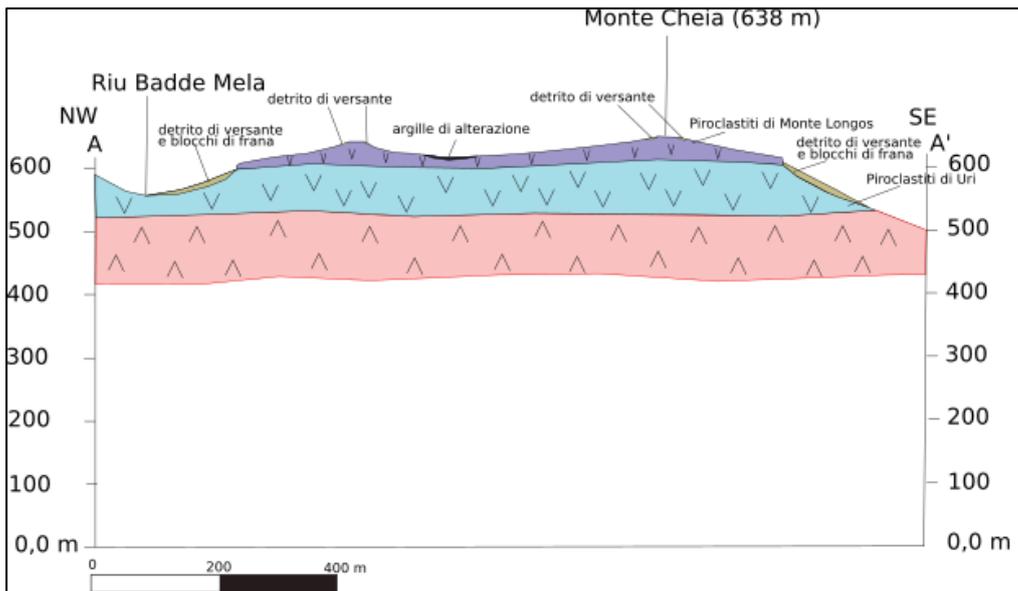


Figura 8: Sezione geologica A-A'.

Le uniche unità presenti nel rilievo di Monte Cheia sono rappresentate dalle Piroclastiti di Uri e da Piroclastiti di Monte Longos mentre mancano quelle di Romana a denotare una probabile fase di erosione nell'intervallo di deposizione delle due unità vulcaniche.

Le Piroclastiti di Uri sono quelle che hanno l'estensione areale maggiore, presentano un colore da grigiastro a rosato e mostrano un grado di saldatura variabile, sono caratterizzate dalla costante presenza di litici. Affiorano nella parte bassa dei versanti e non risultano direttamente interessate dalle opere in progetto.

Le Piroclastiti di Monte Longos (Fig. 9) presentano una colorazione prevalentemente nerastra con elevato grado di saldatura e aspetto vetroso con piccole fiamme nere e scarsità di litici. Costituiscono interamente il substrato dell'area di interesse e si presentano in genere con immersione delle bancate leggermente verso sud, sud-ovest e sistemi di frattura a basso angolo a debole spaziatura che riprendono la giacitura delle bancate. A questi sistemi di frattura si associano fratture sub-verticali orientate preferibilmente in senso est-ovest. Le fessure sono rugose, aperte, talvolta con riempimento, senza circolazione idrica.



Figura 9: tipico aspetto delle Piroclastiti di Monte Longos.

Le vulcaniti affiorano generalmente in rilievo sui versanti, mentre nella parte sommitale sub-pianeggiante sono ricoperte da una scarsa copertura di suolo che non supera i 30-40 cm e risulta del tutto essente in alcuni settori dove la roccia è esposta, soprattutto nell'estremo nord del settore di Punta Cheia, verso l'omonimo Nuraghe (Fig. 10).



Fig. 10: rilievo di Nuraghe Cheia (sullo sfondo) ad elevata rocciosità. In primo piano affioramenti rocciosi e blocchi di accumulo presenti nel settore nord-ovest.

In alcuni limitati settori sono presenti depositi sciolti quaternari di varia natura, consistenza e spessore. Nel complesso, nella carta geologica oltre al substrato vulcanico sono stati distinti i seguenti depositi:

- depositi di versante e accumuli di frana
- depositi argillosi di alterazione.

I primi sono ubicati ai piedi delle cornici principali che delimitano l'altopiano ignimbrico e, con estensioni e spessori più ridotti, anche nelle aree sottostanti le cornici minori presenti nell'area interna all'altopiano, soprattutto lungo la cornice presente poco più a nord del capannone dell'azienda. Si è preferito inserire in questa unità anche i blocchi in frana che contornano le cornici rocciose (Fig. 11) che possono arrivare ad alcuni mc di grandezza e che si trovano dispersi nei detriti di versante che presentano una pezzatura generalmente minuta.



Figura 11: cornice rocciosa presente poco a nord del capannone dell'azienda agrozootecnica con blocchi di crollo alla base del versante.

I depositi argillosi occupano una superficie di poco più di 1 ha di estensione (Fig. 12), nella sella che separa il rilievo di Monte Cheia (638 m), da quello “gemello” posto ad ovest dell’area (630 m), che sovrasta la valle del Riu Badde Mela. Le argille, pedogenizzate, di colore scuro sono il prodotto di alterazione delle sottostanti vulcaniti in un’area soggetta a ristagni di acqua con spessori massimi, stimati sulla base delle prove simiche effettuate (Vedi relazione geofisica), che possono arrivare a 2,7 m e vanno a ricoprire il substrato vulcanico sempre molto alterato sino a profondità di circa 6,5 m, dove questo assume le caratteristiche proprie delle rocce lapidee. I limiti della fascia argillosa sono riportati in nella carta geologica e comprendono anche l’area del compluvio dove è presente il piccolo rigagnolo che scorre verso il bordo nord dell’altopiano.

Sulle litologie vulcaniche lapidee sono state effettuate due stazioni strutturali dove sono state rilevate le famiglie delle discontinuità principali per la determinazione dei parametri caratteristici dell’ammasso roccioso. I dati medi ricavati sono riportati all’interno del paragrafo dedicato alla classificazione dei terreni.



Figura 12: area di affioramento delle argille di alterazione dove sono state svolte le indagini geofisiche.

6. GEOMORFOLOGIA DEL SITO DI INTERVENTO

Come già detto l'area è ubicata alla sommità di uno stretto tavolato ignimbrico che assume una forma di un rettangolo allungato in senso nord-sud con il lato maggiore di poco meno di 2 km di lunghezza ed il lato minore di circa 0,7 km. L'altopiano si sviluppa ad una quota di circa 610-620 m sul livello del mare ed è caratterizzato da marcate cornici rocciose che lo elevano rispetto ai versanti circostanti circondate da depositi di blocchi in frana e detrito di versante. L'altopiano è caratterizzato inoltre da due piccoli pianori sommitali posizionati sul lato ovest e sul lato est, ad una quota intorno a 630 m s.l.m che risultano separati da una larga sella caratterizzata da presenza di argille e ristagno d'acqua. L'area dell'altopiano mostra in genere pendenze molto modeste (Fig 13) inferiori al 10%, anche se sono presenti aree a pendenza superiore (sino al 35%), al raccordo con i pianori sommitali, oltre a piccole cornici rocciose non sempre evidenziate dalla carta di Fig 13.

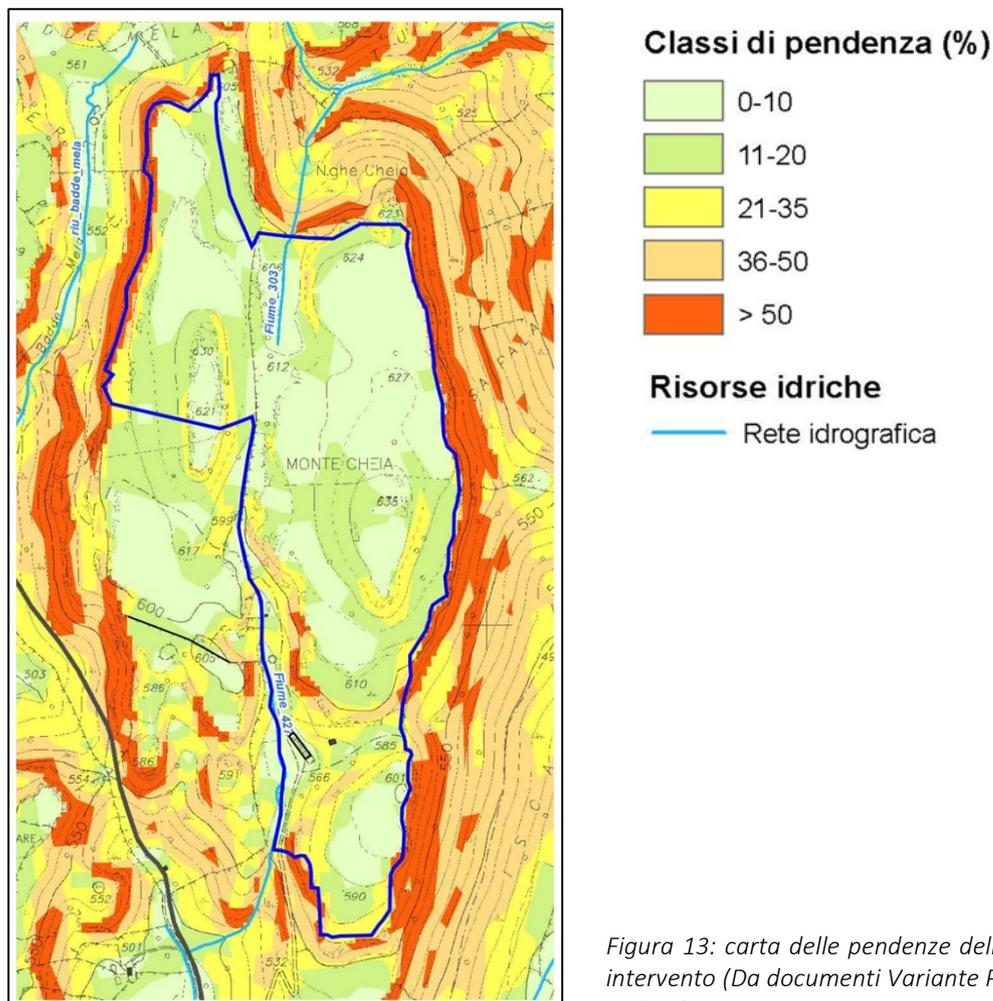


Figura 13: carta delle pendenze dell'area oggetto di intervento (Da documenti Variante PAI Sub-Bacino n. 3, RAS)

Di queste cornici si menzionano quella presenti sul lato nord-ovest e sul lato sud (Figg. 14-15) in quanto presentano un'altezza non trascurabile compresa in genere tra 1 e 2 m.



Figura 14: cornice minore presente nel settore nord dell'area.



Figura 15: cornice minore presente a sud del rilievo di Monte Cheia.

Altro aspetto non trascurabile è quello relativo alla rocciosità che, oltre ad interessare le aree di cornice, interessa anche altri settori con ampie superfici non perfettamente regolari in genere occupate da arbusti, essendo impossibile ogni pratica agricola. (Fig. 15), Nella carta della rocciosità sono stati inseriti anche i cumuli di blocchi (in verde) derivanti dagli spietramenti del terreno eseguiti con mezzi meccanici (Fig.16).

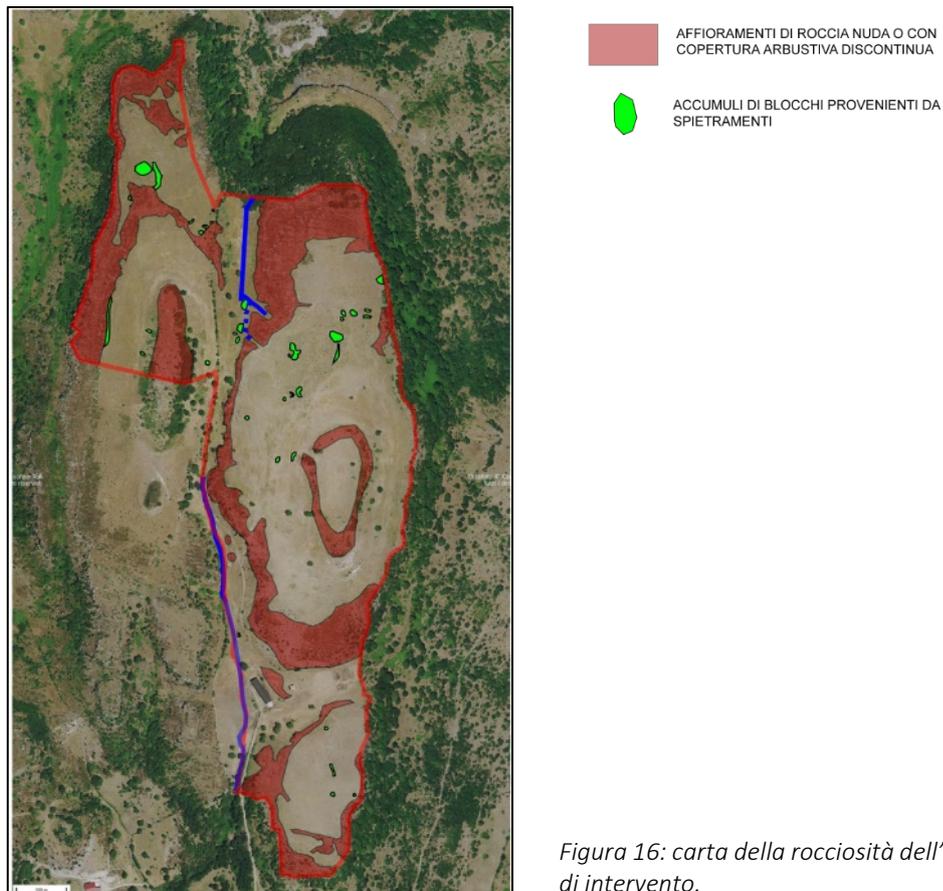


Figura 16: carta della rocciosità dell'area oggetto di intervento.



Figura 17: cumuli di blocchi provenienti da spietramenti a nord del pianoro di Monte Cheia.

Le aree centrali dell'altopiano presentano invece una morfologia pianeggiante regolare con solo un debole spessore di suolo, potente al massimo 30-40 cm, che ricopre le bancate ignimbriche con diffusa pietrosità superficiale (Fig. 18).



Figura 18: aree pianeggianti sulla sommità dell'altopiano di Monte Cheia.

Tutte le cornici principali che delimitano l'altopiano sono contornate da materiale detritico in frana rappresentato da blocchi di grosse dimensioni frammisto a detrito di versante, tali depositi sono presenti anche sotto la cornice che si innalza subito a nord del capannone aziendale con grossi blocchi che arrivano sino al fondo valle.

7. ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE

Per quanto riguarda le acque superficiali la rete di drenaggio è molto povera sono solo presenti due modesti compluvi (Figg. 19-20) che drenano le acque provenienti dall'altopiano che si dipartono dalla sella centrale per dirigersi rispettivamente verso nord, sino al bordo dell'altopiano e verso sud costeggiando la stradina che conduce all'azienda agricola. Sono inoltre presenti alcune linee di scorrimento artificiale realizzate sui versanti in debole pendenza che arrivano sino al bordo dell'altopiano in modo da evitare il formarsi di zone di ristagno delle acque di precipitazioni.



Figura 19: compluvio che passa nel settore nord dell'area che scorre verso il bordo dell'altopiano verso nord.



Figura 20: compluvio che passa nel settore sud dell'area con senso di scorrimento verso sud.

Sul compluvio meridionale è presente anche una piccola sorgentella, utilizzata dall'azienda zootecnica attraverso lo stoccaggio in un serbatoio in calcestruzzo che viene alimentato anche da un pozzo trivellato che attinge dalla falda profonda, presente a circa 50 m di profondità.

8. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE

Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso dove è prevista l'installazione del parco fotovoltaico è stato realizzato uno studio geomeccanico in diversi settori dei fronti rocciosi esposti che presentano una sostanziale omogeneità giaciturale e strutturale. È stata utilizzata la classificazione RMR (Rock Mass Rating) di Bieniawski (1989) che prevede di assegnare un punteggio all'ammasso roccioso sulla base di 5 parametri.

R1 – resistenza a compressione uniassiale della roccia;

R2 – RQD (Rock Quality Designation);

R3 – spaziatura delle discontinuità;

R4 – condizioni delle discontinuità;

R5 – condizioni idrauliche.

I parametri sono raggruppati in cinque intervalli di valori, la cui somma permette di suddividere gli ammassi rocciosi in cinque classi di qualità e di definirne il rispettivo indice di classificazione RMR:

$$\text{RMR} = \text{R1} + \text{R2} + \text{R3} + \text{R4} + \text{R5}$$

L'indice RMR viene utilizzato per ricavare i parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso (coesione, angolo di attrito e modulo di deformabilità).

L'ammasso roccioso in esame presenta caratteristiche litologiche e strutturali abbastanza omogenee sull'intera area d'intervento, per cui è possibile classificarlo con un unico indice. Si utilizzeranno i valori medi dei dati ottenuti dalle stazioni strutturali effettuate sui fronti esposti rappresentati dalle cornici principali e secondarie, i parametri ricavati sono:

R1, resistenza a compressione monoassiale σ . Il valore della resistenza è stato determinato attraverso prove sclerometriche. I risultati di questo test permettono di effettuare una correlazione con la resistenza a compressione della roccia. La resistenza è mediamente elevata.

($\sigma \sim 30$ Mpa); R1 = 4

R2, R.Q.D. (%). È un indice che si ottiene sulla base del recupero percentuale dei carotaggi ma che può essere calcolato anche attraverso abachi sulla base della frequenza di fratturazione. Considerando, come rilevato, una media di circa 6-8 fratture per metro si ha:

(R.Q.D $\sim 25\%$); R2 = 8

R3, spaziatura delle discontinuità. La spaziatura delle fratture è mediamente di 40 cm. R3 = 10

R4, condizioni delle discontinuità. I giunti sono persistenti con una lunghezza della discontinuità tra 3-10 m, con apertura della discontinuità tra > 2 mm con superficie leggermente rugosa, talvolta si riscontra un riempimento argilloso. R4 = 10

R5, condizioni idrauliche. Al momento del rilievo asciutto, non si è rilevata circolazione idrica, possibile comunque in seguito ad abbondanti precipitazioni. R5 = 10

Di conseguenza l'indice generale che quantifica la qualità dell'ammasso roccioso sarà:

$$\text{RMR} = \text{R1} + \text{R2} + \text{R3} + \text{R4} + \text{R5} = 42$$

Questo valore classifica l'ammasso come mediocre (classe III)

I parametri di resistenza e deformabilità attribuibili sono: coesione $c = 210$ KPa; angolo d'attrito ϕ (ϕ) = 26° ; modulo di deformabilità $E_d = 6$ GPa; peso di volume $\gamma_n = 2.0$ kN/mc.

Categoria sismica suolo di fondazione: Categoria A

Non vi sono problemi in relazione alla capacità portante delle rocce ignimbriche lapidee per quanto riguarda le opere di fondazione dei pannelli e delle opere accessorie. Per l'esecuzione di eventuali scavi andrà valutata la stabilità dei fronti rocciosi in relazione alle possibilità di scivolamento o ribaltamento dei blocchi.

Le argille di alterazione dei depositi vulcanici presenti nell'area che separa i due pianori sommitali (vedi carta geologica/geomorfologica) sono state oggetto di specifica indagine geofisica (Fig.21) i cui risultati sono riportati in allegato 1 a firma del Dott. Geol. Mario Nonne.



Figura 21: ubicazione profilo sismico effettuato.

Le indagini indicano uno spessore massimo delle argille pari a circa 2,7 m che passano in profondità alla roccia sana presente a circa 6,0 m di profondità attraverso una fascia di alterazione delle ignimbriti di circa 3 m di potenza (Fig.22).

Per le argille di alterazione presenti in settori limitati dell'area (da indagine sismica - Allegato 1):

coesione non drenata $C_u = 62$ KPa

peso di volume $\gamma_n = 15,4$ kN/mc

modulo edometrico $E_d = 117$ MPa

modulo di Winkler verticale (sulla base di v_s) = $1,0$ kg/cmc

modulo di Winkler verticale (da Fondazioni - Bowles, 1988) = $1,22$ kg/cmc

capacità portante argille sulla base di v_s : $q_{amm} = 71$ KPa

Categoria sismica suolo di fondazione: Categoria B

Essendo ricavati per via indiretta tali parametri sono da considerarsi indicativi.

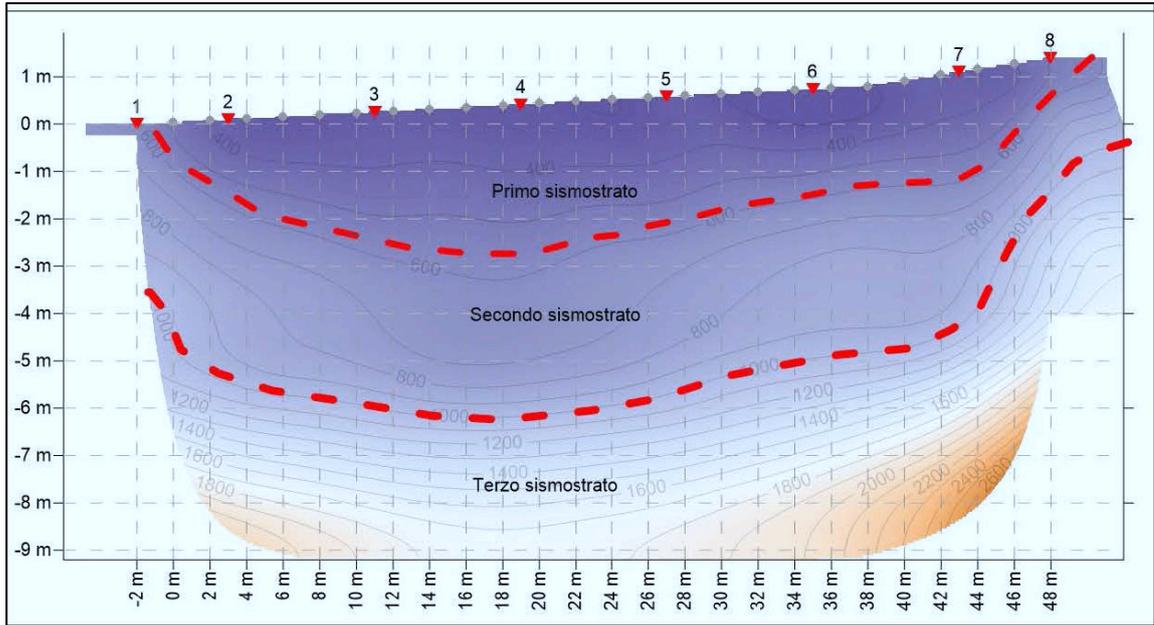


Figura 22: stratigrafia desunta dalle prove geofisiche con indicazione delle velocità Vs.

9. ZONIZZAZIONE DEL PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI)

La pericolosità geologica è messa in evidenza dagli elaborati del Piano Assetto Idrogeologico, in particolare dalla Variante Generale del Bacino Unico della Sardegna (Sub-bacino 3: Coghinas-Mannu-Temo) approvata dall’Autorità di Bacino in data 16/07/2015. In tale documento la Tavola FA_06_02_C01_TAV 073 mostra come l’area di Monte Cheia ricada all’interno di un’area perimetrata a pericolosità Hg3 ovvero a pericolosità elevata, dove sono presenti frane quiescenti che si possono verificare con intervalli pluriennali o pluridecennali. La pericolosità geomorfologica messa in evidenza dal PAI (Fig. 23) riguarda le cornici rocciose principali che presentano altezze sino a 10 m oltre ad alcuni cornici secondarie che presentano invece altezze nettamente inferiori.

Ovviamente le cornici, soprattutto quelle principali (Fig. 24), per l’elevata instabilità dovuta alla fratturazione dell’ammasso roccioso, rappresentano un elemento intrinsecamente ad elevata pericolosità geologica, potendosi isolare e staccare blocchi nell’ordine di diversi metri cubi come evidente nelle ripide pendici sottostanti, dove alcuni blocchi arrivano sino al fondovalle. Dovrà essere assicurata quindi una congrua fascia di sicurezza priva di installazioni provvista dei necessari sistemi di prevenzione circa il pericolo di cadute accidentali. Eventuali interferenze delle opere con le aree perimetrate dal PAI frane dovranno essere valutate in appositi studi di pericolosità geologica e geotecnica ai sensi dell’art. 25 delle Norme di Attuazione del PAI.



PERICOLOSITA' DA FRANA

Classe	Intensità	Descrizione
		Aree studiate non soggette a potenziali fenomeni franosi
Hg1	Moderata	I fenomeni franosi presenti o potenziali sono marginali
Hg2	Media	Zone in cui sono presenti solo frane stabilizzate non più riattivabili nelle condizioni climatiche attuali a meno di rilevanti sottoposti (assetto di equilibrio raggiunto naturalmente o mediante interventi di consolidamento); zone in cui esistono condizioni geologiche e morfologiche sfavorevoli alla stabilità dei versanti ma prive al momento di indicazioni morfologiche di movimenti gravitativi
Hg3	Elevata	Zone in cui sono presenti frane quiescenti per le cui riattivazioni ci si aspetta presumibilmente tempi pluriennali o pluridecennali; zone di possibile espansione areale delle frane attualmente quiescenti; zone in cui sono presenti indizi geomorfologici di instabilità dei versanti e in cui si possono verificare frane di neoformazione presumibilmente in un intervallo di tempo pluriennale o pluridecennale
Hg4	Molto elevata	Zone in cui sono presenti frane attive, continue o stagionali; zone in cui è prevista l'espansione areale di una frana attiva; zone in cui sono presenti evidenze geomorfologiche di movimenti incipienti

Fig. 23: aree ad elevata pericolosità geologica per frana Hg3 (arancione scuro) riportate nel PAI.



Figura 24: bordo della cornice principale ad est di Monte Cheia.

Per quanto riguarda la pericolosità idraulica, anche se non sono presenti corsi d'acqua perimetrati dal PAI, sono individuabili alcune aste fluviali di primo ordine secondo la classificazione di Horton - Strahler, riportate nella Carta Tecnica Regionale e/o nella cartografia IGM e che quindi, in base all'art. 30 ter delle Norme di Attuazione dello stesso PAI, tali aste sono soggette all'applicazione delle misure di prima salvaguardia, queste consistono nella delimitazione di una fascia di larghezza L che nel caso di aste di primo ordine, come quelle in oggetto, ha una larghezza pari a 10 m su entrambi i lati a partire dall'asse. Le aree così perimetrare sono soggette alla disciplina prevista dagli artt. 27 e 27 bis delle NdA del PAI.

Nella carta geomorfologica sono riportate, inoltre, anche alcune piccole linee di compluvio, soggette a scorrimento idrico, non riportate nella cartografia ufficiale.

10. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

In questo paragrafo si definiscono le caratteristiche sismiche del sito al fine di determinare, in accordo con le Norme tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18), le eventuali azioni sismiche a cui potrebbero essere soggette le strutture in progetto.

Nella sottostante Fig. 25 è mostrata la rappresentazione cartografica dei terremoti storici presenti nel catalogo CPTI 15 (Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, 2015), redatto dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). Si evidenzia come la Sardegna presenti una sismicità storica molto bassa sia come frequenza sia come magnitudo.

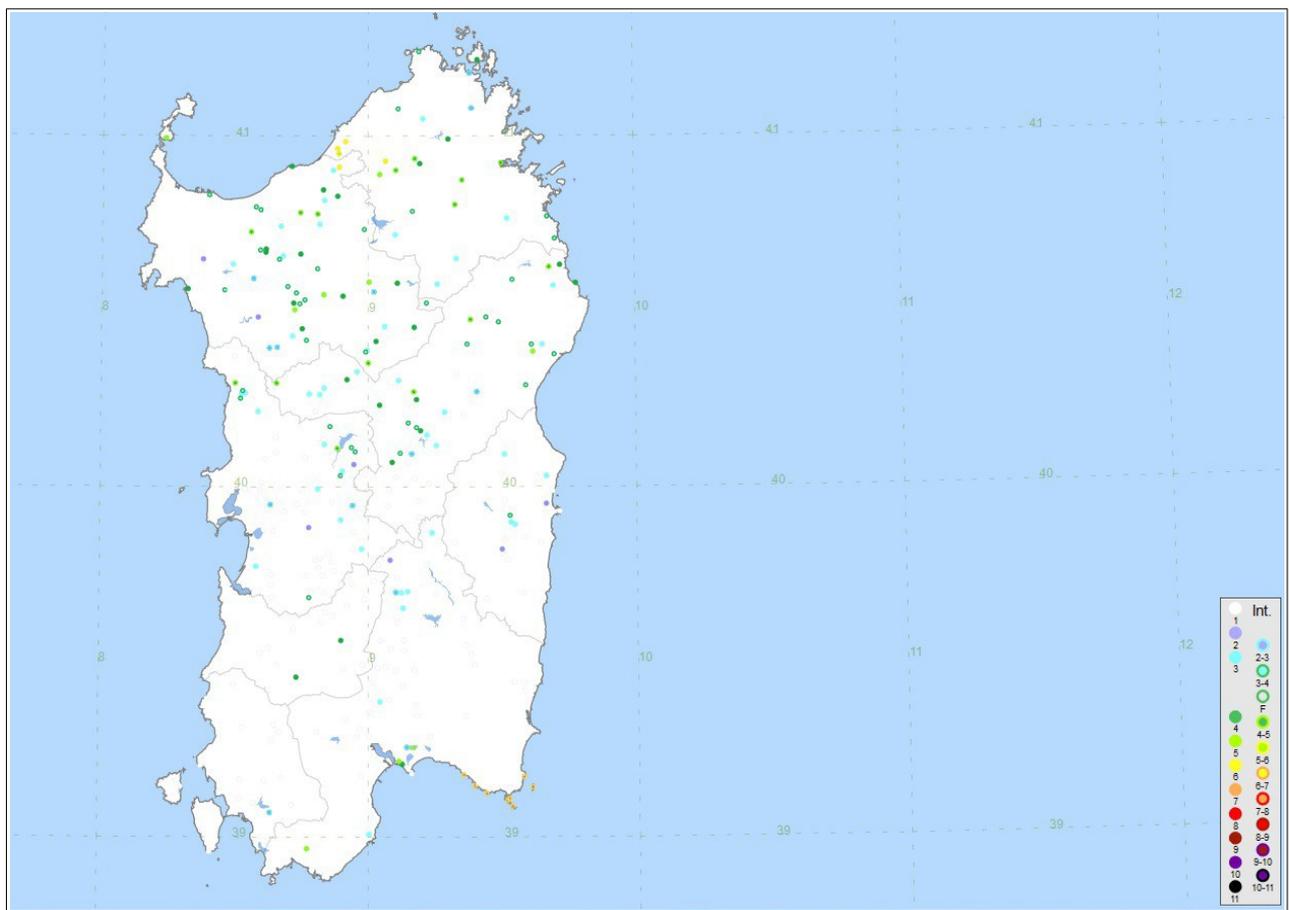


Figura 25: terremoti storici in Sardegna (INGC: Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, 2015)

Secondo il provvedimento legislativo del 2003 (cfr. O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 e s.m.i.), i comuni italiani sono stati classificati in 4 categorie principali, in base al loro rischio sismico, calcolato in base al PGA (*Peak Ground Acceleration* = picco di accelerazione al suolo) e per frequenza ed intensità degli eventi. La Sardegna in questa classificazione ricadeva nella Zona 4, quella a più bassa sismicità, con $PGA < 0,05$ g.

Le NTC18, così come le precedenti NTC2008 fanno riferimento invece alla “pericolosità sismica di base” in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale. La pericolosità sismica di base costituisce quindi l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche da applicare alle costruzioni. Allo stato attuale la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita su un reticolo di riferimento e per diversi intervalli temporali (periodo di ritorno). Il reticolo di riferimento è rimasto invariato rispetto alle NTC2008 dove l'intero territorio italiano è suddiviso in maglie di circa 10 x 10 km di lato con i nodi espressi in termini di coordinate geografiche (Tabella B1 delle NTC2008; (<http://esse1.mi.ingv.it/>)). Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (T_r) considerati dalla pericolosità sismica, sono forniti tre parametri per la definizione dell'azione sismica di progetto.

- a_g : accelerazione orizzontale massima attesa al bedrock con superficie topografica orizzontale (espressa in $g/10$)
- F_o : 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 (espresso in s).

Le accelerazioni orizzontali massime attese al bedrock (a_g) non sono più valutate genericamente sulla base dell'appartenenza del comune in cui realizzare l'opera ad una zona sismica, ma sono calcolate in funzione dell'effettiva posizione geografica del sito dove verrà realizzata l'opera.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (T_r) considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50-esimo percentile.

Per un qualunque punto del territorio, non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto (a_g , F_o , T_c^*) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici del reticolo di riferimento.

Le NTC18 definiscono l'azione sismica considerando un periodo di ritorno (T_r) che è funzione della probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (P_Vr) nel periodo di riferimento dell'opera (V_r).

Il periodo di riferimento dell'opera (V_r) si ottiene dal prodotto tra la Vita Nominale (V_n), intesa come il numero di anni nel quale l'opera è utilizzata allo scopo a cui è stata destinata, e il Coefficiente d'uso (C_u), funzione della Classe d'uso della costruzione (cfr. paragrafo 2.4.3 delle NTC18).

Per le condotte oggetto di intervento sono stati assunti i seguenti parametri:

Vita nominale (V_n) di 50 anni, Classe d'uso pari a I, corrispondente ad un coefficiente d'uso (C_u) pari a 2.

Dal loro prodotto si ottiene un periodo di riferimento per l'opera V_r pari a 100 anni.

Ai fini di valutare la risposta sismica locale, si classificheranno i terreni sulla base della tab.

3.2. delle NTC18 attraverso il cosiddetto “approccio semplificato”. Le stesse NTC18 prevedono infatti che nel caso di determinate situazioni stratigrafiche ben definite, ai fini della risposta sismica locale possano essere utilizzate le categorie di sottosuolo previste nella Tab. 3.2 – II delle NTC18 di seguito riportata (Fig. 26).

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>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.</i>

Figura 26: tabella delle categorie di sottosuolo utilizzabile ai fini della risposta sismica locale riportata nelle NTC18.

In tale tabella la classificazione del sottosuolo viene fatta in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s .

Dalle indagini sismiche effettuate (vedi Relazione sulle indagini sismiche) i terreni argillosi sovrastanti i depositi piroclastici a vario grado di alterazione appartengono alla categoria B, mentre la gran parte dell'area, con roccia esposta o sub-affiorante, appartiene alla categoria sismica A.

Circa il fattore topografia Le possibili condizioni sono:

T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione $i \leq 15^\circ$; T2: Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$;

T3: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$;

T4: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$.

In relazione all'andamento morfologico locale, sub pianeggiante, è possibile classificare il sito di interesse come categoria T1 e T2.

I parametri sismici del sito sono riassunti nella sottostante tabella, in relazione alla tipologia di sottosuolo, di condizioni morfologiche e di opere considerate.

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: A

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 100 anni

Coefficiente c_u : 2

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	60	0,025	2,685	0,299
Danno (SLD)	63	101	0,031	2,730	0,307
Salvaguardia della vita (SLV)	10	949	0,060	2,976	0,371
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1950	0,071	3,061	0,393

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: A

Categoria topografica: T2

Periodo di riferimento: 100 anni

Coefficiente c_u : 2

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	60	0,025	2,685	0,299
Danno (SLD)	63	101	0,031	2,730	0,307
Salvaguardia della vita (SLV)	10	949	0,060	2,976	0,371
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1950	0,071	3,061	0,393

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T2

Periodo di riferimento: 100 anni

Coefficiente c_u : 2

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	60	0,025	2,685	0,299
Danno (SLD)	63	101	0,031	2,730	0,307
Salvaguardia della vita (SLV)	10	949	0,060	2,976	0,371
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1950	0,071	3,061	0,393

La progettazione delle strutture e delle relative fondazioni terrà conto dei valori di sollecitazione riferiti al sito di installazione, garantendo la sicurezza delle strutture e dell'area in cui le stesse saranno ubicate.

11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio geologico e geomorfologico del sito dove è previsto la realizzazione dell'impianto fotovoltaico nel sito di Monte Cheia, in territorio di Bessude in Provincia di Sassari, evidenzia che il sito è situato in un contesto di depositi vulcanici stratificati di tipo ignimbrico, costituiti da litotipi saldati in giacitura sub-orizzontale che vanno a costituire una conformazione di altopiano delimitato da cornici rocciose con altezze nell'ordine di 10 m. La morfologia interna all'altopiano è sub pianeggiante con la presenza di due piccoli pianori a quote leggermente più elevate presenti sul lato est e sul lato ovest dell'area ed altre cornici secondarie di modesta altezza messe in evidenza nella cartografia geomorfologica di Fig. 6.

I fronti rocciosi esposti che delimitano l'area, anche se non direttamente interessati dai lavori, presentano un'elevata instabilità geomorfologica messa in evidenza dal piano di Assetto idrogeologico che assegna a tutte le aree di cornice una pericolosità geomorfologica di pericolosità elevata Hg3.

Rispetto a tutte le cornici individuate dovrà essere pertanto determinata una fascia di sicurezza sia verso monte che verso valle al fine di garantire lo svolgimento delle fasi lavorative e di esercizio in condizioni di assenza di pericolo per persone e cose.

Nel complesso i litotipi vulcanici presentano discrete caratteristiche meccaniche messe in evidenza dal rilievo strutturale e forniscono adeguate garanzie in relazione alla capacità portante per opere civili, tenuto conto che allo stato attuale non sono previsti scavi o sbancamenti di una certa importanza con creazione di nuovi fronti esposti. Nella parte centrale dell'area sono presenti argille di alterazione del substrato vulcanico con estensione ettometrica, della potenza massima di 2,7 m, dalle scarse caratteristiche geomeccaniche messe in evidenza dalle indagini sismiche effettuate, di cui sono stati forniti i parametri geotecnici ottenuti in via preliminare da prove di tipo sismico a rifrazione.

Sono presenti due piccoli corsi d'acqua sottoposti alle misure di prima salvaguardia previste dal Piano di assetto idrogeologico (art. 30 ter delle Norme di Attuazione del PAI).

In conclusione si ritiene che l'impianto di un parco fotovoltaico sul rilievo di Monte Cheia presenti la fattibilità geologica tenuto conto delle limitazioni precedentemente espresse in relazione all'instabilità dei fronti rocciosi.

ALLEGATI

Relazione sulle indagini sismiche



COMUNE DI BESSUDE

PROVINCIA DI SASSARI

PARCO FOTOVOLTAICO MONTE CHEIA BESSUDE

ELABORATO: RELAZIONE PROVE GEOFISICHE

ALLEGATO:

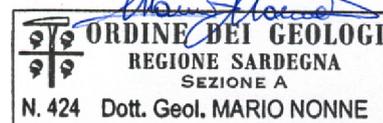
DATA: febbraio 2022

COMMITTENZA

Geologo Alessandro Forci

PROGETTAZIONE

Geologo Mario Nonne



VISTI

SOMMARIO

1) INTRODUZIONE.....	2
2) PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE.....	2
3) STENDIMENTO SISMICO A RIFRAZIONE.....	5
3.1) Valutazione escavabilità terreni.....	9
4) INDAGINI SISMICHE MEDIANTE ONDE DI SUPERFICIE.....	10
5) MODELLO INTERPRETATIVO DELLE INDAGINI.....	16
6) ALLEGATO FOTOGRAFICO.....	18

1) INTRODUZIONE

La presente relazione, commissionata dal geologo Alessandro Forci, illustra i risultati di una campagna d'indagine geofisica di tipo sismico a rifrazione eseguita nel mese di febbraio 2022, nell'ambito degli interventi di "Parco fotovoltaico Monte Cheia Bessude".

Le prove hanno visto l'esecuzione di uno stendimento sismico a rifrazione con registrazione delle onde di compressione P e di una prova MASW. Si evidenzia che le indagini geofisiche devono essere contestualizzate in un modello geologico del settore.

Le variazioni litologiche influiscono sulle caratteristiche di propagazione delle onde sismiche generate artificialmente nel terreno.

2) PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

L'esecuzione di indagini sismiche ha lo scopo di ottenere informazioni di tipo geotecnico sul comportamento fisico-meccanico dei corpi geologici investigati, attraverso la determinazione dei relativi parametri, ed informazioni di tipo geologico sui caratteri strutturali e stratigrafici del volume del sottosuolo indagato. Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consta nel creare delle onde artificiali nel terreno e registrarle attraverso parametri di velocità. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità, che dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fratturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, la possibile presenza di vuoti ecc.

Le indagini sismiche sono utilizzate per scopi geotecnici, per ricerche minerarie e anche per dare un valore del grado di scavabilità del terreno; i risultati devono preferibilmente essere correlati con indagini di tipo diretto. La sismica a rifrazione tradizionale fornisce risultati leggibili e interpretabili quando le formazioni litologiche hanno caratteristiche elastiche crescenti con la profondità, mentre non da indicazioni stratigrafiche quando con l'aumentare della profondità vi sono formazioni con caratteristiche elastiche inferiori (formazione fantasma). Questo limite dell'indagine viene superato con i modelli di inversione tomografica utilizzati nel presente lavoro.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde sismiche è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

1. Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
2. Ricostruzione delle dromocrone e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;
3. Verifica della coerenza tra domocrone interpretate e calcolate;
4. Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo tomografico.

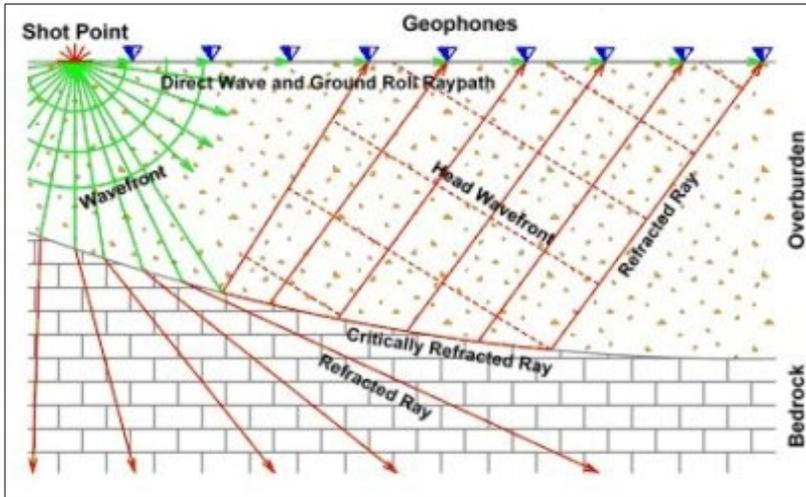


Fig. 1 Schema sismica a rifrazione

La strumentazione utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, 24 canali, range dinamico 144db e output dei dati in SEG-Y o SEG-2.

Caratteristiche tecniche - 1 to 24 channels per unit - Weatherproof enclosure	
A/D conversion	24 bit high-speed sigma delta converters
Dynamic Range	144 dB (system) -Greater than 118 dB (measured at 2 msec)
Bandwidth	DC to 15 KHz - Analog filter flat response to 8000Hz - Digital filter bandwidth=85% of Nyquist frequency
Common Mode Rejection	Greater than 100 dB
Crosstalk	Better than 125 dB
Noise Floor	0.2 microvolt RMS noise (2msec sample rate)
Trigger accuracy	+/- 1microsecond at all sample rates
Maximum Input Signal	Standard (x 2 gain) 3.58 Volts peak to peak - (optional: (x 1 gain) 7.16 Volts peak to peak
Input Impedance	100 K Ohms
Preamplifier Gains	X2 (6dB) and x32 (30 dB) standard; software selectable (x1 (0 dB) and x16 (24 dB) available on special request)
Anti-alias Filters	85% of Nyquist frequency
Digital Filters	Low Cut – User Selectable frequency. Notch – 50 or 60 Hz standard; User Selectable. High Cut - User Selectable
Sample Interval	0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 millisecond
Sample Frequency	48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5 sample/second

L'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation).

L'energizzazione del terreno, per la generazione delle onde longitudinali, è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter) su piattello di battuta in alluminio.

Per la ricezione delle onde longitudinali (P), durante l'indagine di tomografia sismica, sono stati usati geofoni verticali a corto periodo (14 Hz).



Fig. 2 - Sistema di ricezione e elaborazione – sistema di battuta onde P

Per l'elaborazione e l'interpretazione tomografica è stato utilizzato il programma "Rayfract" sviluppato dalla Intelligent Resources Inc. (Canada), che utilizza come modello di calcolo il WET tomography processin e VET tomography processin.

La prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura del tempo impiegato dalla perturbazione elastica indotta nel terreno, a percorrere la distanza tra sorgente e geofoni. La velocità di propagazione dell'onda longitudinale o trasversale rifratta dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla conformazione dei terreni attraversati. Ne risulta che la relazione velocità dell'onda e distanza sorgente - geofono (dromocrona) consente, applicando degli algoritmi, di risalire agli spessori degli strati del sottosuolo con caratteristiche elastiche differenti. Le procedure di inversione rientranti nella famiglia delle tomografie sono volte a fornire un'immagine dettagliata della distribuzione all'interno della terra di un parametro fisico riconducibile alle misure effettuate. Nel caso della tomografia sismica si otterrà un'immagine relativa alla velocità delle onde sismiche. L'esecuzione della prova tomografica richiede un numero minimo di battute spaziate per almeno un numero di 6 e nel presente ne sono state eseguite 9. La tomografia sismica consente di ottenere un'immagine dettagliata del sottosuolo superando in parte i limiti della sismica a rifrazione tradizionale. Quest'ultima tecnica, infatti, non consente di individuare forti variazioni laterali di velocità, risente in modo catastrofico delle inversioni di velocità e la presenza di gradini viene male interpretata. La tomografia sismica consente di superare questi problemi. Inoltre, si presta a individuare i sistemi di fratture nel substrato, a individuare la presenza di oggetti sepolti (cunicoli, fondazioni, vasche), a delimitare il volume dei corpi di frana o di discariche. Per l'elaborazione si è utilizzato il software Rayfract, in grado di elaborare una tomografia basata sul modello di calcolo WET (Wavepath eikonal travelttime) che consente di ottenere sezioni tomografiche ad alta risoluzione in terreni topograficamente irregolari e substrati con morfologia complessa caratterizzati da variazioni laterali di velocità. Il modello di calcolo consente un'ottimizzazione non lineare dei tempi di arrivo dei travel-time delle onde sismiche dirette e rifratte registrate.

Il processo di calcolo è basato sull'elaborazione e sviluppo delle seguenti fasi:

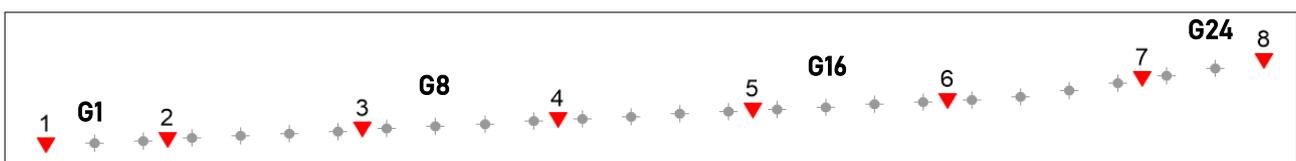
1. Ricostruzione del gradiente di velocità (stratigrafie di velocità sismica) attraverso la tecnica di inversione Delta-t-V, con la quale si ottengono dei profili 1D "profondità-velocità" dai dati di travel-time. La tecnica di inversione Delta-t-V permette di ricostruire con cadenza pari alla metà della cadenza dei geofoni (CMP = Common Mid Point) le successioni di velocità compatibili con l'andamento di tutte le possibili dromocrone nei punti intermedi tra punto di tiro e geofono. Dal modello ricostruito come successione di stratigrafie di velocità viene elaborato un modello ad elementi finiti di piccolissime dimensioni che può già rappresentare un attendibile modello del sottosuolo. Tuttavia questo rappresenta una prima approssimazione alla soluzione.
2. Elaborazione dell'inversione tomografica, in maniera iterativa, del modello Delta-t-V mediante la tecnica 2D WET (Wavepath Eikonal Traveltime). La teoria in proposito basa i modelli tomografici sulla modellizzazione del percorso di un fascio di raggi per ogni primo arrivo, contrariamente a quanto previsto con la tomografia convenzionale basata sulla modellizzazione del percorso di un raggio sismico per ogni primo arrivo. In pratica si effettua il calcolo delle differenze dei tempi di arrivo dai vari punti di tiro ai vari geofoni, tra i valori sperimentali misurati nei sismogrammi ed i tempi calcolati sul modello di partenza. In base alle differenze riscontrate, per ciascun percorso delle onde sismiche, si apportano modifiche, in aumento o in diminuzione, delle velocità che caratterizzano i vari elementi che sono stati interessati dal passaggio del fronte d'onda considerato. Ad ogni iterazione, dopo avere apportato le modifiche alle velocità dei vari elementi, il nuovo modello viene sottoposto ad una operazione di smoothing che porta ad una migliore omogeneità dei valori di velocità entro aree di dimensioni maggiori. In genere sono sufficienti da 10 a 20 iterazioni per giungere ad un modello che porta a scarti medi tra i tempi (Traveltime) dei vari percorsi dell'ordine di qualche millisecondo (Schuster & Quintus-Bosz,1999).

I risultati vengono graficamente rappresentati con una sezione in cui le diverse scale cromatiche indicano le diverse velocità delle onde V_p misurate, con soluzione di continuità, differentemente dalla rappresentazione con il metodo GRM, dove gli stacchi tra un sismostrato e l'altro sono bruschi e repentini.

3) STENDIMENTO SISMICO A RIFRAZIONE

Lo stendimento è stato posizionato in accordo con la committenza, con passo geofonico da 2 metri, e con distribuzione di otto punti di battuta. Sono stati utilizzati 24 canali in ricezione.

Per una migliore comprensione si riporta uno schema grafico dove in rosso sono indicati i punti di battuta e in grigio i geofoni.



STENDIMENTO COORDINATE WGS		
Geofono 1	40.545995°N	8.628271°E
Geofono 24	40.546215°N	8.628735°E



Fig. 3 – Localizzazione sismica

I dati ottenuti in campagna hanno permesso, attraverso l'elaborazione delle dromocrone e l'individuazione dei primi arrivi, la costruzione di un modello tomografico con l'andamento delle velocità delle onde P – longitudinali.

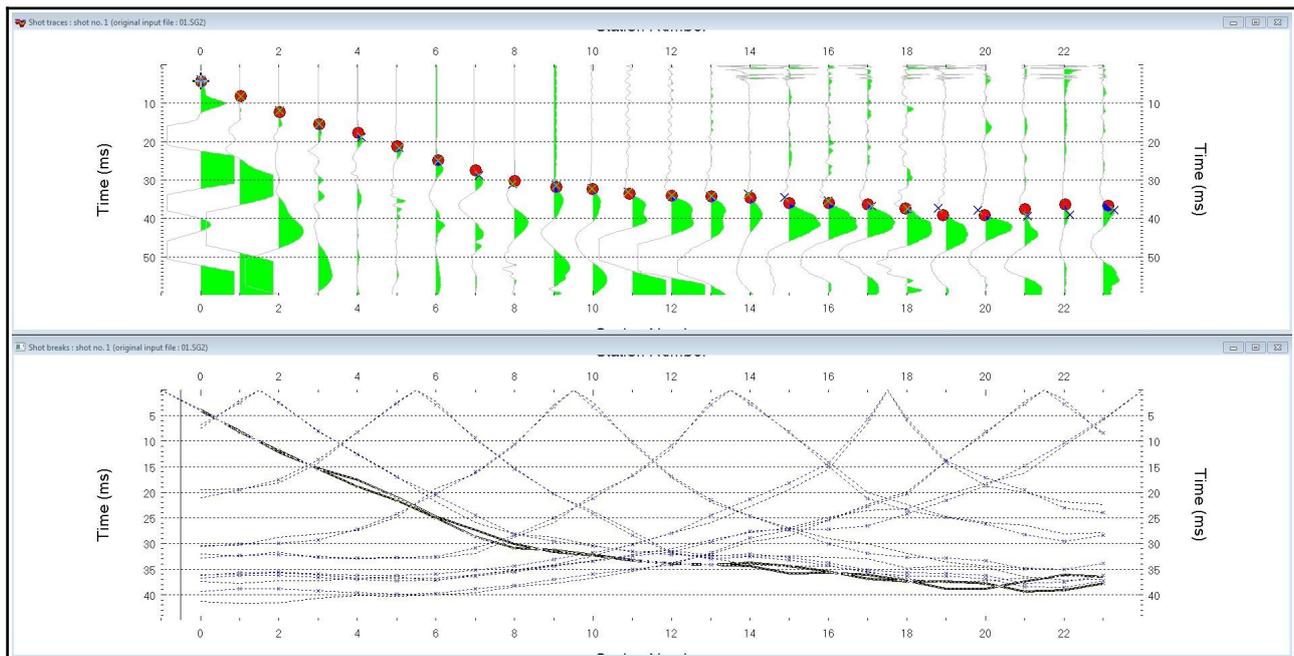


Fig. 4 – Shot n°1 – in rosso i primi arrivi

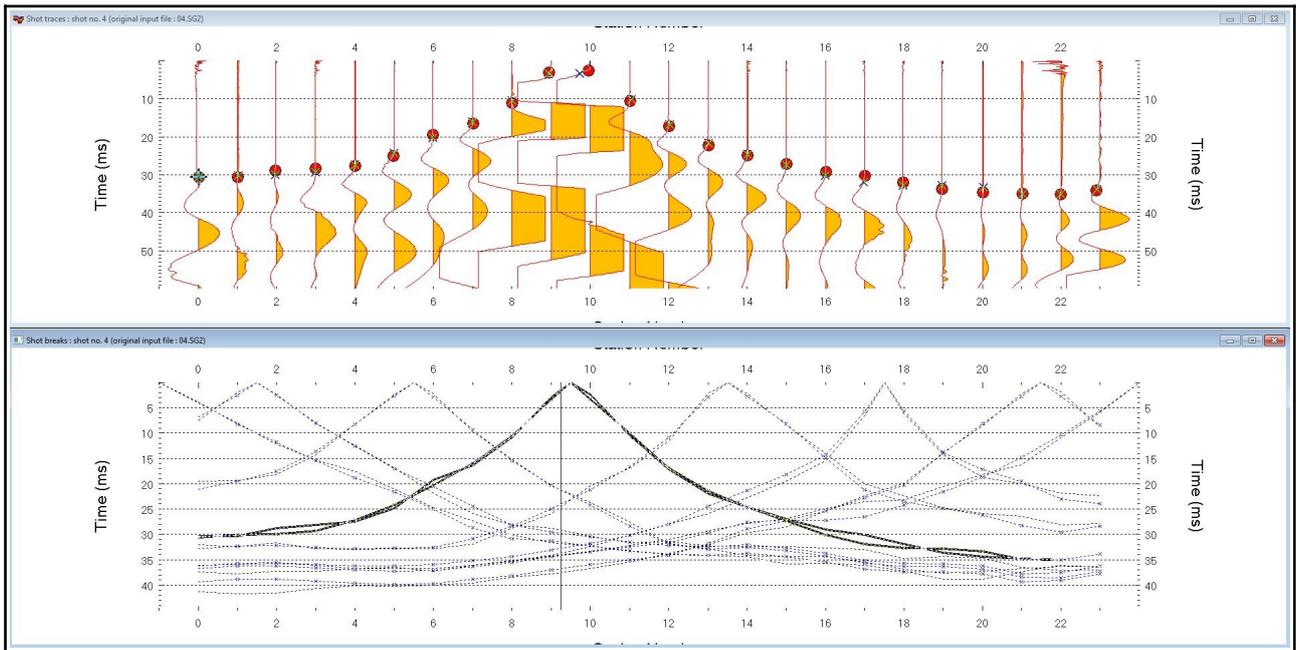


Fig. 5 – Shot n°4 – in rosso i primi arrivi

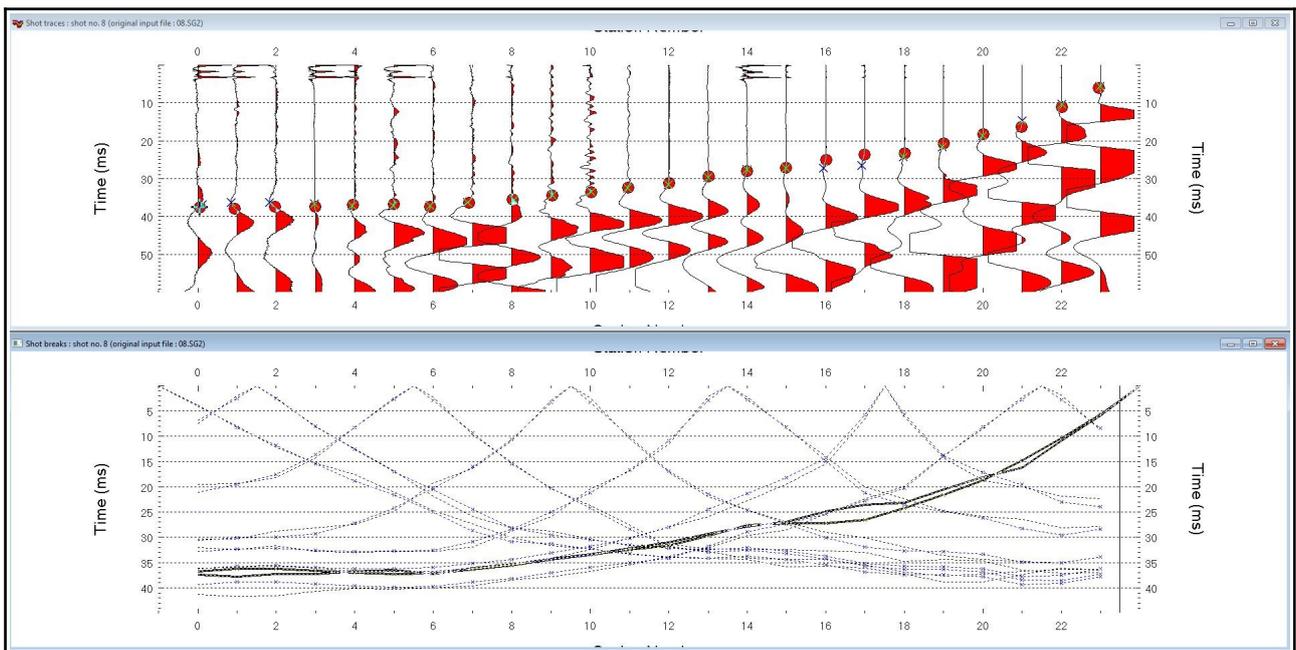


Fig. 6 – Shot n°8 – in rosso i primi arrivi

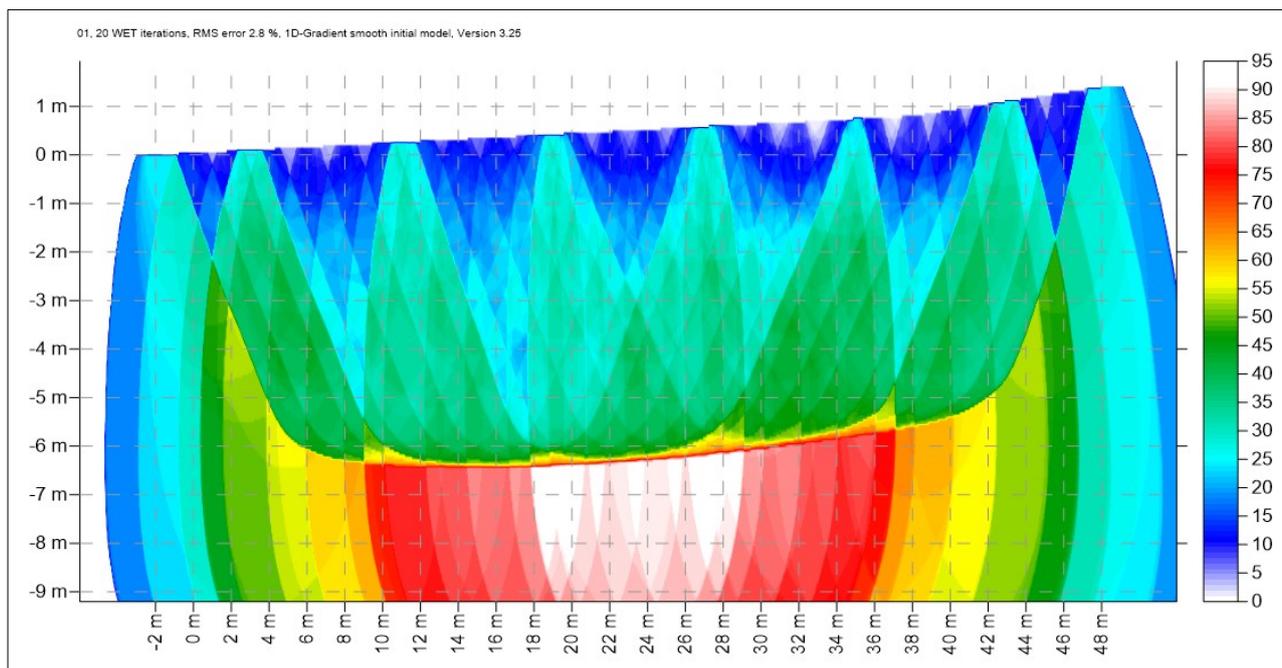


Fig. 7 – rappresentazione delle rifrazioni sismiche registrate

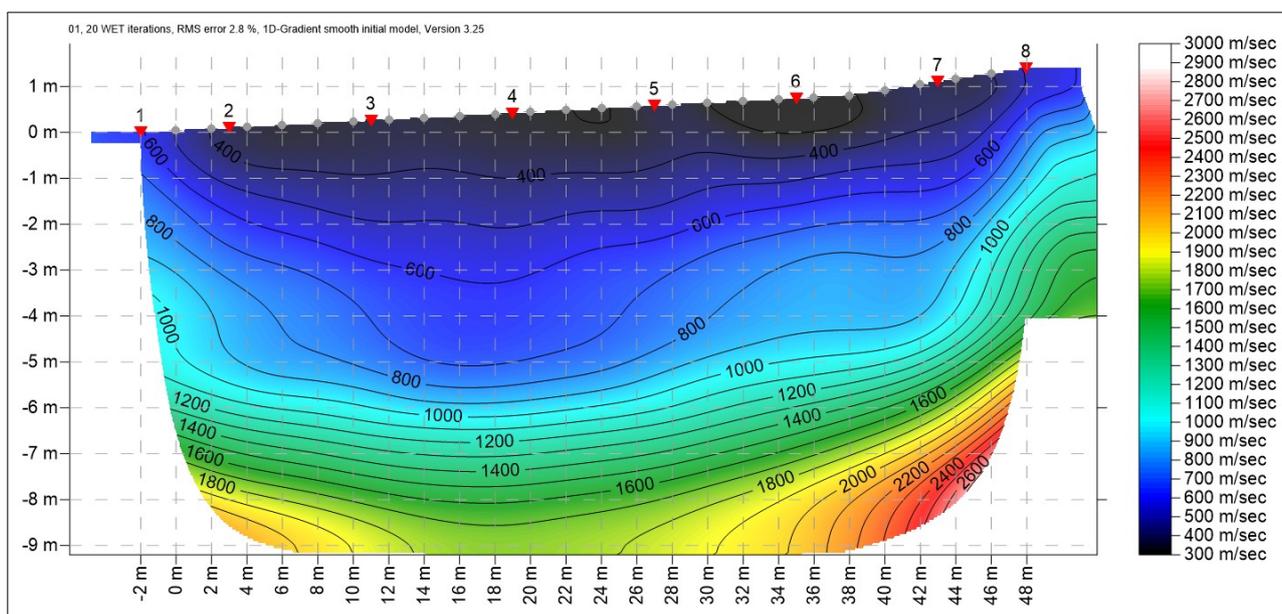


Fig. 8 – Sezione tomografica

La sezione tomografica evidenzia un graduale aumento della velocità con l'aumentare della profondità. Il primo sismostrato che si inspessisce nel settore centrale raggiungendo profondità stimate di 2,8 metri si caratterizza per velocità sempre inferiori ai 600 m/sec, associabili a formazioni argillose derivanti dalle alterazioni delle vulcaniti. Al di sotto di questo livello si ha un graduale aumento di velocità arrivando alla profondità massima di 6,2 metri con delle velocità medie di 760 m/sec e massime di 1000 m/sec associabile in letteratura a formazioni tufitiche poco saldate. Al di sotto si hanno velocità medie di 1500 m/sec associabili a formazioni vulcaniche compatte.

3.1) Valutazione escavabilità terreni

L'utilizzo di alcune tabelle, che correlano la velocità delle onde P e il grado di rippabilità e escavabilità delle formazioni, permettono la determinazione del grado di approfondimento per escavazione senza l'ausilio di esplosivo. Esiste, infatti, una significativa correlazione tra la velocità con cui le onde sismiche a compressione attraversano la roccia e l'efficienza di scavo delle macchine utilizzate. La velocità di queste onde sismiche è strettamente legata al grado di compattezza, di alterazione e di fratturazione dei materiali attraversati.

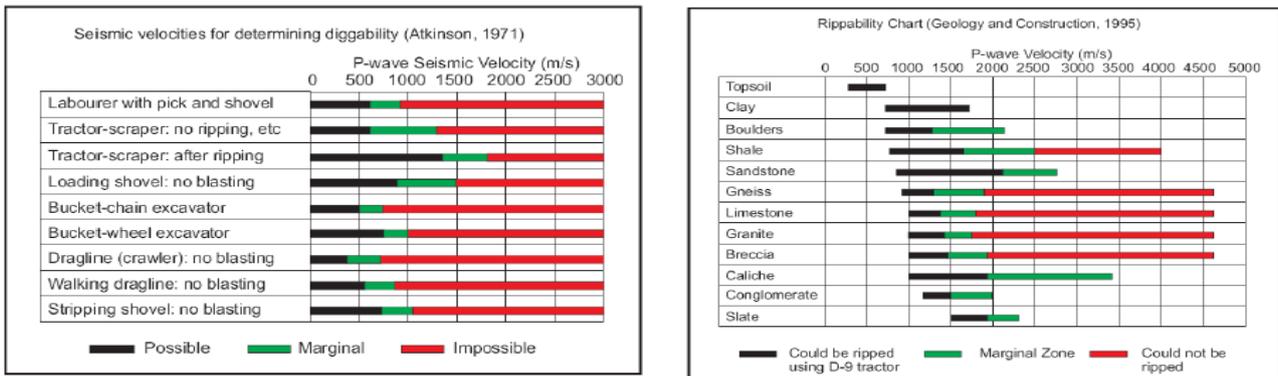


Fig. 9 – Tabelle di escavabilità e rippabilità

La prima tabella evidenzia la possibile escavabilità dei terreni con l'utilizzo di un escavatore con pala a cucchiaio, indipendentemente dalla litologia, per quei sismo-strati che hanno velocità massime di 900 m/sec. Al di sopra di questa velocità e per valori massimi di 1.400 m/sec si deve far utilizzo di martelloni pneumatici.

La seconda tabella considera la rippabilità dei terreni (associati per similarità a sabbie densissime) con una macchina operatrice D9 della Caterpillar, che risulta possibile per valori massimi di velocità dell'onda sismica longitudinale V_p pari a 2.000 m/sec, mentre si esegue con estrema difficoltà per valori compresi tra i 2.000 m/sec e i 2.500 m/sec.

La figura riportata a lato mostra un diagramma per determinare l'efficienza di scavo (volume scavato in $m^3/20$ min) in relazione alla velocità delle onde di compressione (Shimoto et alii, 1970, da OYO Corporation 1978). La comparazione mostra che l'efficienza di scavo di una pala o del ripper diminuisce in funzione dell'aumento di velocità delle onde di compressione.

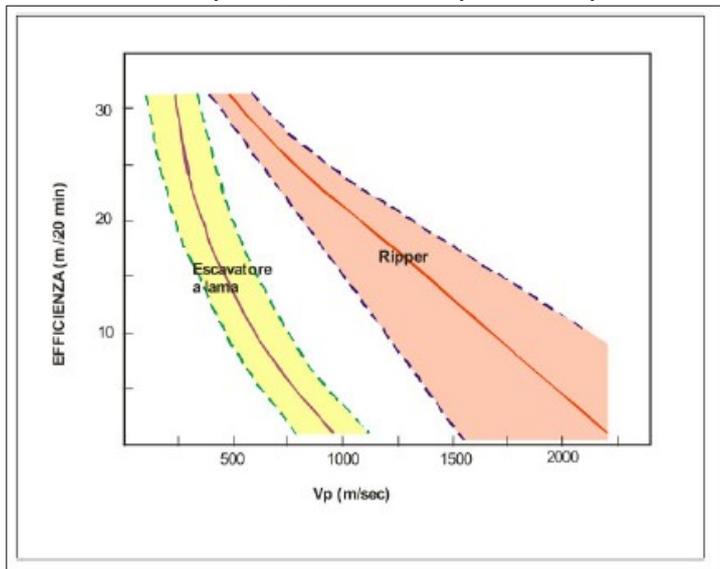


Fig. 10 – Grafico di escavabilità e rippabilità

Velocity (m/s)	Rippability
< 1050	Easily Ripped
1050 – 1500	Moderately Difficult
1500 – 2000	Difficult Ripping / Light Blasting
> 2000	Blasting Required

Table 1. Standard Caltrans Rippability Chart

Altri studi più cautelativi hanno messo in relazione la velocità delle onde longitudinali nel terreno con la loro escavabilità.

I dati evidenziati dalle correlazioni sopra riportate e le velocità delle onde di compressione registrate nei due profili tomografici evidenziano come i terreni siano escavabili con una buona efficienza sino a profondità comprese tra 1,5 metri e 6,5 metri a seconda del settore elaborato con la tomografia.

4) INDAGINI SISMICHE MEDIANTE ONDE DI SUPERFICIE

Le NTC 2018 prescrivono una stima della velocità di propagazione delle onde S nel sottosuolo e tra le indagini indirette, che hanno maggiore diffusione si annoverano le tecniche basate sull'analisi della dispersione delle onde di superficie (Rayleigh). La dispersione rappresenta una deformazione generata da un treno d'onde, dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. In un mezzo stratificato le varie componenti (lunghezza d'onda, quindi frequenza $\lambda = v/f$) del segnale sismico si propagano ad una velocità diversa in funzione delle caratteristiche del mezzo. Le componenti a frequenza minore (lunghezza d'onda maggiore) penetrano più in profondità e sono quindi influenzate dagli strati più profondi rispetto a quelle a frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore) che risentono delle proprietà fisiche dei livelli superficiali e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio V_s sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato. La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

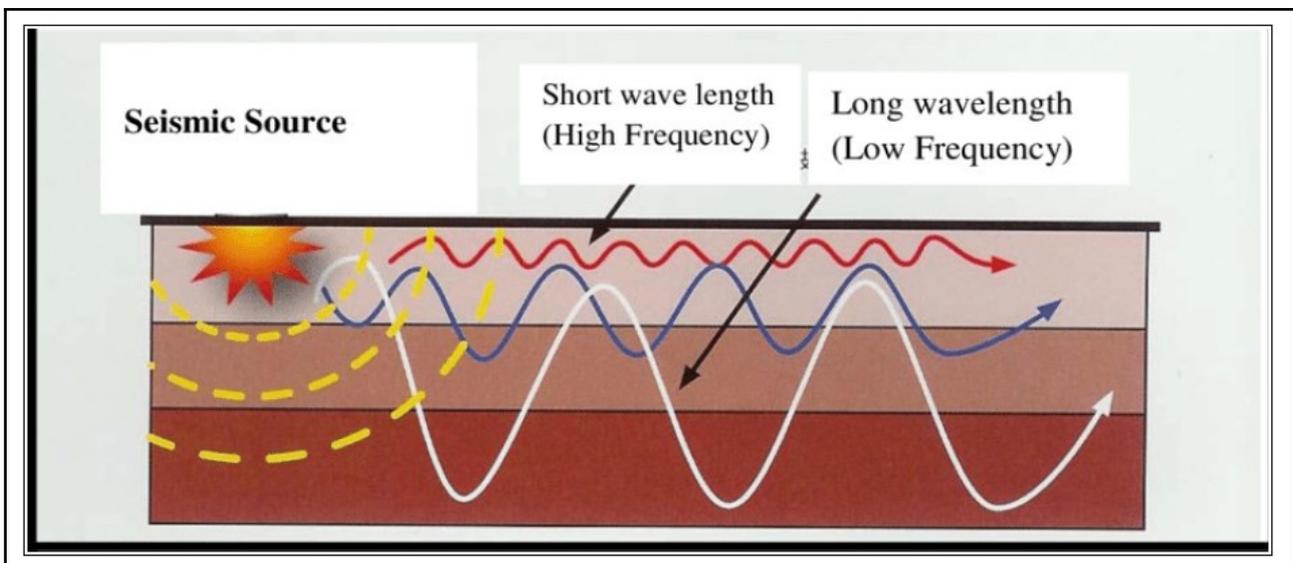


Fig. 11 – Schema di dispersione delle onde di Rayleigh

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane nella modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo è composto da tre fasi consecutive:

- acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Il range di frequenza utilizzato si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 50 Hz, fornendo informazioni sino alla profondità massima di penetrazione, determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e la più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono. L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S. L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

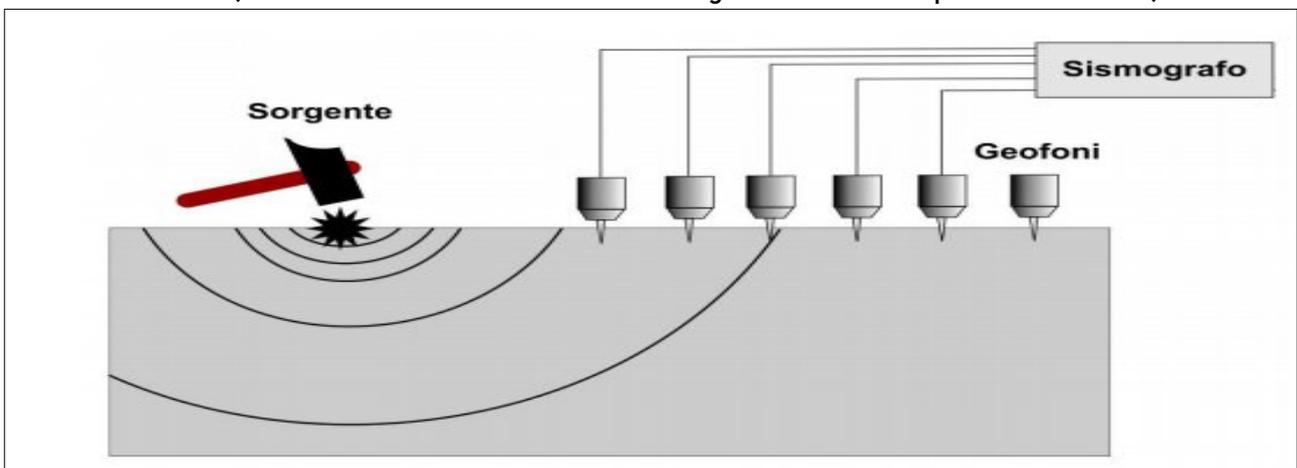


Fig. 12 – Rappresentazione modalità di acquisizione

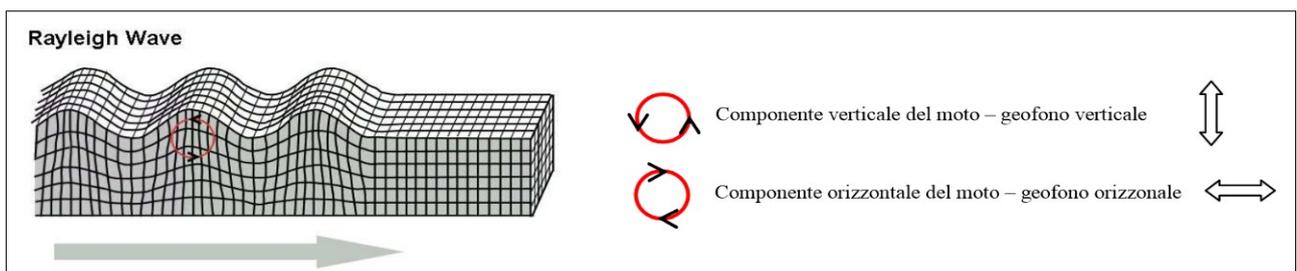


Fig. 13 – Rappresentazione delle onde superficiali

La prova è stata eseguita lungo lo stendimento della tomografia sismica.

L'analisi è stata eseguita adottando la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 14 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2 m per complessivi 46 m di stendimento;
- Offset di battuta: n° 1 battuta disposta a 4 m esterna dal primo geofono.

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Tempo di acquisizione: 1 s;
- Frequenza di campionamento: 1000 Hz;
- Periodo di campionamento: 1.0 ms.

I dati acquisiti sono stati elaborati attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità;
2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo;
4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

L'elaborazione dei dati è stata fatta una volta definita la curva di dispersione. I dati sono stati processati attraverso il codice Seismager (Pickwin v. 3.14 WaveEq v. 2.07).

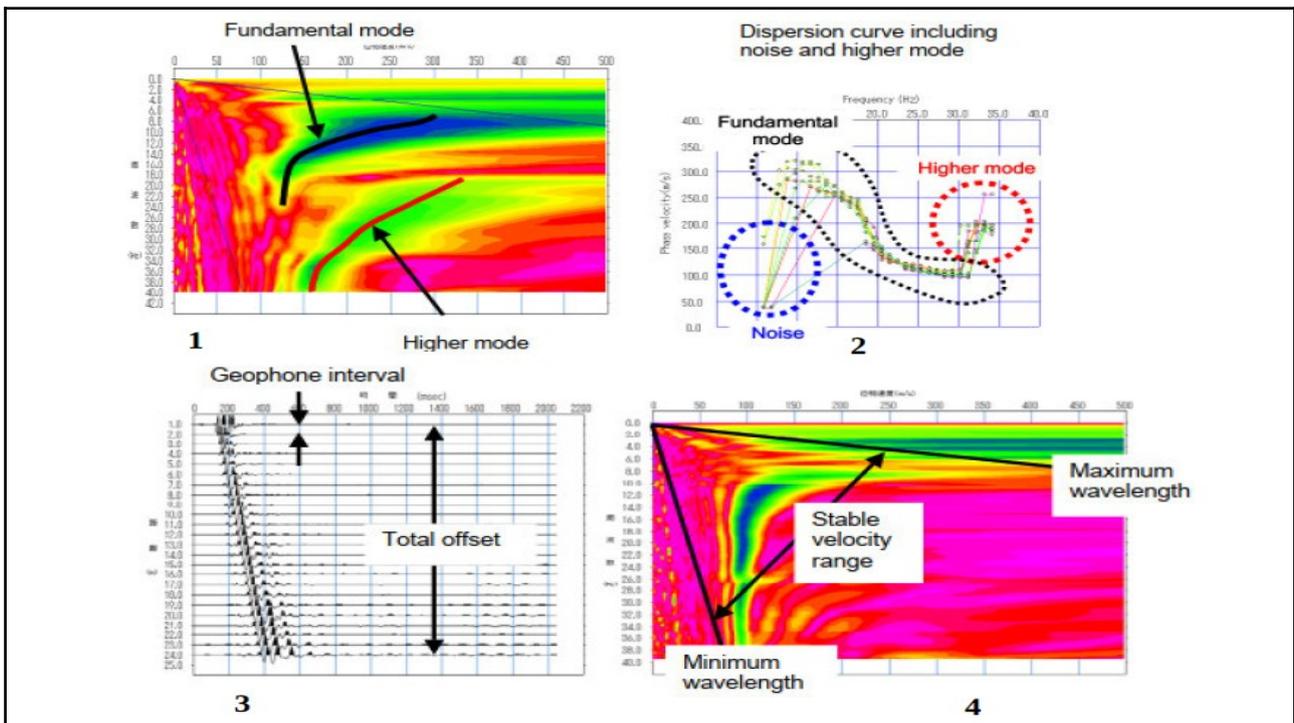


Fig. 14 – Grafici di elaborazione

La gamma di frequenza entro la quale la velocità di fase è considerata stabile corrisponde all'intervallo del ricevitore o geofono e l'offset totale per i rilevamenti sorgente attivi (e array lunghezza per indagini sulla fonte passiva). L'intervallo del geofono e l'offset totale in generale si riferiscono alla lunghezza d'onda della metà, il che significa che la lunghezza d'onda minima campionata per qualsiasi dato rilevamento è circa due volte l'intervallo del geofono e il massimo della lunghezza d'onda campionata e circa due volte l'offset totale. I valori di dispersione appartenenti a disturbi a bassa frequenza e ai modi superiori sono stati esclusi dall'interpretazione del profilo di velocità.

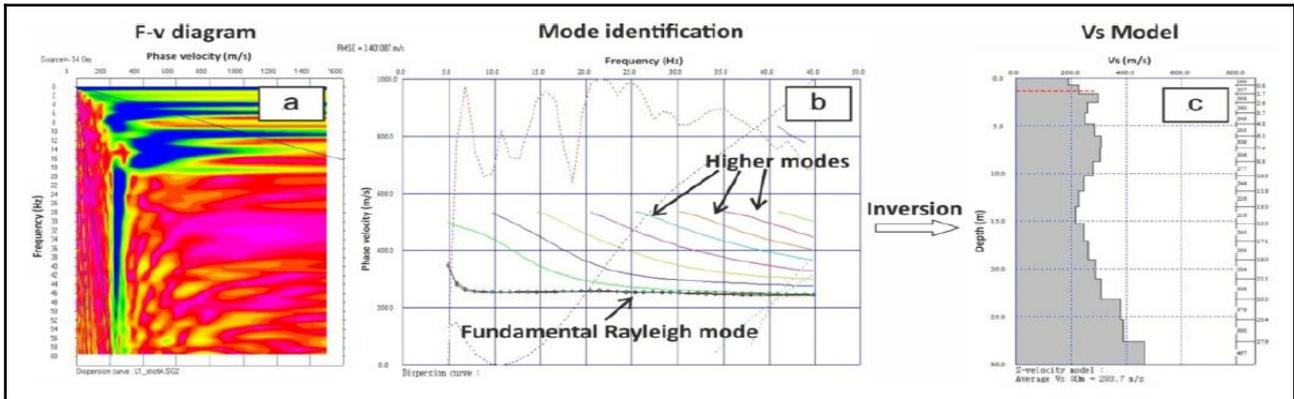


Fig. 15 – Grafici di correlazione della curva fondamentale e processo di inversione

La gamma di frequenza è rappresentata sul grafico della velocità di fase da linee nere (mostrate nel grafico 16 alla pagina precedente) con pendenze che corrispondono alle lunghezze d'onda minima e massima.

La curva di dispersione si presenta ben interpretabile sino ai 45 Hz.

L'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti è stata effettuata utilizzando un modello semplificato composto da 7 sismostrati.

Strati	Spessore strato (m)	Vs (m/sec)
A	2,7	163
B	2,4	232
C	4,6	534
D	5,4	285
E	6,3	475
F	7,3	767
G	-	966

Nel calcolo della “Velocità equivalente” $V_{s_{eq}}$ si è tenuto conto di tutti gli strati rilevati al di sopra del basamento sismico (velocità maggiore di 800 m/sec). La $V_{s_{eq}}$ rappresenta, dunque, la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{s_{eq}} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s_{(strato)}}}}$$

Dove:

- N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h(\text{strato})$ e dalla velocità delle onde $S V_s(\text{strato})$;
- H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, come nel caso in studio, 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.

Il parametro V_{seq} consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018.

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
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.
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
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.

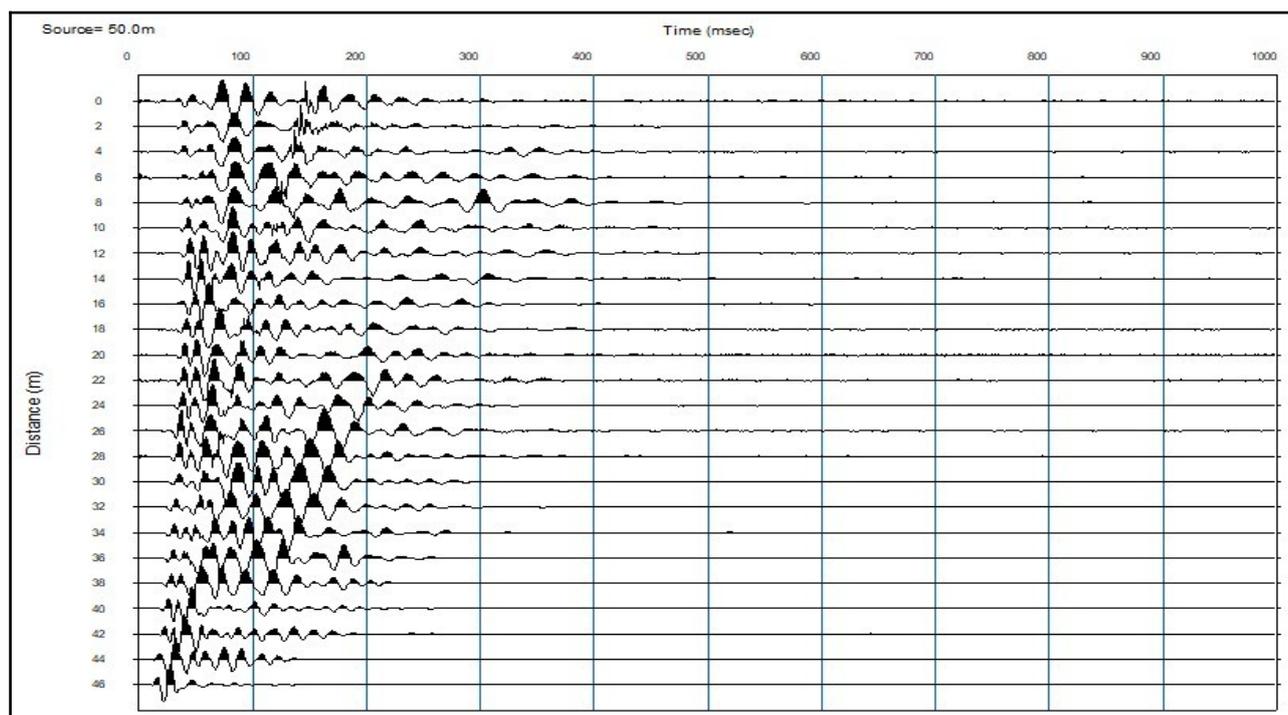


Fig. 16 – Sismogrammi in acquisizione

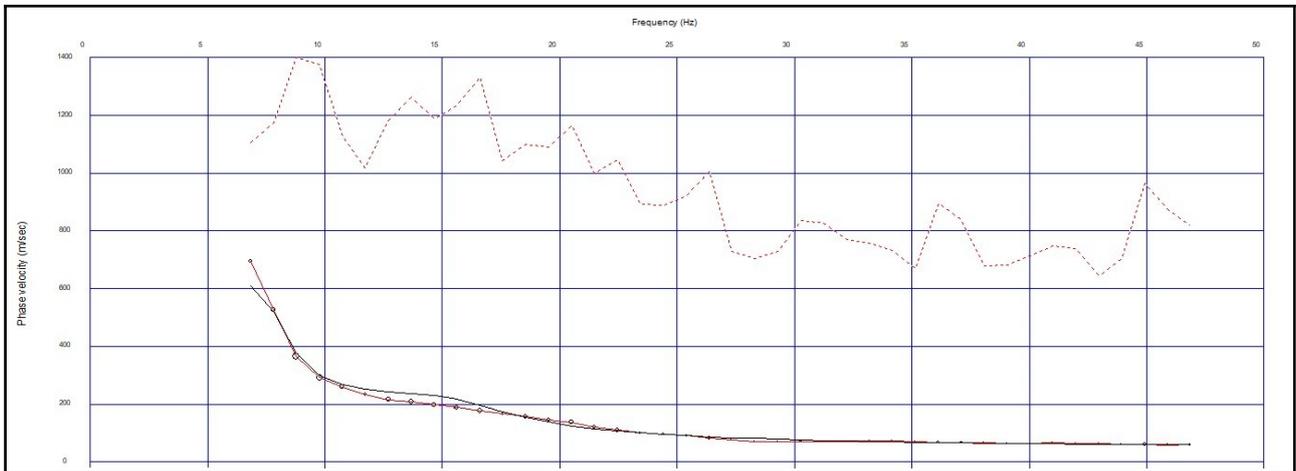
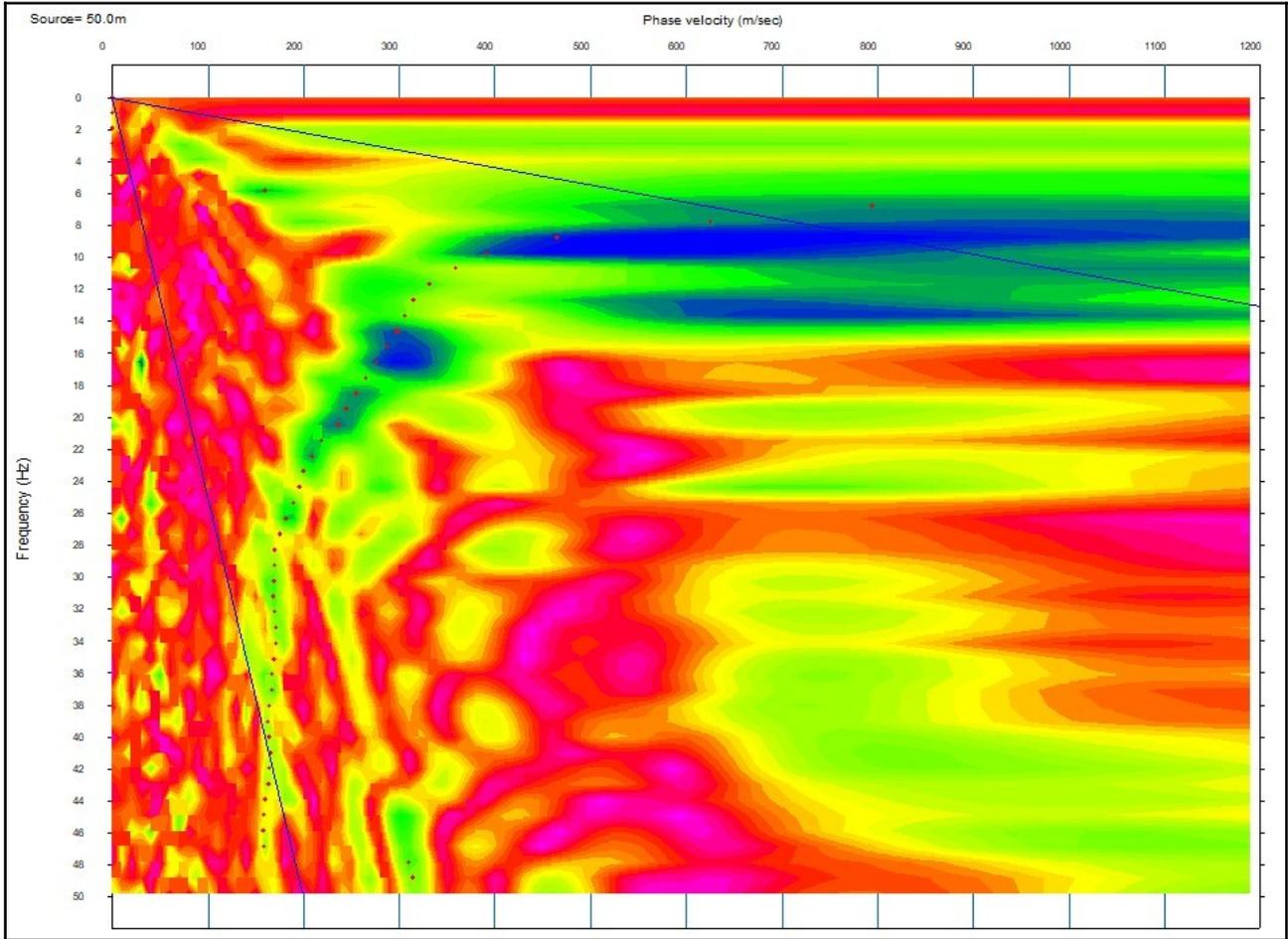


Fig. 17 – Curva di dispersione e curva di dispersione correlata

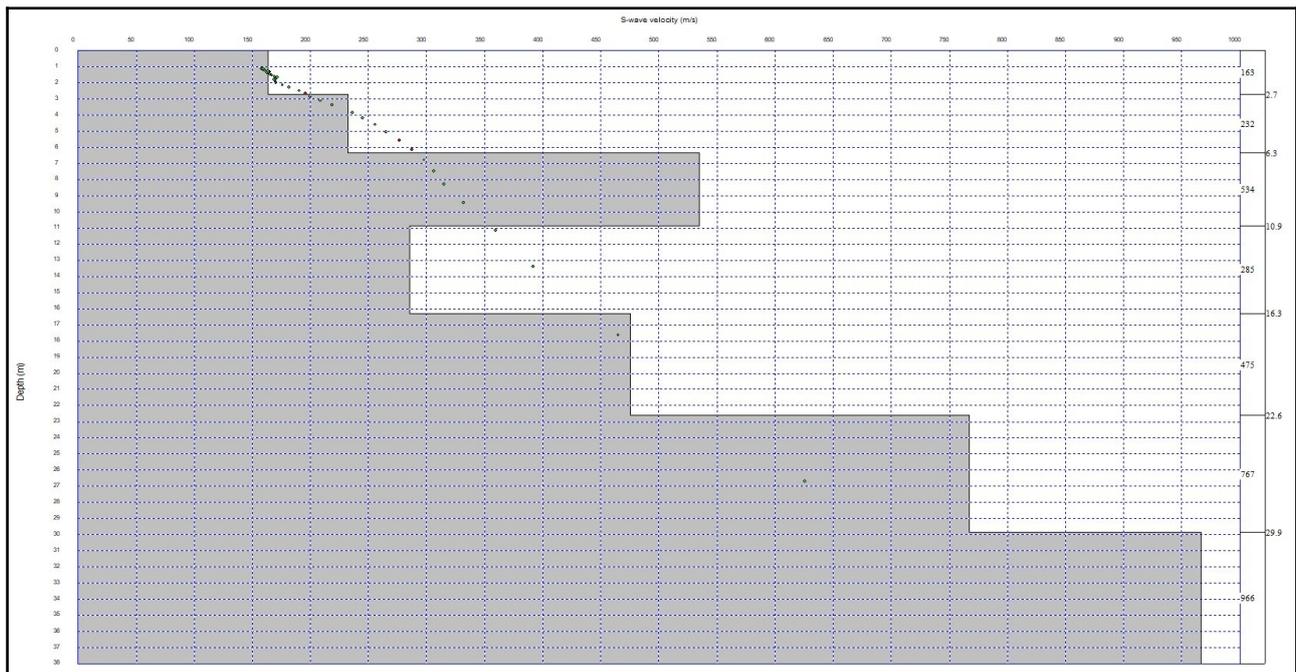


Fig. 18 – modello stratigrafico delle Vs

Sulla base della stratigrafia ottenuta, considerando come riferimento il piano campagna, la $V_{s_{eq}}$ (NTC 2018) risultante è pari a 371,51 m/s.

Tali caratteristiche classificano il terreno di fondazione (NTC 2018) alla categoria B.

Resta sempre in capo al progettista l'utilizzo della categoria di sottosuolo di riferimento da utilizzare in funzione del piano di fondazione di riferimento. Si evidenzia un andamento generale crescente delle caratteristiche elastiche dei terreni con la profondità.

5) MODELLO INTERPRETATIVO DELLE INDAGINI

Le indagini indirette di tipo geofisico hanno dato risposte concordanti nei primi 9,5 metri, profondità, limite dettato dai risultati della tomografia sismica. Si evidenzia come le due indagini siano sovrapposte e come la MASW sia rappresentativa del punto centrale dello stendimento.

In particolare si rileva come per circa 2,7 metri di profondità si abbiano dei sismorifattori con basse velocità associabili ad argille e suoli derivati dall'alterazione delle formazioni vulcaniche. Al di sotto sino alla profondità di circa 6,3 metri si evidenziano sempre scarse caratteristiche elastiche con velocità delle onde di compressione e di taglio compatibili con formazioni piroclastiche scarsamente saldate. Ultimo livello in cui si sovrappongono le due indagini evidenziano invece delle caratteristiche elastiche migliori associabili sempre a rocce tenere e compatibili con formazioni piroclastiche coerenti e/o saldate.

La stratigrafia è regolare con approfondimento del primo sismorifattore nella parte centrale, con spessore massimo dei suoli e/o delle argille per 2,8 metri.

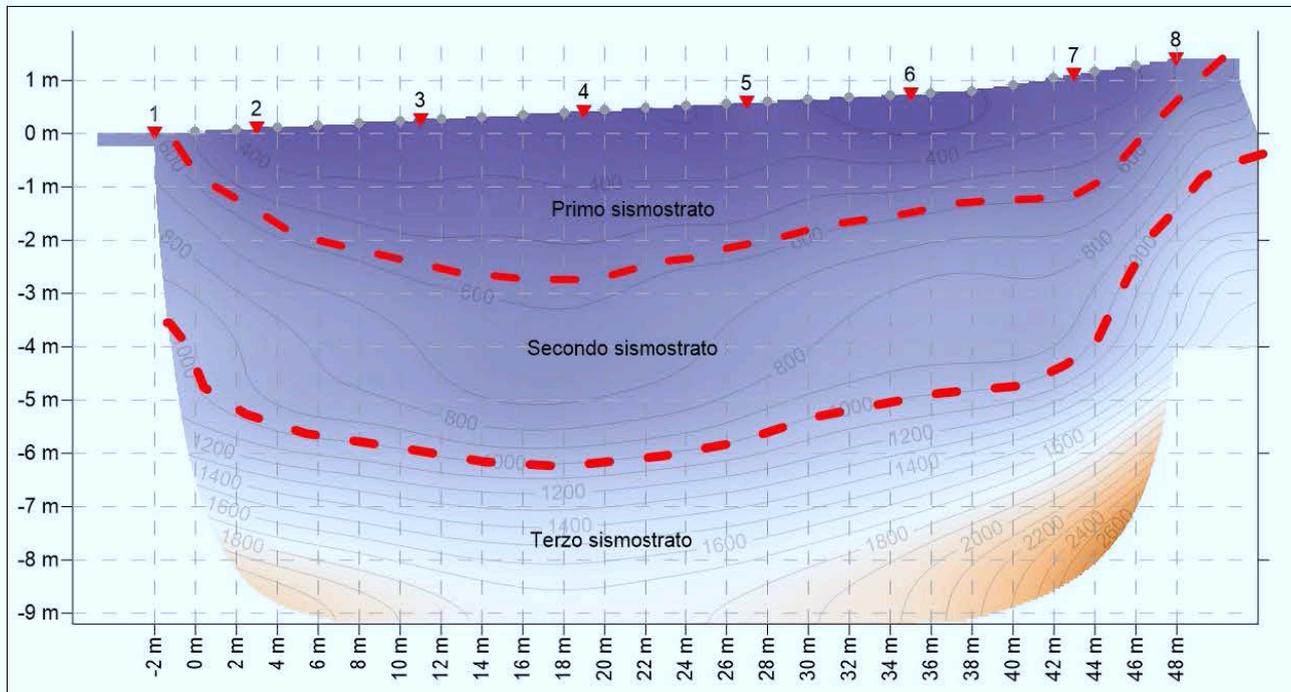


Fig. 19 – sezione tomografica interpretata

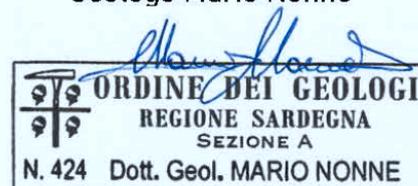
A titolo indicativo si possono evidenziare dei parametri geotecnici di massima ricavati da formule interpolate sulla base dei parametri elastici rilevati con le prove geofisiche.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P	H	Vp	Vs	γ	ν	G	Ed	E	Ev	R	F	T	d ₅₀	Fi	Cu
[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[kN/m ³]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[Hz]	[s]	[mm]	[°]	kPa
2,7	2,7	400	163	15,4	0,40	42	251	117	195	2504	110	0,066	0,02	17	62
6,3	3,6	760	232	16,8	0,45	92	988	267	866	3893	209	0,062	0,10	23	130
10,9	4,6	1500	534	20,7	0,43	601	4743	1716	3941	11038	614	0,034	2,97	42	751
16,3	5,4	800	285	17,7	0,43	146	1153	418	958	5035	385	0,076	0,23	27	200
22,6	6,3	1200	475	20,1	0,41	462	2948	1300	2332	9535	748	0,053	1,85	38,7	587

1 Profondità letto strato	9 Modulo di Young
2 Spessore strato	10 Modulo di compressibilità volumetrica
3 Velocità onde P	11 Rigidità o impedenza sismica
4 Velocità onde S	12 Frequenza fondamentale
5 Densità	13 Periodo fondamentale
6 Modulo di Poisson	14 Diametro medio granuli (valido per sabbie)
7 Modulo di deformazione al taglio	15 Angolo di resistenza al taglio
8 Modulo di compressibilità edometrica	16 Coesione non drenata

Ollolai, 19/02/2022

IL TECNICO
Geologo Mario Nonne



6) ALLEGATO FOTOGRAFICO

