

REGIONE BASILICATA
PROVINCIA DI POTENZA
COMUNE DI VENOSA



PROGETTO DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO E DELLE RELATIVE
OPERE DI CONNESSIONE DA REALIZZARE NEL
COMUNE DI VENOSA IN LOCALITÀ BOREANO
DI POTENZA PARI A 19.996,20 kWp (19.993,87 kW IN IMMISSIONE)
DENOMINATO "AGRIVOLTAICO VENOSA BOREANO"

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GEOLOGICA



livello prog.	Cod.	tipo doc.	N° elaborato	N° foglio	Tot. fogli	NOME FILE	DATA	SCALA
PD	202102255	R	A10			AGRIVEN_A10	20/12/2022	-

REVISIONI

REV.	DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO

PROPONENTE:

EDISON RINNOVABILI S.P.A.
Foro Buonaparte 31 - 20121 Milano (MI)
P.IVA n. 12921540154 / REA MI-1595386



TIMBRO ENTE

PROGETTAZIONE:

HORIZON FIRM

PROFESSIONISTA INCARICATO:

Dott. Geol. Giovanna Amedei

FIRMA PROFESSIONISTA



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

INDICE

1- Premessa	Pag. 2
2- Inquadramento geografico dell'area	Pag. 6
3- Inquadramento geologico strutturale	Pag. 8
3.1 – Geologia Generale	Pag. 8
3.2 – Geologia di Dettaglio	Pag.11
3.3 – Geomorfologia ed Idrogeologia	Pag. 15
4- Sismicità	Pag. 18
5- Indagini Eseguite	Pag. 24
5.1 – Prove Sismiche e MASW	Pag. 26
6 – Caratteristiche Litotecniche del Terreno	Pag. 29
7 – Considerazioni conclusive	Pag. 32

APPENDICE

Allegato 1	Risultati Indagini eseguite
-------------------	------------------------------------



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

- 1 - PREMESSA

Su incarico ricevuto dalla Società Edison Rinnovabili Spa, con sede legale in Via Foro Bonaparte n. 31 – 20121 Milano (MI) - P.IVA n. 12921540154 / REA MI-1595386 - la scrivente, *Dott.ssa Giovanna Amedei*, Geologa, iscritta all'O.R.G. della Puglia al n. 438 e con studio professionale in Rodi Garganico, alla Via Pietro Nenni n. 4, ha eseguito gli studi e redatto la presente relazione volta alla definizione del quadro geologico, geologico-tecnico ed ambientale dei terreni interessati dal "Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

In particolare il progetto prevede la realizzazione di un impianto agrivoltaico di potenza pari complessivamente a 19.996,20 KWp e con potenza di immissione pari a 19.993,87 kW, il tutto secondo le caratteristiche tecniche e progettuali descritte nella Relazione Tecnica, parte integrante dell'intera progettazione.

Il presente studio geologico s'inserisce nell'ambito dei quadri conoscitivi del sistema territoriale locale, ed è stato articolato sulla base dei seguenti principali elementi di valutazione geologico-tecnica:

- Inquadramento geologico dell'area, per la definizione delle



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

caratteristiche geologiche, tettonico/strutturali generali, geomorfologiche e idrogeologiche generali - [pericolosità geologica del territorio];

- Rilevamento geologico di dettaglio, di un'area sufficientemente ampia, entro la quale ricade l'intervento in oggetto, per la definizione geologica, geomorfologica, idrogeologica locali, con particolare riferimento alla caratterizzazione della natura e del tipo di strutture sedimentarie dei corpi geologici presenti - [controllo litologico di dettaglio];
- Riferimenti a indagini geognostiche e geotecniche esistenti, eseguite nell'ambito del territorio comunale per la definizione delle principali caratteristiche geotecniche e sismiche dei terreni
- Esecuzione di nuove indagini geofisiche e geognostiche con l'obiettivo di puntualizzare le conoscenze geologiche dirette e indirizzare la progettazione in direzione della sicurezza e della migliore efficienza - [accertamento litotecnico].

Per i vincoli di interesse geologico, l'area in esame:

- ✚ ricade in zona sismicamente attiva e legalmente classificata come Zona 2 così come da Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20/03/03.

Dal punto di vista legislativo si sono tenute in debito conto le seguenti normative:

- Legge n. 64 del 02.02.1974. "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche";
- D.M. 11.03.1988 - "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

criteri...";

- Circolare Min. LL. PP. n. 30483 del 24.09.1988 - *"Norme di attuazione del D.M. 11.03.1988"*;
- Circolare Ministero Lavori Pubblici 9 gennaio 1996 n. 218/24/3. Legge 2 febbraio 1974, n. 64. Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 11 marzo 1988. *"Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica"*;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003, n. 3274 - *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*;
- Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 - *"Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 Legge 6 luglio 2002, n. 137 e succ. mod. e integr."*;
- D.Lgs. 152 del 3 Aprile 2006 - *"Norme in Materia Ambientale"* e succ. mod. ed int.;
- Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018 - *"Aggiornamento delle « Norme Tecniche per le Costruzioni"*;
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7 *"Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018"*;
- Legge Regionale 25 gennaio 2001, n. 2 - *Istituzione dell'Autorità di bacino della Basilicata*;



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

- *Regio Decreto 3267/1923 – Istituzione del vincolo idrogeologico;*
- *Regolamento Regionale 11 marzo 2015, n. 9 – "Norme per i terreni sottoposti a vincolo idrogeologico"*



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

2 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA

Il territorio interessato dall'impianto agrivoltaico con le relative opere di connessione ricade nel Comune di Venosa e più precisamente a Nord Est rispetto al Centro abitato in località "Boreano" (Fig. 1)



Fig. 1: Ubicazione delle aree d'intervento

Dal punto di vista catastale le aree, che comprendono impianto e collegamento, sono individuabili secondo il prospetto allegato:



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

<i>Comune</i>	<i>Località</i>	<i>Fgl di Mappa</i>	<i>P.lle</i>
<i>Venosa</i>	<i>Boreano</i>	<i>16</i>	<i>213, 215, 254, 256, 257, 259, 260</i>



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

3- INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

3.1 – Geologia Generale

L'area progettuale geologicamente si colloca nel settore centrale della Fossa Bradanica, avanfossa compresa fra l'Appennino meridionale e l'Avampaese Apulo, e che si estende, da NW a SE, dal Tavoliere delle Puglie all'arco ionico.

Vi affiorano i depositi di riempimento del bacino plio – pleistoceno con la tipica successione di regressione marina rappresentata, dal basso, da argille, sabbie e conglomerati, disposti con un assetto a monoclinale.

Morfologicamente è caratterizzata da colline con la sommità sub pianeggiante delimitate da versanti a pendenza variabile e da ampie pianure alluvionali. Nella figura sottostante si riporta uno schema di inquadramento geologico dell'area di studio (Fig.2)



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

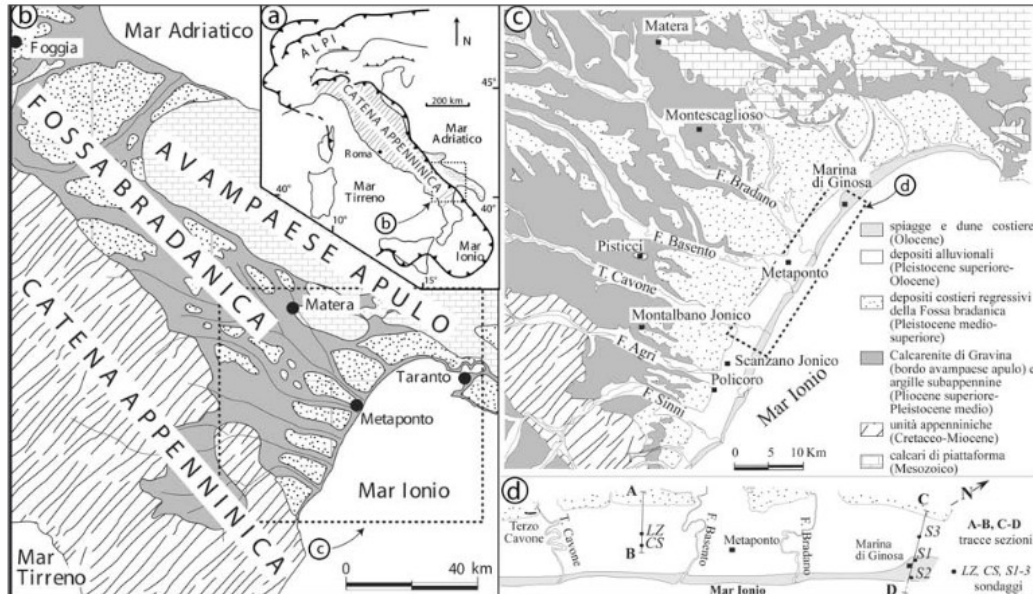


Fig. 2: a) Carta strutturale schematica d'Italia; b) carta geologica schematica della Fossa bradanica; c) carta geologica schematica dei depositi marini terrazzati e della piana costiera metapontina affioranti nella porzione meridionale della Fossa bradanica (da CILUMBRIELLO et al., 2008, leggermente modificata); d) carta schematica dell'area studiata con ubicazione dei sondaggi e delle sezioni geologiche effettuate.

La letteratura geologica è ricca di studi condotti nell'area di Venosa. MIGLIORINI (1937, 1952) con le prime esplorazioni petrolifere dell'Agip, oltre a riconoscere la successione di regressione marina individuò a circa 2000 m lo spessore del riempimento della fossa. Ricerche successive di altri autori (SELLI 1962, CARISSIMO et al. 1963, LENTINI 1967 e MOSTARDINI e PIERI 1967) e soprattutto VALDUGA (1973) hanno consentito di definire dal punto di vista stratigrafi-



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

co i depositi di chiusura del bacino plio –pleistocenico ed associarli alla seguente formazioni geologiche: Argille Subappennine, Sabbie di Monte Marano e Conglomerato di Irsina. Si tratta di una successione che si ripete su tutte le colline ricadenti nell'area della Fossa Bradanica, con i Conglomerati di Irsina presenti nella parte sommitale dei rilievi sub pianeggianti, le Sabbie di Monte Marano che caratterizzano i versanti a pendenza variabile o le aree perisommitali e le Argille Subappennine affioranti nelle parti basse e a pendenza costante dei versanti. Gli strati dei depositi sabbiosi e conglomeratici presentano sempre una giacitura sub orizzontale con una leggera inclinazione verso sud –est.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

3.2 – Geologia di Dettaglio

Dal punto di vista geologico il territorio di Venosa rientra a cavallo tra il Foglio 175 "Cerignola" e il Foglio 187 "Melfi" della Carta Geologica d'Italia a Scala 1:100.000 (Fig. 3). L'area d'intervento, però, è compresa integralmente all'interno del Foglio 175 "Cerignola".

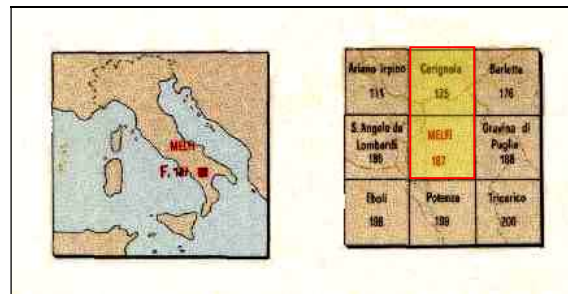


Fig. 3: Inquadramento geologico dell'area

In base alle informazioni ricavate durante il rilevamento geologico di dettaglio, opportunamente integrato con le indagini, si attesta che nell'area in esame i terreni affioranti sono riferibili (Fig. 4) **alla Formazione dei Conglomerati di Irsina** noti in letteratura con la sigla **Qc1**. Si tratta di depositi di ciottolame poligenico con ganga sabbiosa i cui componenti principali sono di natura calcarea, marnosa, arenacea e silicea; non mancano, comunque, elementi di natura ignea, in particolare granitica, mentre sono scarsi quelli metamorfici.

Le dimensioni degli ciottoli varia tra i 5 e 30 cm. Generalmente la formazione si presenta poco compatta oppure localmente è fortemente

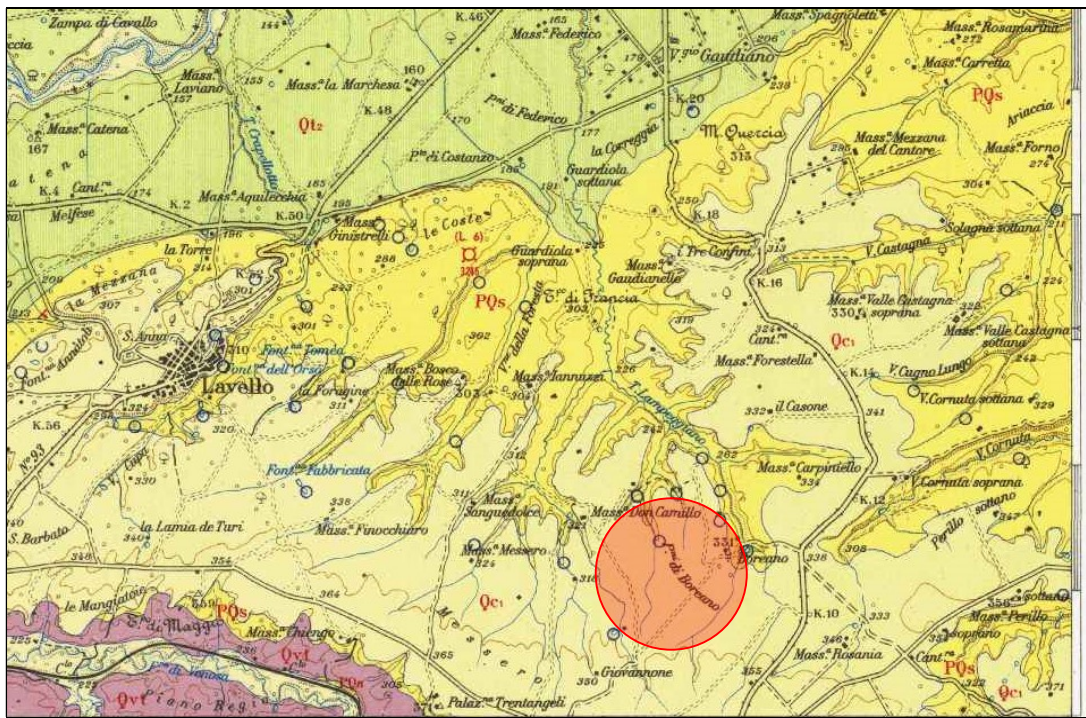


Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

cementata in puddinghe. Nella parte alta della formazione sono presenti concrezioni e crostoni calcarei.

Il Conglomerato di Irsina è il termine di chiusura della successione regressiva del mare calabriano. Poggia direttamente sulle Sabbie di Monte Marano e, come queste, forma le parti sommitali del rilievo ed in particolare le superfici suborizzontali che caratterizza il rilievo morfologico.

Lo spessore totale è di circa 50 m mentre l'Età è ascrivibile al Pleistocene.





Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

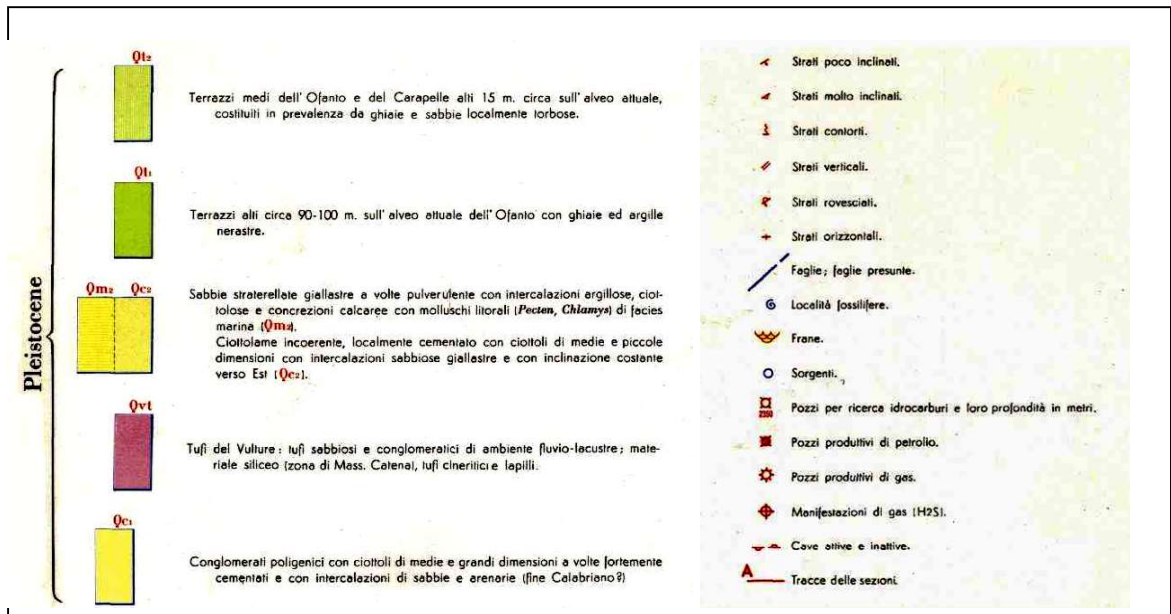


Fig. 4: Stralcio Carta Geologica dell'Area d'intervento con Legenda

Dal punto di vista tettonico i movimenti subiti dall'area di Venosa nella sua breve storia geologica sono strettamente legati a quelli di tutta la Fossa Bradanica. Questa, per tutto il Pleistocene, ha subito una tettonica verticale, con un sollevamento a bilancia più accentuato verso l'Appennino (CIARANFI et al., 1979 RICCHETTI (1967; 1979). Tale movimento del continente è stato registrato dalla formazione di terrazzi marini lungo l'arco ionico e di terrazzi fluviali lungo i maggiori corsi d'acqua. Contemporaneamente al sollevamento si sono formate nuove faglie, prevalentemente ad andamento appenninico; si tratta di faglie dirette, con direzione NW-SE e con un rigetto di alcuni metri e un'inclinazione vicino alla verticale. Recenti studi hanno evidenziato una tettonica legata essenzialmente alle fasi di colmamento della fossa.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

Nell'area di studio non si evidenziano faglie anche per la natura del sedimento affiorante, inadatta ad evidenziare tale market di deformazione.

Anche la consultazione del Catalogo delle Faglie Capaci – ITHACA redatta dal Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia (ISPRA) evidenzia come l'area sia priva di faglie attive e capaci di cinematisimo (Fig. 5).

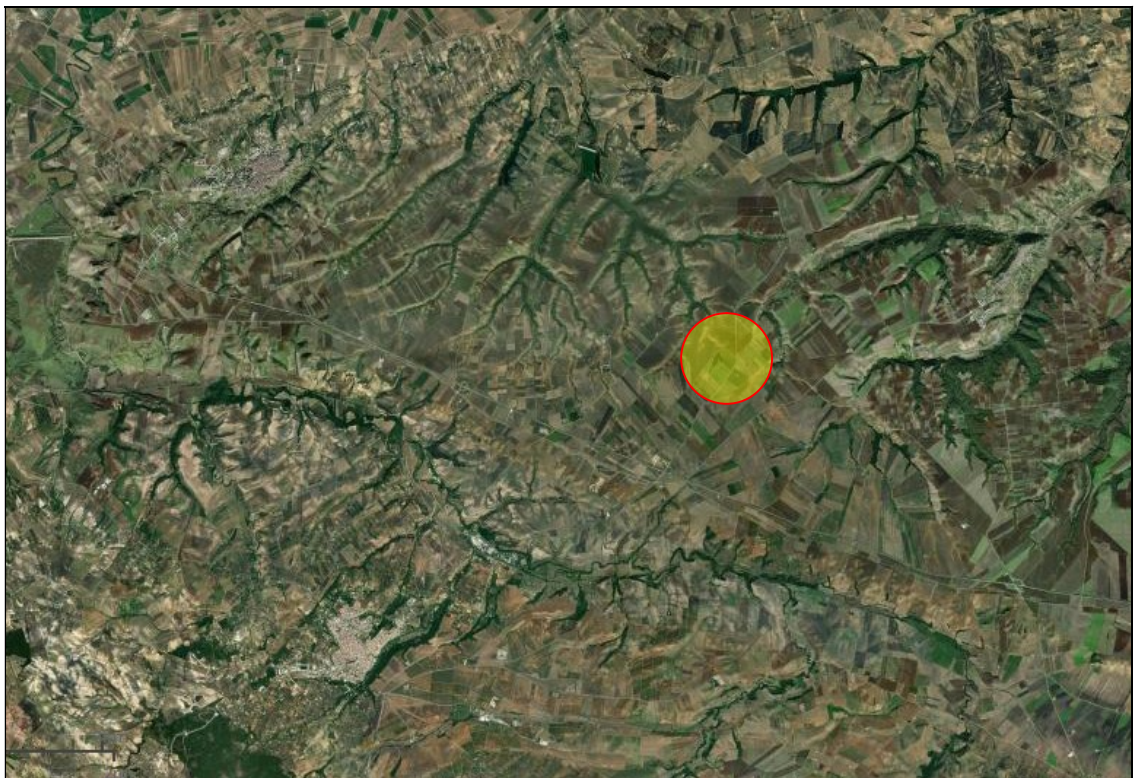


Fig. 5: Situazione Faglie Capaci territorio di Venosa
Tratta <http://sgi.isprambiente.it/ithaca/viewer/index.html>



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

3.3 – Geomorfologia e Idrografia

L'area di ubicazione degli interventi in progetto è posta ad una quota variabile intorno a 340 m slm., su un'area sub pianeggiante. Questa superficie caratterizza la sommità di un rilievo morfologico, debolmente inclinato da sud ovest verso nord est e allungato nella stessa direzione. La continuità del rilievo morfologico viene interrotta a tratti da fossi in erosione i quali, verso nord est, confluiscono nel Torrente Lacone, affluente in sinistra del Fiume Ofanto mentre a sud confluiscono nel fosso di Venosa. Verso nord – ovest questo rilievo è interrotto da un versante con pendenze superiori ai 10°.

Gran parte del paesaggio circostante si presenta principalmente sub-pianeggiante con forme leggermente arrotondate, degradanti con pendenza dolci verso fondovalli scarsamente incisi.

Il paesaggio subpianeggiante è interrotto dalla presenza di alcuni fossi che ospitano corsi d'acqua appartenenti al reticolo idrografico del Fiume Ofanto. Questi fossi presentano versanti quasi sempre privi di vegetazione, a tratti inclinati e a tratti molto degradati.

Le loro testate iniziano gradualmente in assenza di scarpata e a valle si raccordano al fondovalle alluvionale con una debole pendenza. Il profilo longitudinale non presenta gradini e rotture di pendenza ma si sviluppa con omogeneità a bassa pendenza. Si riscontra, inoltre, una maggiore pendenza alle quote più elevate. I fossi si evolvono sia per arretramento graduale di testata che per scalzamento dei versanti.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

Sui lati delle principali incisioni si rilevano sia cigli di scarpate degradate attualmente non in arretramento che scarpate in arretramento per erosione al piede.

Lo studio aereofotogrammetrico ed il successivo rilievo morfologico di campagna non hanno evidenziato elementi indicativi di una instabilità morfologica in atto o pregressa. Si esclude, pertanto, in corrispondenza ed in prossimità delle aree di progetto, la presenza di dissesti gravitativi in atto, pregressi e potenziali.

Tale status di stabilità è confermato anche dall'analisi della cartografia PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) dell'AdB (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale – Regione Basilicata) – portale <http://www.distrettoappenninomeridionale.it>, dalla quale si evince (Fig. 6) come l'area di progettazione dell'impianto agrivoltaico non sia interessata da alcun vincolo di tipo geomorfologico ed idraulico.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

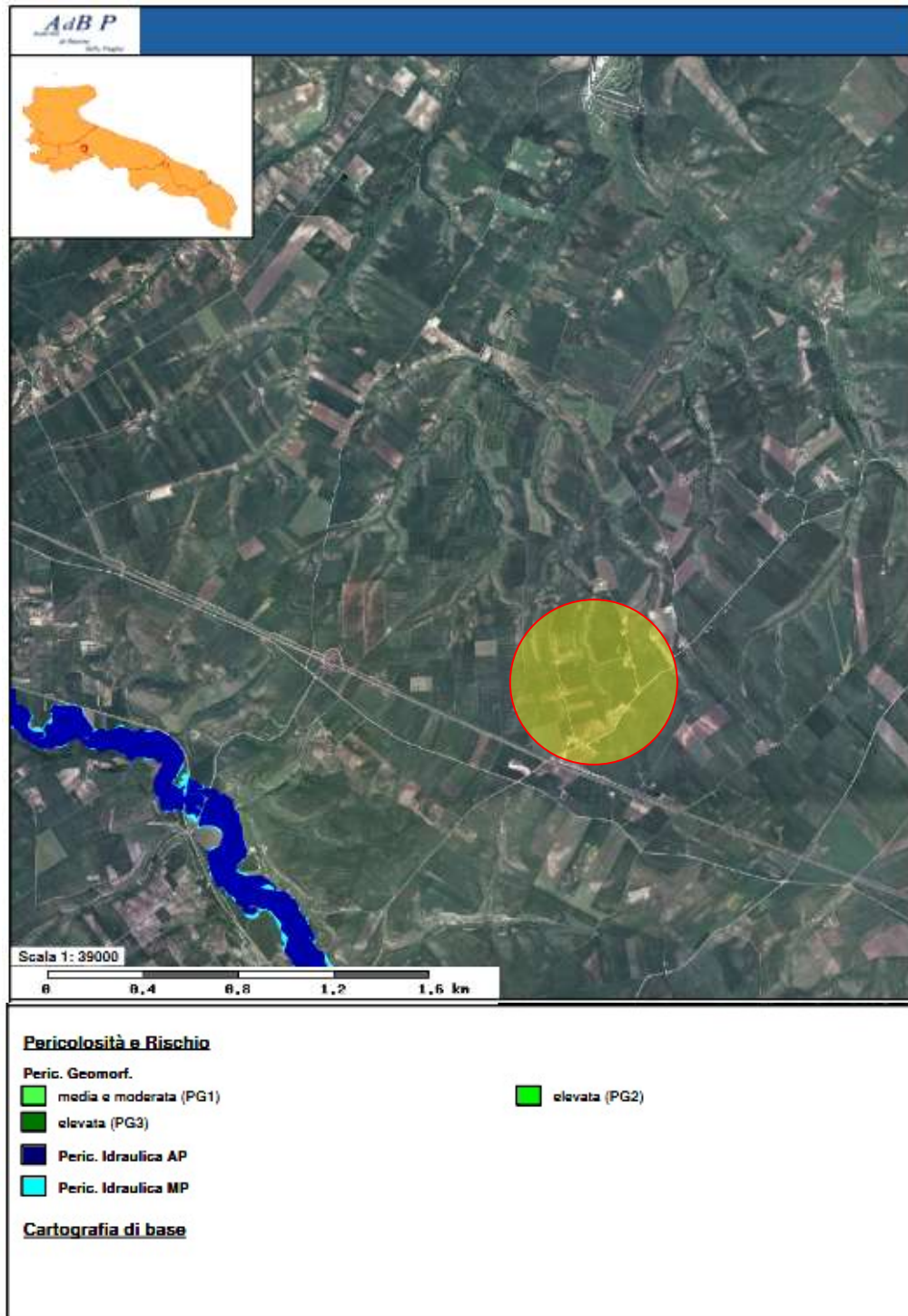


Fig. 6: Carta PAI – Pericolosità Geomorfologica



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

4 - SISMICITÀ

La Basilicata presenta un potenziale sismogenetico differente da zona a zona. Dal punto di vista geologico e sulla base degli archivi è evidente che la sismicità maggiore si concentri lungo l'Appennino lucano e sui confini campani con l'Irpinia.

Dalla carta dei substrati geologici e dei terreni di copertura, realizzata secondo la legenda della Carta Geologico-tecnica per la Microzonazione Sismica, è possibile suddividere la Regione Basilicata in due settori principali (Fig. 7):

- il settore occidentale, corrispondente alla zona assiale della catena appenninica, lungo il quale predominano i litotipi appartenenti alla classe dei substrati lapidei ad alternanze di litotipi, costituiti da unità di piattaforma carbonatica e di bacino;
- il settore orientale è rappresentato dall'avanfossa bradanica in cui predominano i litotipi coesivi e granulari



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

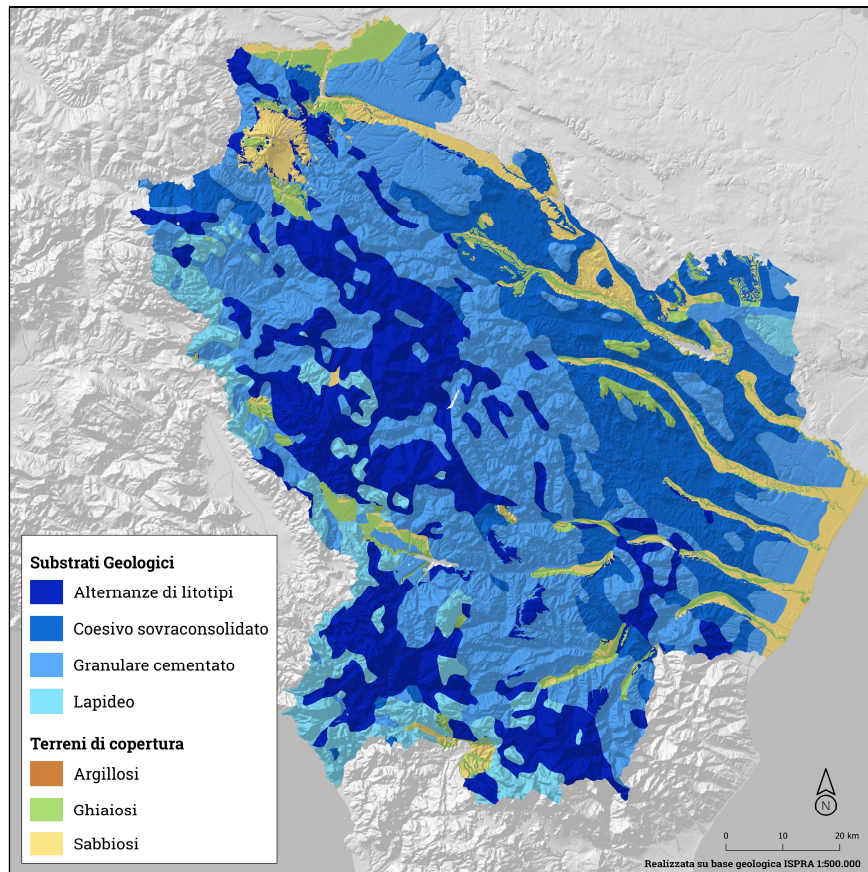


Fig. 7: Carta dei substrati geologici

Tratta da <https://govrisv.cnr.it/regioni/regione-basilicata/>

I maggiori terremoti storici risentiti nella Regione hanno area epicentrale lungo la dorsale appenninica al confine con la Campania. Anche la sismicità strumentale degli ultimi 35 anni è concentrata anch'essa lungo la catena appenninica; in particolare emergono le sequenze del 1990-1992 nell'area del potentino, e quelle del 1998 e del 2012 nell'area del Pollino (Fig. 8).



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

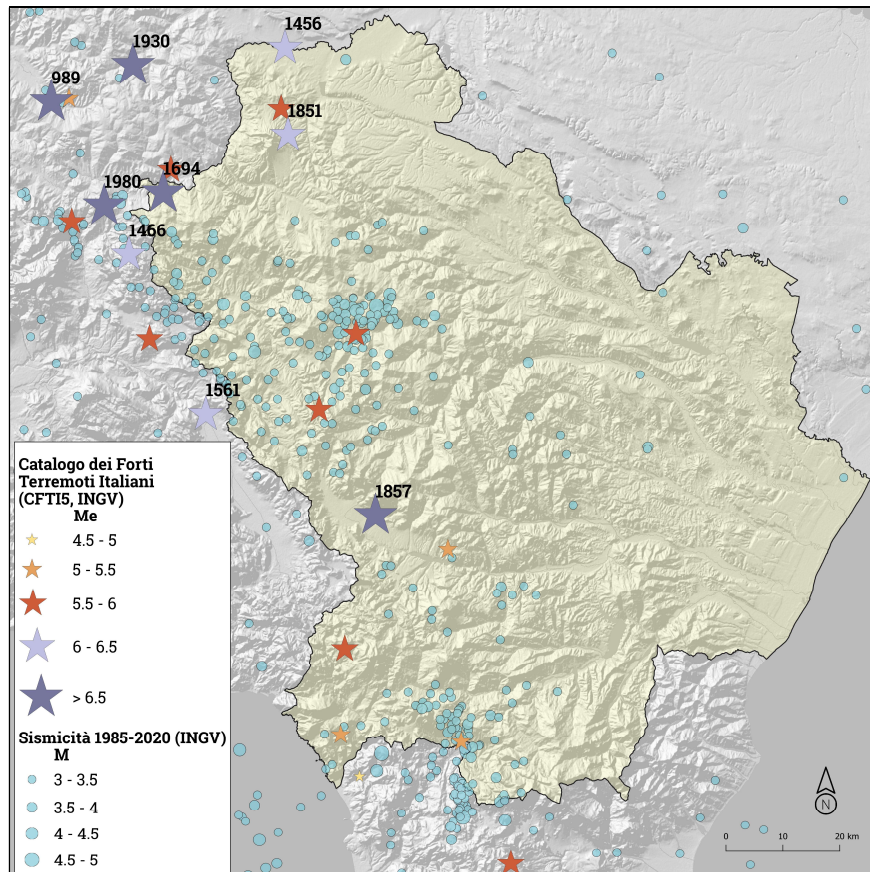


Fig. 8: Eventi sismici più forti registrati nell'area d'intervento

Tratta da: <https://govrisv.cnr.it/regioni/regione-basilicata/>

I terremoti più forti, di magnitudo superiore a 6, si sono verificati nell'area del Vulture (1851), in Irpinia (1694, 1930, 1980) e lungo l'appennino lucano (1561, 1826, 1857) fino al Lagonegrese (1831, 1836). Tale sismicità è storicamente documentata in varie opere e cataloghi nazionali ed internazionali.

Tra gli eventi sismici più distruttivi che hanno colpito la penisola italiana, ancora oggi vi è traccia nella memoria collettiva del terremoto del 16 dicembre 1857 (X-XI grado Mercalli, magnitudo 7.0) che colpì



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

una vasta area dell'Appennino meridionale, fra Campania e Basilicata, e in particolare la Val d'Agri. Moltissime località delle provincie di Potenza e Salerno subirono gravi danni, crolli e vittime. Questo terremoto, oltre ad essere ricordato per i suoi effetti distruttivi, ha segnato un passo fondamentale per la nascita della moderna sismologia. Infatti, gli effetti del terremoto furono studiati e riportati nel volume "The great Neapolitan earthquake of 1857" (London, 1863) dall'ingegnere inglese Robert Mallet che valutò questo evento tra i più importanti per vastità e gravità in Europa (per l'epoca).

Dal punto di vista storico la consultazione del sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - CPTI15-DBMI15 - evidenzia che l'area è stata interessata da n. 49 eventi importanti tra il 1456 e il 2006 oltre che n. 4 in aree vicine, come da tabella allegata e grafico (Fig. 9)

Effetti	In occasione del terremoto del																					
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw												
											3		1953	02	25	00	07	4	Vibonese	56	5-6	4.88
											NF		1954	08	06	19	21	1	Potentino	13	5-6	5.18
8							Appennino centro-meridionale	199	11	7.19	NF		1957	05	03	03	29	3	Potentino	36	5	4.09
8-9							Vulture	1	8-9	5.80	5-6		1962	08	21	18	19	Irpinia	562	9	6.15	
7-8							Sannio	215	11	7.06	4		1963	02	13	12	45	Potentino	31	7	5.19	
7							Irpinia-Basilicata	251	10	6.73	3-4		1966	07	06	04	24	Alta Murgia	46	4	4.26	
8-9							Vulture	103	10	6.52	NF		1966	10	04	04	51	5	Potentino	15	5	4.16
F							Vulture	5	4	4.13	3		1978	09	24	08	07	4	Materano	121	6	4.75
7-8							Basilicata	340	11	7.12	5		1980	12	03	23	54	2	Irpinia-Basilicata	11	6	4.83
4-5							Gargano	122	7	5.47	NF		1984	04	29	05	02	5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
2							Gargano	15	6-7	5.02	4		1984	05	07	17	50	Monti della Meta	911	8	5.86	
NF							Isole Tremiti	68	6	4.88	3		1984	05	11	10	41	4	Monti della Meta	342	7	5.47
3							Vallo di Diano	134	7	5.15	4		1987	01	28	05	33	2	Potentino	62	5	4.54
NF							Subappennino dauno	32	6	4.57	NF		1988	04	26	00	53	4	Adriatico centrale	78		5.36
2							Gargano	27	6	4.75	6		1990	05	05	07	21	2	Potentino	1375		5.77
NF							Irpinia	122	7-8	5.18	NF		1990	08	28	19	02	5	Potentino	84		4.21
5							Irpinia-Basilicata	376	8	5.76	5-6		1991	05	26	12	25	5	Potentino	597	7	5.08
4-5							Tavoliere delle Puglie	49	5	4.55	3-4		1996	04	03	13	04	3	Irpinia	557	6	4.90
NF							Molise	205	7-8	5.35	4-5		1998	04	07	21	36	5	Valle dell'Ofanto	45	5	4.31
4							Marsica	1041	11	7.08	3		1998	04	26	05	38	0	Potentino	67	4-5	3.76
8							Irpinia	547	10	6.67	NF		2002	04	18	20	56	4	Appennino lucano	164	5	4.34
2							Alta Murgia	16	5	4.41	4		2002	11	01	15	09	0	Molise	638	7	5.72
2							Vulture	7	5	4.16	NF		2004	02	23	19	48	4	Appennino lucano	107	4-5	3.82
4-5							Irpinia	42	6	4.96	NF		2004	02	24	05	21	2	Appennino lucano	140	5	4.21
4							Gargano	73	7	5.22	2-3		2004	09	03	00	04	1	Potentino	156	5	4.41



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

2 2006 05 29 02 20 0 Gargano 384 4.64

Località vicine (entro 10km)

Località	EQs	Distanza (km)
Maschito	22	6
Ginestra	8	8
Lavello	29	10
Ripacandida	27	10

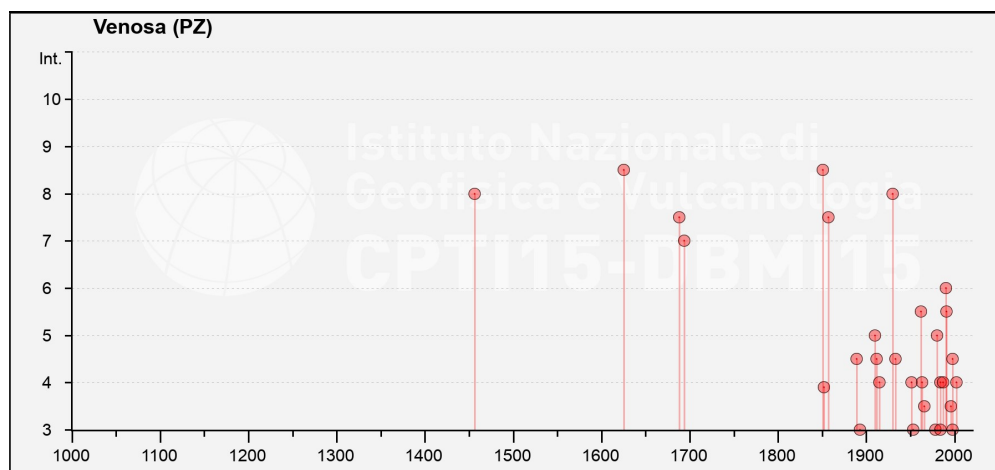


Fig. 9: Eventi sismici registrati nel comune di Venosa – Tratta da https://emidius.mi.ingv.it/CPT115-DBM115/query_place/

Facendo espresso riferimento al vigente strumento di classificazione sismica del territorio italiano, redatto nel 2004 in recepimento delle disposizioni contenute nell'O.P.C.M. n. 3274/2003 (recepite dalla Regione Puglia con D.G.R. n. 153/2004), il territorio amministrativo del Comune di Venosa ricade interamente in "Zona 2" ovvero in **area a sismicità medio-alta**.

Volendo invece esprimere la pericolosità sismica in termini di massima accelerazione sismica del suolo di probabilità statisticamente apprezzabile, si può fare riferimento alle indicazioni contenute nella



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

“Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale” redatta dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e pubblicata in allegato all’O.P.C.M. n. 3519/2006 sulla G.U. n. 108 dell’11 maggio 2006.

In base alla suddetta mappa (Fig. 10) il territorio in esame ricade in zona di media pericolosità sismica, espressa in termini di accelerazione massima del suolo (riferita a suoli rigidi di Categoria A così come definiti al punto 3.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni) di $0,125 \div 0,150$ g, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

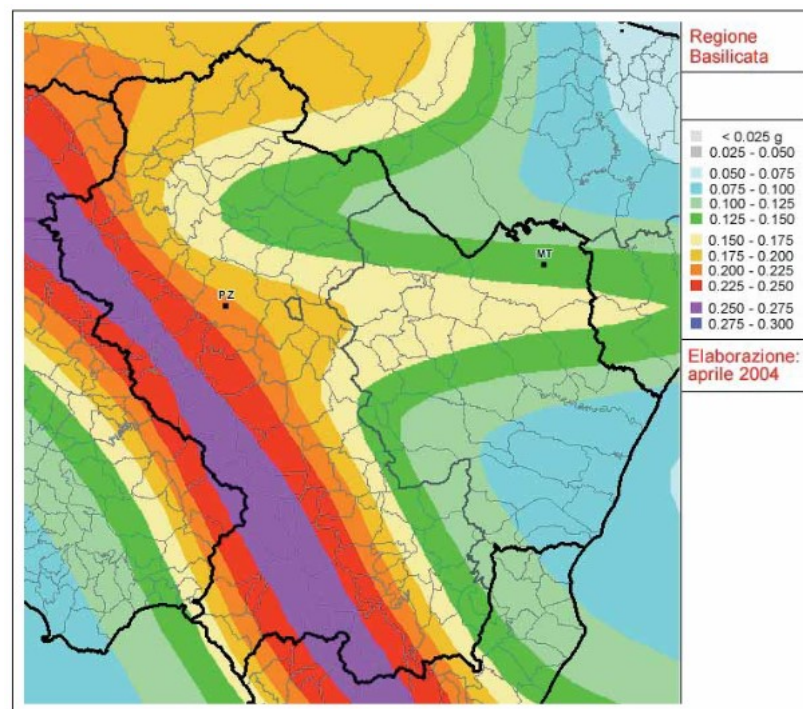


Fig. 10: Stralcio della Mappa di Pericolosità Sismica (O.P.C.M. n. 3519/2006)



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

5 - INDAGINI ESEGUITE

Per il riconoscimento delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni di fondazione sono state eseguite le seguenti indagini indirette:

- n. 2 prove sismiche a rifrazione;
- n. 2 prove sismiche attive del tipo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), che si basano sulla misurazione e analisi delle onde di Rayleigh.

Oltre alle indagini indirette si è fatto riferimento ad un sondaggio geognostico eseguito direttamente dalla scrivente in un'area prossima a quella di progetto.

Le indagini, i cui risultati sono riportati in Appendice (Allegato A1) sono state eseguite secondo l'ubicazione riportata alla Fig. 11.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"



Fig. 11: Ubicazione delle indagini eseguite



Stendimenti Sismici



Sondaggio Geognostico progressivo



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

5.1 PROSPEZIONI SISMICHE E MASW

La campagna di indagini geognostiche si è articolata nell'esecuzione di:

- n. 2 profili sismici a rifrazione di ml 36;
- n. 2 elaborazioni dati sismici

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando un sistema costituito dalle seguenti parti:

- *Sismografo multicanale DoReMi a 24 canali*
- *Sorgente energizzante*
- *Trigger*
- *Strumentazione ricevente*
- *Software di analisi e elaborazione*

Il sistema DoReMi incorpora e distribuisce lungo il cavo sismico un sismografo modulare, canale per canale, riducendo notevolmente i rumori indesiderati che sono acquisiti quando la digitalizzazione avviene nell'unità centrale e il segnale viene trasferito su canali analogici per decine di metri. Ogni elemento possiede 64Kb di memoria ed è indipendente, pertanto può essere aggiunto o tolto poiché dispone di connettori maschio-femmina prima e dopo il digitalizzatore, configurando una installazione "a catena". Le principali caratteristiche dello strumento sono le seguenti:

- *2 cavi sismici da 60m cadauno*



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

- *Impedenza d'ingresso: >100kΩ*
- *Convertitore A/D, Tipologia: SAR Risoluzione: 16 bit Dinamica: 96 dB*
- *Dinamica totale senza postprocessing: > 127dB (a qualsiasi frequenza di campionamento)*
- *Memoria: 64 kByte (>30000 campioni)*
- *Frequenze di registrazione selezionabili variabili tra 200 e 20000 Hz*
- *Durata di campionamento variabile da 0.1s a 150s in funzione della frequenza di campionamento selezionata.*
- *Filtri programmabili passa basso e passa alto sia digitali che a fase zero*
- *Gain variabile da 27dB a 80dB*
- *Possibilità di registrazione in autostack, inversione della polarità, workaway concatena e dinterlaccia; start da pc*
- *Conversione dei file di acquisizione da formato proprietario a SEG -2, SEG – Y e CSV.*

Il sistema energizzante adottato per generare onde di compressione (P) è costituito da una mazza di ferro dal peso di 8 Kg battente verticalmente su una piastra in duralluminio del diametro di 18 cm, spessore 4 cm e peso di 2 Kg, posta a diretto contatto con il terreno e dotata di cordicella di ancoraggio. Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso mediante geofono starter (posto adiacente alla piastra di



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

battuta) nel momento in cui la mazza colpisce la piastra di battuta consentendo al sistema di individuare l'esatto istante di attivazione della sorgente e quindi di fissare l'inizio della registrazione. Per quanto riguarda la strumentazione ricevente sono stati utilizzati 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz.

Le prove MASW sono state eseguite per ricavare il parametro Vs30, richiesto dalla nuova normativa sismica (NTC-18). Tramite questa prova vengono misurate le velocità sismiche delle onde superficiali a diverse frequenze; tale dispersione è imputabile prevalentemente alla stratificazione delle velocità delle onde S i cui valori sono ricavabili da una procedura di inversione numerica.

Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito (velocità delle onde di taglio S) tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di *Rayleigh* (VR) ed un successivo processo di inversione.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

6 - CARATTERISTICHE LITOTECNICHE

DEI TERRENI

Dal rilievo geolitologico eseguito in campagna e dai risultati delle indagini sismiche effettuate, opportunamente confrontati con i risultati del sondaggio geognostico pregresso, è stato possibile ricostruire la seguente successione stratigrafica:

Litotipo A: terreno vegetale di copertura, costituito da materiale detritico ghiaioso – sabbioso. Lo spessore è di circa 80 cm;

Litotipo B: conglomerati poligenici con sabbia

La sezione stratigrafica ricostruita è grossomodo quella riportata alla Fig. 12



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

Stratigrafia	Caratteristiche litologiche	Caratteristiche geotecniche	Categoria di suolo e topografica (NTC 2018)
0.00 m -0.80 m	Detrito superficiale ghiaioso - sabbioso		
	conglomerati poligenici con livelli di sabbia (Conglomerato di Irsina)	$\gamma = 17,5 \text{ KN/m}^3$ $c = 7,4 \text{ kPa}$ $\phi = 27,5^\circ$ $C_u = 38 \text{ kPa}$	- categoria di suolo: B - categoria topografica: T1

Fig. 12: Ricostruzione stratigrafica dell'area di progetto

Dal punto di vista geotecnico il secondo litotipo, che rappresenta il terreno fondale, presenta i seguenti valori dei principali parametri geotecnici:

<i>Peso di volume (KN/m³)</i>	<i>17,5</i>
<i>Peso di volume saturo (KN/m³)</i>	<i>18,25</i>



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

<i>Coesione drenata (Kpa)</i>	<i>7,4</i>
<i>Coesione non drenata (Kpa)</i>	<i>38</i>
<i>Angolo di attrito (°)</i>	<i>27,5°</i>
<i>Modulo edometrico (Kg/cm²)</i>	<i>190.2</i>
<i>Coefficiente di Poisson</i>	<i>0.4</i>

Tali valori rappresentano una prima definizione dei parametri geotecnici che andranno meglio contestualizzati e definiti, in fase di progettazione esecutiva, con ulteriori indagini dirette ed opportune e significative prove di laboratorio.



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

7- CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Considerate le risultanze dell'indagine e le finalità del presente studio, teso a valutare le problematiche e le implicazioni geologiche, geotecniche ed idrologiche connesse con le previsioni realizzative della progettazione dell'impianto fotovoltaico in oggetto, si può affermare la piena compatibilità dell'opera con il quadro geomorfologico, geotecnico, idrologico e geologico locale.

In particolare, alla luce di quanto illustrato nei capitoli precedenti a cui si rimanda per ogni utile approfondimento, è possibile trarre le seguenti considerazioni conclusive:

Aspetti geologici

✚ L'area non risulta soggetta ad alcuna vincolistica "Geologica" sia in relazione al PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale per la pericolosità geomorfologica e/o idraulica; sia in relazione al R.D.n° 3267/1923 (Vincolo Idrogeologico);

✚ Il rilevamento geomorfologico ha permesso di verificare l'assenza di dissesti gravitativi attuali e pregressi in corrispondenza o in prossimità dell'area di progetto. La morfologia dell'area di studio, inoltre, caratterizzata essenzialmente da una superficie subpianeggiante interrotta da fossi molto degradati, esclude la possibilità di formazioni di



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

condizioni di instabilità dei pendii. Non sono stati rilevati apprezzabili fenomeni erosivi in atto o potenziali e tali da modificare la morfologia delle aree di ubicazioni delle opere in tempi storici.

✚ Circa potenziali processi di dinamica idro-morfologica ed idraulica, il sito non presenta alcun elemento di criticità;

✚ Il substrato geologico, costituito da litologie appartenenti alla formazione dei Conglomerati di Irsina risulta dotato di discrete caratteristiche geomeccaniche e tecniche del tutto idonee ed adeguate ad ospitare le previsioni realizzative progettuali.

Aspetti ingegneristici

✚ Per il dimensionamento delle strutture di fondazione si tenga conto dei parametri geotecnici del substrato fondale così come illustrati nel modello geotecnico;

✚ Ai fini sismici si tenga conto nei calcoli di verifica che il suolo, in relazione all'indagine sismica indiretta effettuata, è classificabile come Categoria B; in riferimento alla categoria topografica l'intervento in progetto ricade in una zona la cui pendenza topografica media è inferiore ai 15° pertanto riferibile ad una categoria di tipo T1 ;



Durante l'esecuzione dei lavori saranno previsti interventi idonei opportunamente dimensionati e posizionati finalizzati alla regimentazio-



Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

ne delle acque superficiali derivanti dalle precipitazioni meteoriche. La distribuzione della rete di regimentazione delle acque superficiali non determina modifiche sostanziali di carattere idrologico e morfologico sull'andamento e sulla stabilità attuale dei fossi interessati a ricevere le acque di scolo.

In conclusione, le aree interessate dalle opere previste in progetto mostrano attualmente sufficienti condizioni di stabilità geomorfologica e sono prive di criticità geologico - geomorfologiche.

Sulla base degli studi condotti è possibile affermare che le previsioni progettuali sono compatibili con le condizioni geologiche, geomorfologiche presenti nell'area di studio.

Tanto in adempimento all'incarico conferitomi

Rodi Garganico Dicembre 2022





Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

APPENDICE

REGIONE BASILICATA
Comune di VENOSA
Provincia di Potenza

INDAGINE SISMICA

Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano" _

RELAZIONE DI FINE CAMPAGNA

Committente:
Società Edison Rinnovabili Spa

GEOLOGO
Giovanna Amedei

Ottobre 2022

INDICE

1 Premessa	3
2 Strumentazione utilizzata per le prospezioni multicanali	4
3 Sismica a rifrazione in onde P	5
<i>Limiti del metodo sismico a rifrazione</i>	<i>5</i>
<i>Elaborazione dati.....</i>	<i>6</i>
4 Analisi onde superficiali (MASW).....	7
5 Parametri elasto meccanici	8
6 Risultati indagini.....	9
<i>Sismica a rifrazione in onde P (elaborazione classica e tomografica).....</i>	<i>9</i>
<i>Elaborazione indagine MASW.....</i>	<i>14</i>
7 Rigidità sismica e frequenza naturale di vibrazione del terreno.....	16
8 Categoria suolo di fondazione	17
9 Unità sismo-stratigrafiche.....	18
10 Bibliografia.....	19
11 Sismogrammi.....	20
12 Ubicazione indagini	22
13 Documentazione fotografica.....	23

1 Premessa

E' stato affidato l'incarico per l'esecuzione di un'indagine sismica finalizzata alla ricostruzione della sismosezione dell'area di ubicazione di un impianto fotovoltaico nel **Comunedì Venosa**. La finalità delle indagini è stata di rilevare l'andamento della sismostratigrafia del sottosuolo, ricercando le superfici di discontinuità fisica - rifrattori ed in particolare quelle superfici che separano terreni con differente grado di densità e compattezza. Dalla sismostratigrafia ottenuta, e con l'ausilio dei rapporti fra le velocità delle onde P ed S, è possibile ricavare lo spessore e le caratteristiche geomeccaniche (velocità delle onde elastiche, coefficiente di Poisson e moduli elastici dinamici) degli strati così riconosciuti, valutare la suscettibilità alla liquefazione di terreni saturi non coesivi e classificare i terreni alla luce della recente normativa sismica (Vseq).

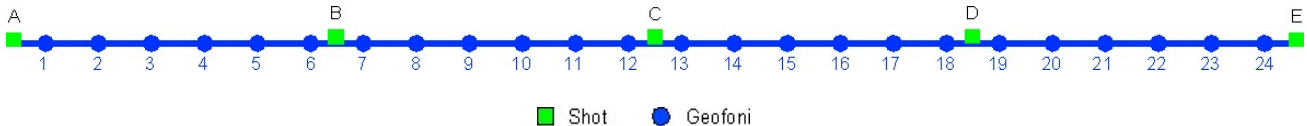
Per l'interpretazione litostratigrafica delle sezioni sono stati utilizzati i dati ottenuti dal rilevamento geologico. La campagna di indagine è consistita in n. 2 stendimenti multicanale su cui è stata condotta una prospezione di sismica a rifrazione in onde P e un'indagine MASW. Lo stendimento è stato fatto in corrispondenza dell'area di intervento, su terreno naturale.

La lunghezza totale, le distanze intergeofoniche e le distanze dei punti di energizzazione rispetto al primo geofono sono riassunte nelle tabelle seguenti.

Sismica a rifrazione a 24 geofoni in onde P			
Nome profilo	Passo intergeofonico	Lunghezza stendimento	N° punti di energizzazioni
Base 1	2,0 m	46,00 m	5

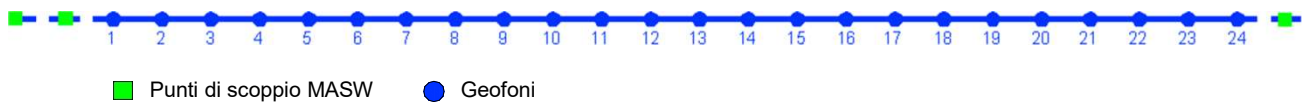
Nome profilo	A	B	C	D	E
Base 1	- 1,00 m	11,00 m	23,00 m	35,00 m	47,00 m

Tabella 1 – Configurazione geometrica sismica a rifrazione e distanza degli shot dal primo geofono



Nome profilo	Distanza intergenerica (m)	Offset battute, x = 0 in corrispondenza del geofono 1	Lunghezza stendimento (m)
Base 1	2,00	- 9,00; - 3,00; +49,00	46,00

Tabella 2 - Riepilogo geometria prospezione sismica MASW



La campagna di indagine è iniziata in data 02/10/2022 con condizioni meteorologiche di cielo sereno e vento. In allegato si riportano i sismogrammi acquisiti, l'ubicazione delle indagini e delle riprese fotografiche.

2 Strumentazione utilizzata per le prospezioni multicanali

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando un sistema costituito dalle seguenti parti:

- *Sismografo multicanale DoReMi a 24 canali*
- *Sorgente energizzante*
- *Trigger*
- *Strumentazione ricevente*
- *Software di analisi e elaborazione*

Il sistema DoReMi incorpora e distribuisce lungo il cavo sismico un sismografo modulare, canale per canale, riducendo notevolmente i rumori indesiderati che sono acquisiti quando la digitalizzazione avviene nell'unità centrale e il segnale viene trasferito su canali analogici per decine di metri. Ogni elemento possiede 64Kb di memoria ed è indipendente, pertanto può essere aggiunto o tolto poiché dispone di connettori maschio-femmina prima e dopo il digitalizzatore, configurando una installazione "a catena". Le principali caratteristiche dello strumento sono le seguenti:

- *2 cavi sismici da 60m cadauno*
- *Impedenza d'ingresso: >100kΩ*
- *Convertitore A/D, Tipologia: SAR Risoluzione: 16 bit Dinamica: 96 dB*
- *Dinamica totale senza postprocessing: > 127dB (a qualsiasi frequenza di campionamento)*
- *Memoria: 64 kByte (>30000 campioni)*
- *Frequenze di registrazione selezionabili variabili tra 200 e 20000 Hz*
- *Durata di campionamento variabile da 0.1s a 150s in funzione della frequenza di campionamento selezionata.*
- *Filtri programmabili passa basso e passa alto sia digitali che a fase zero*
- *Gain variabile da 27dB a 80dB*
- *Possibilità di registrazione in autostack, inversione della polarità, workaway concatenata e d interlaccia; start da pc*
- *Conversione dei file di acquisizione da formato proprietario a SEG -2, SEG – Y e CSV.*

Il sistema energizzante adottato per generare onde di compressione (P) è costituito da una mazza di ferro dal peso di 8 Kg battente verticalmente su una piastra in duralluminio del diametro di 18 cm, spessore 4 cm e peso di 2 Kg, posta a diretto contatto con il terreno e dotata di cordicella di ancoraggio. Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso mediante geofono starter (posto adiacente alla piastra di battuta) nel momento in cui la mazza colpisce la piastra di battuta consentendo al sistema di individuare l'esatto istante di attivazione della sorgente e quindi di fissare l'inizio della registrazione. Per quanto riguarda la strumentazione ricevente sono stati utilizzati 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz.

3 Sismica a rifrazione in onde P

Il metodo si basa sulla misura indiretta della velocità di propagazione di onde elastiche nel sottosuolo, generate da un qualsiasi sistema energizzante sito in superficie.

A seguito di una perturbazione energetica le onde sismiche si propagano nel sottosuolo e all'interfaccia tra due mezzi a diverso comportamento elastico e per angoli critici di incidenza (Legge di Snell), si propagano onde coniche (head wave) lungo la superficie di discontinuità, che rifrangono continuamente energia elastica verso l'alto. L'analisi delle registrazioni di tali onde e di quelle dirette, che viaggiano immediatamente al di sotto della superficie del terreno, costituiscono il fondamento del metodo descritto.

La strumentazione necessaria per l'acquisizione del segnale sismico è costituita da una serie di ricevitori (geofoni), disposti a intervallo costante lungo un certo allineamento e da un geofono starter che comunica al sismografo l'inizio dell'osservazione sperimentale.

La ricostruzione di un modello del sottosuolo e la stima del profilo di velocità delle onde elastiche longitudinali (V_p) è ottenuto con il picking delle prime fasi sismiche. Il riconoscimento del tempo di arrivo di onde dirette o head wave, registrate dai geofoni posti a distanza crescente dalla sorgente di energia permette di costruire una curva tempo/distanza (dromocrona) per ogni punto energizzato. Attraverso metodi analitici (delay-time) si ricavano le velocità delle onde longitudinali (V_p) dei mezzi attraversati ed il loro spessore. La valutazione delle velocità e degli spessori dei singoli strati viene effettuata con un margine di incertezza, insita proprio nei metodi geofisici, che si aggira attorno al 15 -25 %.

Limiti del metodo sismico a rifrazione

La sismica a rifrazione è una metodologia molto utilizzata nella caratterizzazione delle proprietà elastiche e quindi fisico-meccaniche degli strati sepolti e per la ricostruzione geometrica degli spessori dei sismostrati. Tuttavia è opportuno definire le condizioni al contorno entro le quali il metodo può essere utilizzato e risultare affidabile.

Le velocità di propagazione delle onde elastiche, nello stesso tipo di roccia, possono variare notevolmente in funzione del grado di alterazione e/o di fratturazione. Inoltre in rocce stratificate differenze di velocità possono essere apprezzabili tra profili eseguiti in modo trasversale o parallelo alla direzione degli strati. Infine la presenza di falde acquifere, così come il grado di saturazione dei terreni, influenzano notevolmente le velocità delle onde compressionali.

Rocce molto fratturate e sedimenti saturi ($S_r = 1$) possono avere valori delle velocità delle onde di compressione tra loro paragonabili circa 1500 m/s.

In base a questi elementi la sismica a rifrazione generalmente fornisce una interpretazione sismo-stratigrafica dei profili investigati; tali modelli, senza la presenza di un sondaggio geognostico di taratura, possono corrispondere a differenti e realistici modelli geologico-stratigrafici.

Altri limiti della metodologia sono inoltre costituiti dalla lunghezza dello stendimento e dalla distanza intergeofonica. Il primo determina la massima profondità di investigazione mentre il secondo fissa il minimo spessore individuabile di uno strato.

Si ricorda infine che un sismostrato può essere evidenziato solamente se la sua velocità di trasmissione delle onde di compressione è maggiore rispetto a quella dei livelli sovrastanti (inversione della velocità) e se il suo spessore è congruente con la configurazione dell'array sismico. Infatti per essere evidenziato deve essere campionato da almeno due geofoni. Se ciò non avviene non si può valutare spessore e velocità (strato nascosto) e di conseguenza viene sottostimata la profondità del sismostrato sottostante.

Elaborazione dati

La determinazione dei tempi di primo arrivo delle fasi simiche (picking) è stato fatto utilizzando il software di acquisizione della DoReMi, previo filtro passa banda compreso tra 14 Hz e 250 Hz..

I metodi usati per elaborazione dei dati sono:

- Delay time
- Analisi tomografica

L'elaborazione dei dati è stata fatta in prima battuta con il software SIP della Rimrock Geophysics Inc, programma shell DOS costituito da più moduli, SIPIN, SIPEDT, SIPT2. Con il modulo SIPIN sono stati creati i file di dati di ingresso, costituiti dalla configurazione geometrica degli shot, dei geofoni oltre ai tempi di arrivo riconosciuti.

La qualità dei sismogrammi è risultata discreta; i primi tempi di arrivo riconosciuti (vedi allegati) sono stati diagrammati su un grafico tempo-distanza su cui sono individuati i tipi di percorsi fatti dalle fasi simiche riconosciute, assegnando i relativi rifrattori. L'interpretazione dei dati è stata fatta con il modulo SIPT2; il codice utilizza il metodo del Delay Time per ottenere una prima approssimazione del modello velocità-profondità quindi applica un algoritmo di inversione non lineare in modo iterativo basato sulla tecnica del ray tracing.

In particolare un set dei tempi di arrivo sono calcolati dal programma e comparati con quelli osservati. Se il misfit non ricade all'interno di un certo limite, l'interfaccia dei rifrattori viene sistemata al fine di ridurre le differenze tra i tempi di arrivo individuati e quelli calcolati.

Per quanto riguarda la velocità di propagazione delle onde P, relativamente al primo strato, il calcolo è fatto sulla base dei tempi di arrivo delle onde dirette, operando poi la media pesata delle velocità per ciascuna coppia di sorgente/geofono.

Negli strati sottostanti sono utilizzati due metodi: il primo ricorre alle rette di regressione ai minimi quadrati; la velocità è calcolata con la media dell'inverso delle pendenze delle linee di regressione. Il secondo è il metodo Hobson - Overton, una versione ai minimi quadrati del metodo delle differenze dei tempi reciproci, utilizzabile quando i tempi reciproci siano presenti in numero sufficiente. Si evidenzia che solamente il secondo metodo fornisce valori delle velocità non influenzati dagli effetti dell'inclinazione dei sismostrati. Le velocità finali sono calcolate sulla media dei valori ricavati dai due metodi descritti.

Questo valore è assunto costante per ogni strato poiché il programma non individua variazioni di velocità latero – verticali.

Allo scopo di definire con maggiore risoluzione la distribuzione delle velocità con la profondità, i dati costituiti dai primi tempi di arrivo delle fasi sismiche e dalla configurazione geometrica dello stendimento sono stati successivamente convertiti in file ASCII ed importati nel software Rayfract (Vers. 3.32) che consente l'elaborazione dei dati con metodo tomografico.

L'analisi tomografica è stata condotta utilizzando il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Traveltime) per il calcolo delle traiettorie d'onda (wavepath) attraverso le soluzioni alle differenze finite delle equazioni che esprimono le modalità di propagazione di un'onda in un mezzo isotropo. Successivamente, con la fase di imaging, si ottiene con software dedicato (SURFER 11) l'immagine della sezione tomografica.

Si ricorda che il metodo tomografico individua spessori diversi, di solito maggiori, rispetto a quelli stimati dalla sismica tradizionale.

4 Analisi onde superficiali (MASW)

Per valutare l'andamento verticale delle velocità delle onde di taglio (S), sono state analizzate le onde di superficie (onde di Rayleigh, componente verticale) tramite metodo attivo (MASW).

Nella metodologia "attiva" le onde di superficie sono generate dall'interferenza costruttiva delle onde di volume (P ed Sv), ottenute da energizzazioni artificiali, incidenti sulla superficie libera del terreno.

Sono onde con polarizzazione ellittica su un piano verticale parallelo alla direzione di propagazione. Utilizzando una stesa di geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz) si registrano le onde di Rayleigh, onde che si propagano lungo la superficie, interessando strati di spessore pari a circa la lunghezza d'onda; in mezzi stratificati verticalmente, le diverse lunghezze d'onda, di armoniche a diversa frequenza, si propagano con velocità di fase che dipende dalle proprietà dei materiali interessati. Ciò fa sì che la velocità di fase sia funzione della frequenza dell'onda stessa.

Tale relazione viene rappresentata tramite la curva di dispersione. Ricorrendo a tecniche di analisi spettrale (analisi F/K) si individua la curva di dispersione sperimentale ricercando i punti di massima potenza spettrale. Sfruttando la relazione, $V_S \cong 1.1V_R$, si può risalire al profilo verticale della velocità delle onde di taglio. La massima profondità alla quale può essere ragionevolmente calcolata la V_s è circa metà della massima lunghezza d'onda misurata (Rix and Leipski, 1991).

Successivamente si esegue il processo d'inversione; si costruisce un modello del sottosuolo a n strati con date proprietà fisiche (V_s , V_p , ρ e ν) con il quale si generano un gran numero di modelli sismostratigrafici del sottosuolo.

A ciascuno dei modelli è associata una curva di dispersione teorica e lo scopo è quello di approssimare al meglio la curva di dispersione sperimentale.

Il modello con migliore misfit definisce il profilo verticale della velocità delle onde di taglio del sito ed è utilizzato per la stima del parametro V_{s30} (categoria di sottosuolo NTC 2008).

I software usati (GNU Public License) per questo tipo di analisi sono il GEOPSY per l'analisi ed il processamento dei segnali ed il Dinver per l'inversione dei dati. Quest'ultimo impiega come metodo di ricerca della curva di dispersione teorica, il Neighbourhood Algorithm, appartenente alla famiglia degli algoritmi genetici che permette di gestire i parametri fisici del terreno.

5 Parametri elasto meccanici

I valori delle velocità delle onde sismiche P e S, stimate attraverso l'indagine di rifrazione e l'indagine MASW consentono di determinare i seguenti parametri che descrivono il comportamento dei terreni sotto condizioni dinamiche:

- Il **coefficiente di Poisson** (ν) misura le variazioni volumetriche di un solido sotto sforzo ed è determinato con la seguente formula:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 + V_s^2)}$$

- Il **modulo di taglio** mette in relazione la deformazione allo sforzo tangenziale applicato; in condizioni dinamiche (basse deformazioni) assume un valore costante, G_0 e si ricava con la seguente espressione

$$G_0 = \rho (V_s)^2$$

- Il **modulo elastico E_0** (Young) esprime la resistenza alla deformazione di un corpo soggetto a sforzi di trazione o di compressione e si ricava con la seguente espressione:

$$E_0 = 2 G_0 (1 + \nu)$$

- Il **modulo elastico statico** è stato stimato a partire da quello dinamico utilizzando la seguente espressione (Heerden, 1987) con E_0 espresso in Gpa e E_s in MPa:

$$E_s = 0,075 E_0^{1,56}$$

- La densità geofisica è stata stimata con la seguente relazione, valida per mezzi saturi (Burns e Mayne, 1996):

$$\rho \approx 1 + \frac{1}{0.614 + 58.7(\log z + 1.095)/V_s}$$

I valori dei parametri elastici dinamici, calcolati da misure sismiche forniscono un limite superiore della rigidità dei terreni e sono da considerare adeguati a descrivere il comportamento del terreno per livelli deformativi modesti, inferiori ad una soglia di linearità γ_l che assume valori compresi tra 10^{-2} % e 10^{-4} % in funzione delle caratteristiche granulometriche e microstrutturali del terreno.

6 Risultati indagini – SIS1

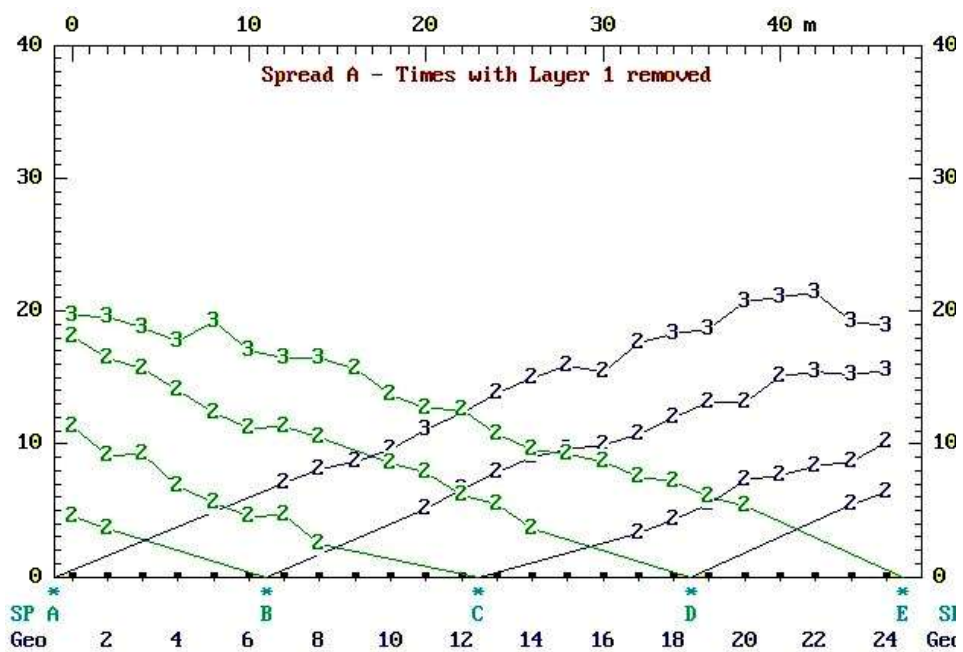
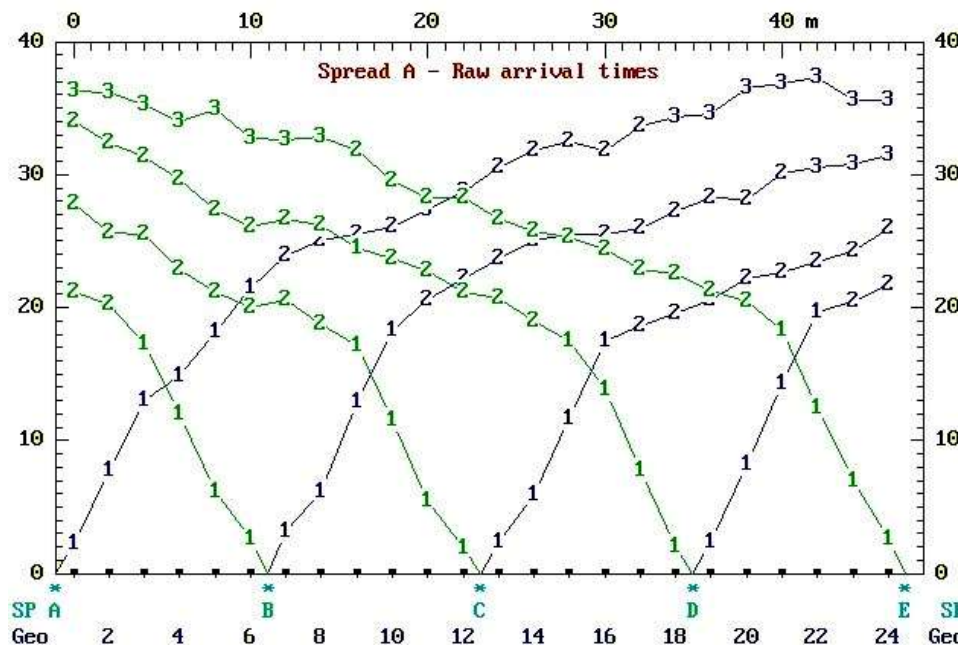
Sismica a rifrazione in onde P (elaborazione classica e tomografica)

I tempi di primo arrivo registrati da ciascun geofono sono riportati nella tabella seguente.

Geo	Elev.	X-Loc	Y-Loc	Tempi primi arrivi (ms)				
				Shot A	Shot B	Shot C	Shot D	Shot E
1	0,0	0,00	0,00	2,20	21,20	27,80	34,00	36,30
2	0,0	2,00	0,00	7,70	20,20	25,60	32,40	36,20
3	0,0	4,00	0,00	13,00	17,30	25,50	31,40	35,20
4	0,0	6,00	0,00	14,80	12,00	22,90	29,60	34,00
5	0,0	8,00	0,00	18,20	6,10	21,10	27,30	34,90
6	0,0	10,00	0,00	21,50	2,60	20,00	26,10	32,70
7	0,0	12,00	0,00	23,90	3,20	20,60	26,70	32,60
8	0,0	14,00	0,00	25,10	6,20	18,70	26,20	32,80
9	0,0	16,00	0,00	25,50	12,90	17,20	24,50	31,80
10	0,0	18,00	0,00	26,10	18,30	11,50	23,70	29,50
11	0,0	20,00	0,00	27,30	20,60	5,50	22,80	28,30
12	0,0	22,00	0,00	28,70	22,20	1,90	21,20	28,30
13	0,0	24,00	0,00	30,50	23,70	2,40	20,70	26,70
14	0,0	26,00	0,00	31,80	25,00	5,90	19,00	25,70
15	0,0	28,00	0,00	32,50	25,50	11,60	17,50	25,30
16	0,0	30,00	0,00	31,80	25,50	17,50	13,80	24,40
17	0,0	32,00	0,00	33,70	26,00	18,60	7,80	22,90
18	0,0	34,00	0,00	34,30	27,20	19,50	2,00	22,50
19	0,0	36,00	0,00	34,60	28,30	20,60	2,40	21,30
20	0,0	38,00	0,00	36,50	28,10	22,20	8,20	20,50
21	0,0	40,00	0,00	36,80	30,10	22,60	14,30	18,30
22	0,0	42,00	0,00	37,30	30,60	23,50	19,70	12,40
23	0,0	44,00	0,00	35,60	30,80	24,20	20,50	7,00
24	0,0	46,00	0,00	35,60	31,50	26,00	21,70	2,60

Nel grafico seguente, tempo\distanza, si riportano le domocrone relative ai 5 shot, e la preliminare valutazione dei sismostrati presenti e della loro velocità, assegnando ad ogni tempo di arrivo il corrispondente rifrattore.

Successivamente si valuta la correttezza dei sismostrati assegnati rimuovendo lo strato 1 ed eliminando i suoi effetti sul grafico tempo distanza per eventualmente riassegnare i rifrattori per la definizione finale del modello sismostratigrafico.

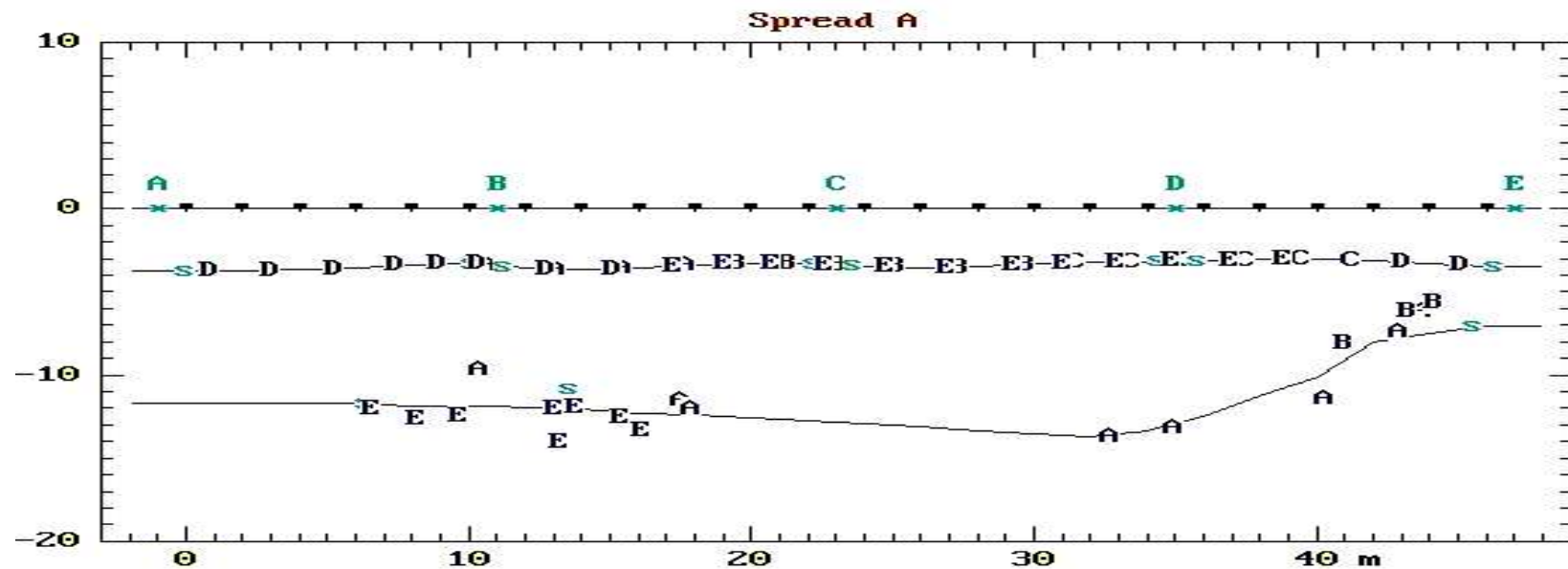


Di seguito si riporta l'output della sezione sismostratigrafica elaborata con tecnica classica, utilizzando il codice di calcolo SIPT2.

Geo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Surface	X-Loc	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0	30,0	32,0	34,0	36,0	38,0	40,0	42,0	44,0	46,0
	Elev	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Layer 2	Depth	3,7	3,7	3,7	3,6	3,3	3,3	3,5	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3	3,5	3,5	3,5	3,3	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,2	3,3	3,5
Layer 3	Depth	11,7	11,7	11,7	11,7	11,9	11,9	11,9	12,1	12,3	12,4	12,6	12,8	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,4	12,5	11,3	10,1	8,0	7,5	7,0

SP	Vp (m/s)
A	451
B	408
C	459
D	434
E	400
Velocity media Layer 1	433
Velocity Layer 2	1953
Velocity Layer 3	3262

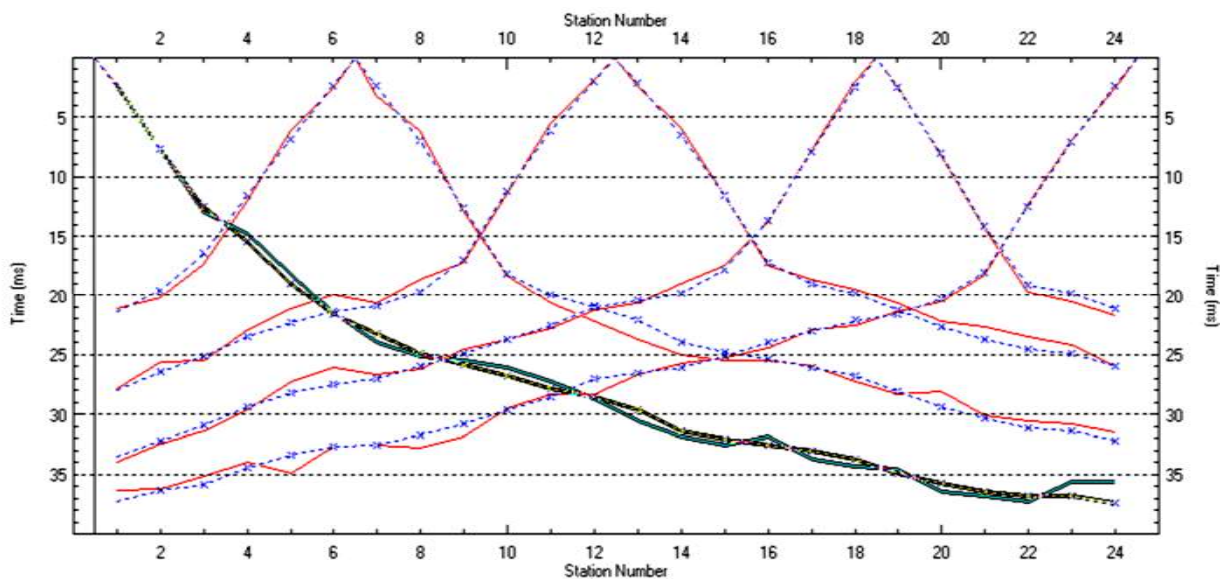
	SP	A	B	C	D	E	
Surface	X-Loc	-----	-1,0	11,0	23,0	35,0	47,0
	Elev	-----	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Layer 2	Depth	-----	3,7	3,4	3,4	3,2	3,5
Layer 3	Depth	-----	11,7	11,9	12,8	12,9	7,0



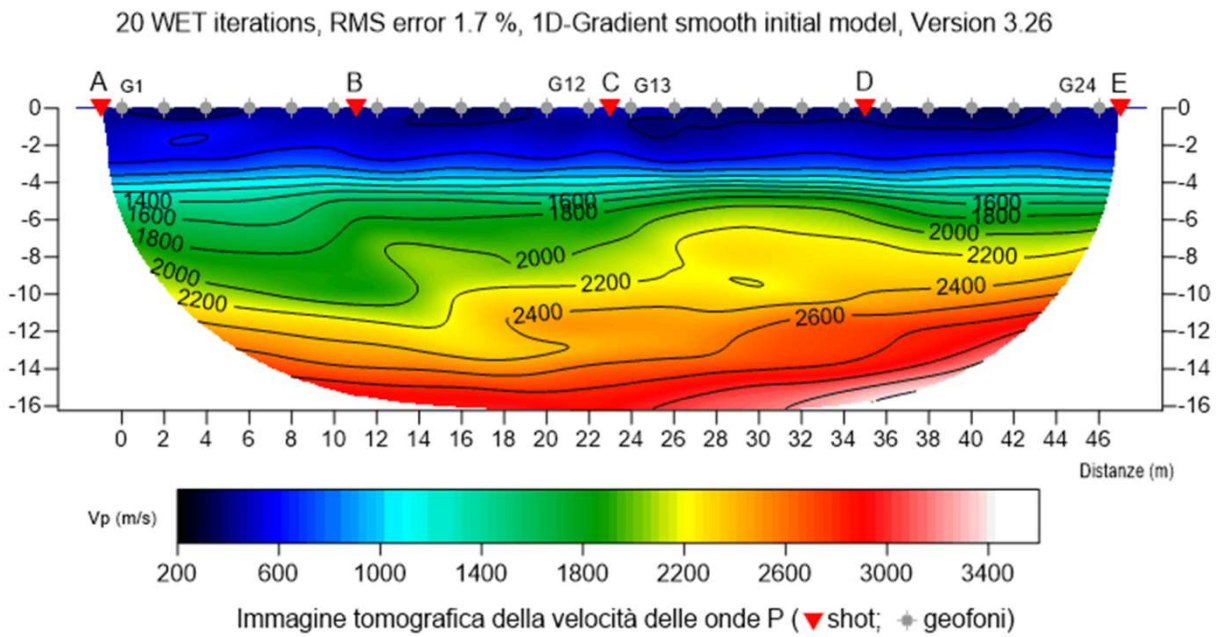
Sezione sismostratigrafica

- dal piano campagna fino ad una profondità compresa tra 3,10 m e 3,70 m, si trova il primo sismostrato di bassa rigidità sismica, con velocità media delle onde P pari a 433 m/s.
- segue un secondo sismostrato caratterizzato da velocità delle onde P (metodo Hobson-Overton), pari a 1953 m/s, esteso fino a profondità comprese tra 7,00 m e 13,70 m da p.c.
- segue un terzo sismostrato caratterizzato da velocità media delle onde P pari a 3262 m/s.

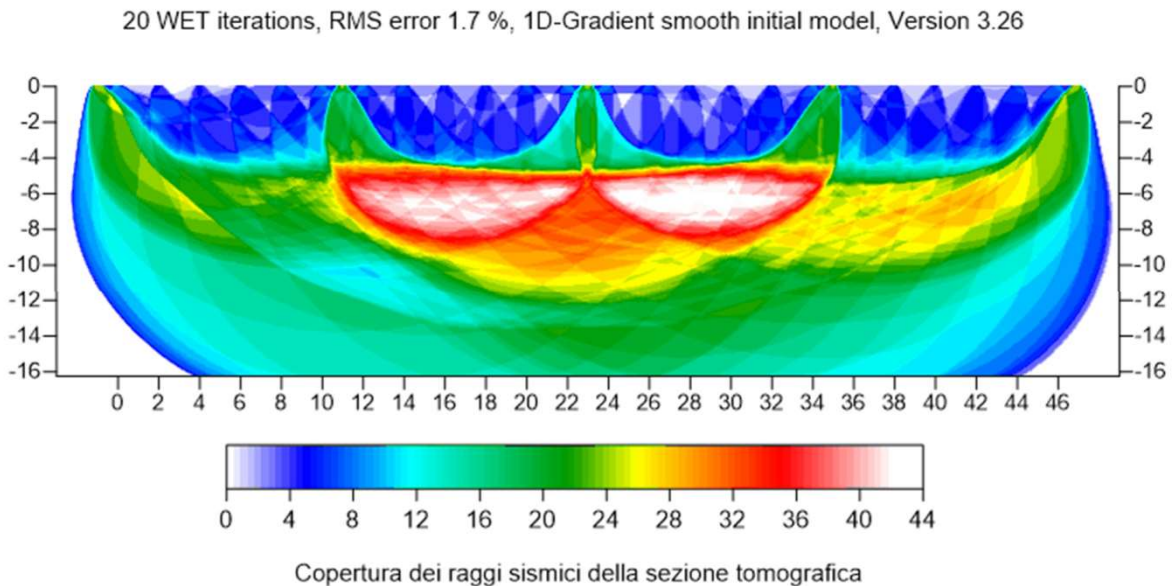
Le acquisizioni di sismica a rifrazione sono state elaborate anche con **tecnica tomografica**, metodo che permette una maggiore risoluzione nella definizione delle velocità delle onde sismiche, l'individuazione di anomalie di velocità ed inoltre consente la ricostruzione di rifrattori a morfologia complessa. Facendo riferimento al picking utilizzato nell'elaborazione classica è stato definito un modello iniziale di velocità (1D) in corrispondenza dei 5 shot, utilizzando l'algoritmo Smooth inversion. In seguito è stata fatta l'inversione tomografica vera e propria con 20 iterazioni, tramite il Wavpath Eikonal Traveltime tomography processing, allo scopo di ricostruire i fronti d'onda tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell'equazione Eikonale fino a ridurre al minimo le differenze tra i tempi osservati e quelli calcolati. Di seguito si riporta il grafico con l'andamento in rosso delle domocrone sperimentali ed in blu, a tratteggio, quelle calcolate. La comparazione evidenzia un discreto fitting tra le curve. In termini numerici l'errore RMS (scarto quadratico medio) risulta pari a 0,63 ms e RMS normalizzato = 1,7 % (RMS diviso per il massimo valore dei primi arrivi di tutte le tracce modellate).



Nella figura sottostante si riporta il modello tomografico. Si nota un livello superficiale a bassa velocità, con spessore medio di 3,00 m, delimitato dalla linea di isovelocità pari a 600 m/s. Segue un graduale aumento della velocità con passaggio a terreni a maggiore rigidità contrassegnato dalle linee di isovelocità pari a 2200 – 2400 m/s, ad una profondità compresa tra 7,00 m e 12,00 m da p.c..



Nella figura seguente si riporta la densità delle distribuzioni dei raggi sismici lungo la sezione tomografica. Si nota una buona copertura dei raggi sismici, in particolare nella porzione centrale della sezione tra 5,00 m e 9,00 m di profondità da p.c

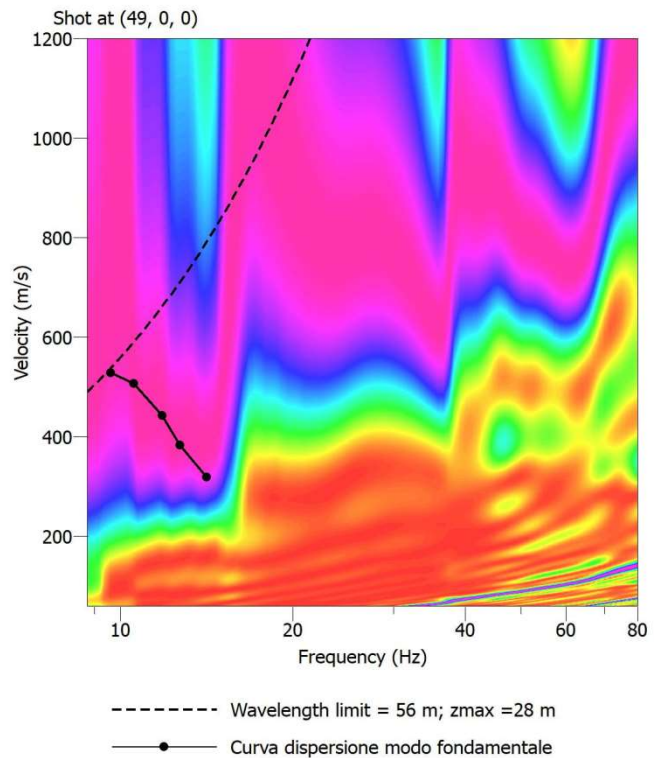


Elaborazione indagine MASW

Dall'elaborazione dei dati sono state ricavate per ogni shot le densità spettrali nel piano frequenza-velocità di fase delle onde superficiali e per il picking della curva di dispersione è stato usato lo spettro che meglio ne permetteva la definizione.

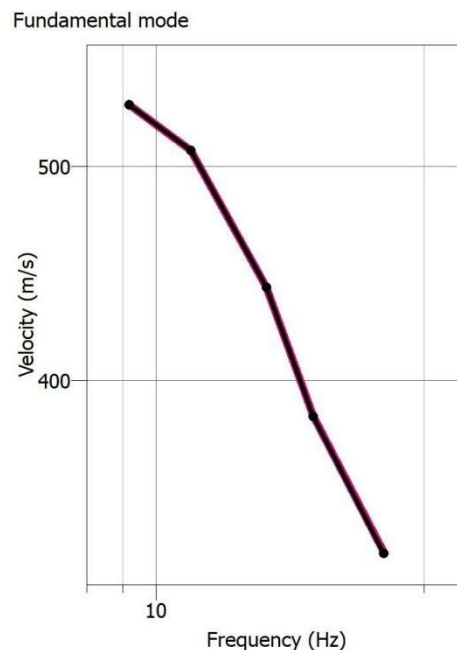
Nella figura accanto si riporta la densità spettrale dello shot eseguito a 3,00 m dal geofono 24, con la definizione della curva di dispersione (massimi dello spettro) attribuita al modo fondamentale.

Sui dati è stata verificata la coerenza di fase del segnale per determinare la frequenza minima affidabile risultata di 9,50 Hz, pari ad una lunghezza d'onda di circa 56,00 m, pertanto l'indagine ha permesso di investigare il sottosuolo fino ad una profondità massima stimabile in circa 28,00 m dal p.c ($\lambda/2$).



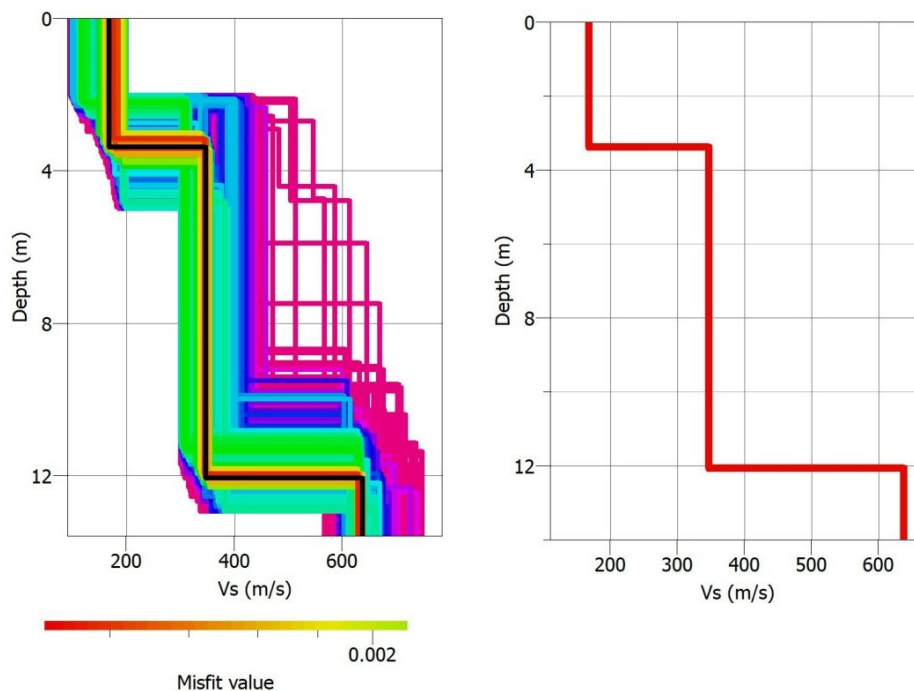
Il processo d'inversione è iniziato ipotizzando due strati con variazioni molto ampie dei parametri di rigidità. Successivamente il modello è stato affinato implementando anche i risultati della rifrazione in onde P e ricavando la curva di dispersione teorica del modello che meglio approssima quelle sperimentali.

Nella figura accanto si riporta il grafico per confrontare la curva di dispersione sperimentale (linea nera), con quella teorica relativa al modello con miglior misfit, circa $\approx 0,11\%$ (linea rossa).



Il profilo verticale del parametro velocità delle onde di taglio (V_s) relativo a tale modello è graficato nella figura sottostante a sinistra (linea nera); le linee variamente colorate rappresentano modelli con scarti maggiori rispetto al modello sperimentale.

Il profilo con valore minimo di misfit è riportato per maggiore chiarezza nel grafico a destra.



Il profilo verticale delle velocità delle onde di taglio, ubicato indicativamente tra i geofoni 17 e 18 è riassunto nello schema seguente:

- ✓ un primo sismostrato caratterizzato da minime oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base, rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a **168 m/s** e **3,40 m** dal p.c.
- ✓ un secondo sismostrato caratterizzato da minime oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base, rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a **347 m/s** e **12,00 m** dal p.c.
- ✓ un terzo sismostrato identificabile, dati i limiti e le risultanze della presente indagine, come semispazio omogeneo con minime variazioni del valore della velocità di onde di taglio, rispetto al valore del modello con miglior misfit pari a circa **639 m/s**.

Per quanto riguarda il grado d'incertezza del risultato osserviamo che in un ampio intervallo di profondità la variabilità del dato sperimentale si mantiene entro limiti più che accettabili, con buona convergenza verso il modello migliore.

7 Rigidità sismica e frequenza naturale di vibrazione del terreno

In caso di evento sismico possono verificarsi fenomeni di amplificazioni del moto del terreno sia in durata che in ampiezza per determinate frequenze, legate al profilo verticale della rigidità del terreno. L'amplificazione sarà tanto maggiore quanto più è forte il contrasto di impedenza sismica tra due strati, definita come il prodotto della velocità delle onde di taglio (esprese in Km/s) per la densità (espressa in t/m^3) del mezzo in cui l'onda si propaga, secondo la seguente relazione:

$$R = \rho * V_s$$

Nella tabella seguente si riportano i valori della rigidità sismica stimata per i sismostrati individuati da cui nota un contrasto di rigidità tra i primi due sismostrato e quello sottostante.

Sismostrati	R ($t/m^3 \times Km/s$)
A	0,32
B	0,71
C	1,42

Un parametro da considerare nella progettazione delle strutture è rappresentato dalla frequenza naturale di vibrazione del terreno, in corrispondenza della quale si ha la massima amplificazione per effetti stratigrafici a causa di riflessioni multiple delle onde di taglio generate da un sisma alla superficie libera del terreno.

La situazione maggiormente gravosa nella progettazione si avrà qualora la frequenza propria di un edificio in progetto coincide con quella di vibrazione naturale del terreno (fenomeno della doppia risonanza). Da tener presente inoltre, che danni strutturali originati nelle fasi iniziali del sisma comportano una riduzione delle frequenze proprie dell'edificio, pertanto si dovrebbe fare attenzione a frequenze naturali del terreno fino a valori pari a circa 30%-40% della frequenza del primo modo di un edificio (Clinton et al., 2006).

In modelli di sottosuolo semplici, monodimensionali, schematizzati da coperture detritiche soprastanti strati con maggiore rigidità sismica è possibile stimare tale frequenza facendo il rapporto tra la media delle velocità delle onde di taglio delle coperture e quattro volte lo spessore H, secondo la seguente relazione: $f_n = V_s/4H (2n-1)$ con $n = 1, 2, \dots, \infty$

Nella tabella seguente è riportata la stima della frequenza fondamentale di vibrazione naturale del sito calcolata in base al profilo verticale delle V_s definito dall'indagine MASW.

V_s sismostrato (A + B)	V_s sismostrato C	H (A + B)	Frequenza di risonanza terreno
266 m/s	638 m/s	12,00 m	$\approx 5,53$ Hz

Tale frequenza ricade nel campo di interesse ingegneristico, 1 Hz – 10 Hz.

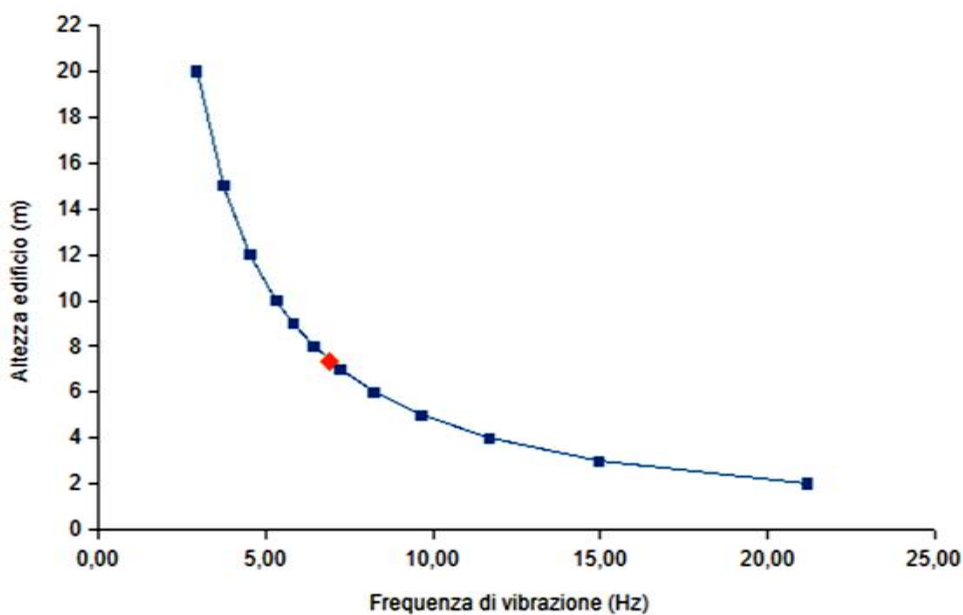
La frequenza riportata in tabella è indicativa, si ricorda infatti che nella letteratura scientifica internazionale la metodologia di indagine sperimentale riconosciuta per la misura delle frequenze di risonanza dei terreni è quella dei rapporti spettrali H/V o sismica passiva a stazione singola (Nogoshi e Igarashi, 1979; Nakamura, 1989).

A titolo di esempio nel caso di edifici tamponati in cemento armato il modo fondamentale di vibrazione può essere stimato tramite la formula di Ricci (2009):

$$T = 1/f = 0,026 H^{0,86}$$

H = altezza costruzione da piano fondazione; T = periodo struttura; f = frequenza struttura

Di seguito si riportano in blu i valori della frequenza di vibrazione di edifici di varia altezza utilizzando la formula descritta; in rosso si indica l'altezza di un edificio, circa 7,35 m, con frequenza corrispondente a quella stimata per il sito di progetto ($f_0 = 5,53$ Hz).



8 Categoria suolo di fondazione

La stima degli effetti amplificativi di un sisma collegati alla stratigrafia locale può essere fatta utilizzando un approccio semplificato che si basa sulla individuazione della categoria di sottosuolo del sito di studio (Tab. 3.2.II, NTC 2018). Le categorie di sottosuolo sono distinte dalla normativa in base alla profondità del bedrock sismico (substrato con $V_s > 800$ m/s) ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$, (in m/s) definita con la seguente espressione:

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

con

h_i , spessore dell' i -esimo strato;

V_s , velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato; N ,

numero di strati;

H , profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s

La profondità H del substrato è riferita al piano di posa per le fondazioni superficiali, alla testa dei pali per fondazioni profonde, mentre per opere di sostegno di terreni naturali è riferita alla testa dell'opera. In riferimento alle opere di sostegno di terrapieni la profondità è riferita al piano di posa dell'opera di fondazione. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

L'indagine MASW ha consentito di esplorare il sottosuolo fino ad una profondità massima di circa 28,00 m dal p.c., profondità entro la quale non è stato individuato il bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s). In base al contesto geologico locale si ritiene di poter estendere la velocità del semispazio fino ad almeno trenta metri di profondità dal p.c., pertanto facendo riferimento al profilo verticale delle onde S elaborato nel capitolo 6, i terreni di copertura presentano rispetto al p.c., una velocità equivalente $V_{seq} = V_{s30} = 409$ m/s.

In riferimento alla tabella 3.2.II delle NTC2018 si attribuisce il sito in esame alla categoria di sottosuolo **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.*

9 Unità sismo-stratigrafiche

Le indagini hanno permesso di definire tre unità sismo-stratigrafiche con differenti caratteristiche elastiche. L'attribuzione litologica ai vari sismostrati è stata fatta sulla base delle informazioni ricavate

dal modello geolitologico ricostruito dal rilevamento geologico e dal sondaggio geognostico eseguiti. Le profondità dei sismostrati sono fornite, quando possibile, sulla base dei dati dell'indagine di sismica a rifrazione elaborata con tecnica classica.

Di seguito si riporta lo schema del modello sismostratigrafico individuato:

✓ **Unità A:** volumi di terreno di scarsa rigidità sismica riferibili ad una coltre detritica allentata ed areata. La base del sismostrato è stimata a profondità comprese tra 3,10 m e 3,70 m da p.c..

✓ **Unità B:** volumi di terreno di discreta rigidità sismica riferibili a depositi addensati di sabbie ciottolose e ghiaiose. La base del sismostrato è stimata a profondità compresa tra 7,00 m e 13,70m da p.c.

✓ **Unità C:** volumi di terreno di buona rigidità sismica riferibili a depositi conglomeratico – sabbiosi cementati.

I valori delle velocità delle onde sismiche, stimate nei paragrafi precedenti, consentono di determinare una serie di parametri che descrivono il comportamento dei terreni sotto condizioni dinamiche.

Nella Tabella sottostante sono riassunti i parametri calcolati:

Sismo-strato	V_S (m/s)	G_0 (MPa)	E_0 (MPa)	E_s (MPa)	ρ (gr/cm ³)
A	168	54	162	2,9	≈ 1,93
B	347	246	131733	33,3	≈ 2,05
C	639	908	2622	259,7	≈ 2,22

- V_p = Velocità delle onde di compressione, V_s = Velocità delle onde di taglio, ν = Coefficiente di Poisson, G_0 = modulo di deformazione di taglio, E_0 = modulo elastico dinamico, E_s = modulo elastico statico, ρ = densità geofisica;

Per quanto riguarda la velocità delle onde di compressione (V_p), del sismostrato C, l'elaborazione dei dati fornisce solo la velocità apparente e non quella reale pertanto i valori dei corrispondenti parametri sono solo indicativi.

Risultati della prospezione sismica a rifrazione Base 2 SIS2

La geometria dello stendimento è caratterizzata da distanza intergeofonica pari a 2,00 m, per una lunghezza complessiva di 46,00 m; le energizzazioni sono state eseguite in 5 distinte posizioni:

- esterna al canale 1 (x = - 1,00 m)
- intermedia ai canali 6 e 7 (x = 11,00 m)
- centrale tra i canali 12 e 13 (x = 23,050 m)
- intermedia ai canali 18 e 19 (x = 35,00 m)
- esterna al canale 24 (x = 47,00 m)

Lo stendimento è stato realizzato su una superficie subpianeggiante pertanto per l'elaborazione dei dati non sono state apportate al modello correzioni topografiche. I tempi di primo arrivo registrati da ciascun geofono e la configurazione dello stendimento sono riportati nella tabella seguente:

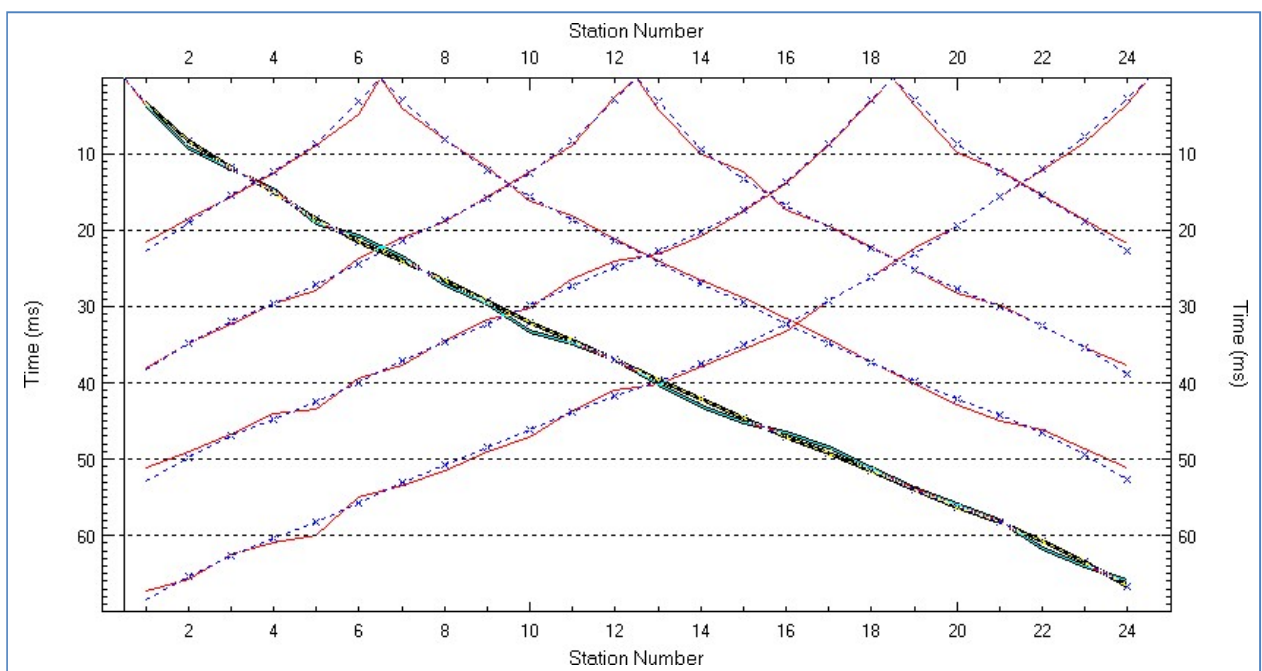
Tempi primi arrivi (ms)									
					Shot B				
1	0,0	0,00	0,00	3,80	21,50	38,00	51,20	67,30	
2	0,0	2,00	0,00	9,20	18,40	34,90	49,10	65,80	
3	0,0	4,00	0,00	12,00	15,70	32,40	46,80	62,50	
4	0,0	6,00	0,00	14,60	12,50	29,70	44,10	60,90	
5	0,0	8,00	0,00	19,00	8,80	27,90	43,40	59,90	
6	0,0	10,00	0,00	20,80	4,90	23,70	39,40	54,90	
7	0,0	12,00	0,00	23,40	4,10	20,90	37,70	53,50	
8	0,0	14,00	0,00	27,20	8,20	18,80	34,50	51,60	
9	0,0	16,00	0,00	29,60	11,80	15,60	31,80	49,10	
10	0,0	18,00	0,00	33,20	16,20	12,40	30,30	47,10	
11	0,0	20,00	0,00	34,80	18,10	8,80	26,40	43,70	
12	0,0	22,00	0,00	37,00	21,20	2,60	24,00	40,90	
13	0,0	24,00	0,00	40,20	24,10	4,30	23,10	40,10	
14	0,0	26,00	0,00	43,00	26,50	10,10	20,80	37,90	
15	0,0	28,00	0,00	45,20	28,80	12,40	17,60	35,60	
16	0,0	30,00	0,00	46,60	31,60	17,40	13,80	33,30	
17	0,0	32,00	0,00	48,40	34,30	19,40	8,90	29,30	
18	0,0	34,00	0,00	51,20	37,40	22,20	3,10	26,10	
19	0,0	36,00	0,00	53,80	40,20	25,30	3,70	22,40	
20	0,0	38,00	0,00	56,00	42,80	28,20	9,80	19,40	
21	0,0	40,00	0,00	58,00	44,90	29,90	12,10	15,60	
22	0,0	42,00	0,00	61,60	46,20	32,60	15,40	12,10	
23	0,0	44,00	0,00	64,00	48,70	35,40	18,70	8,60	
24	0,0	46,00	0,00	66,00	51,10	37,60	21,70	3,60	

Facendo riferimento al picking utilizzato nell'elaborazione classica è stato definito un modello iniziale di velocità (1D) in corrispondenza dei 5 shot utilizzando l'algoritmo Smooth inversion; In

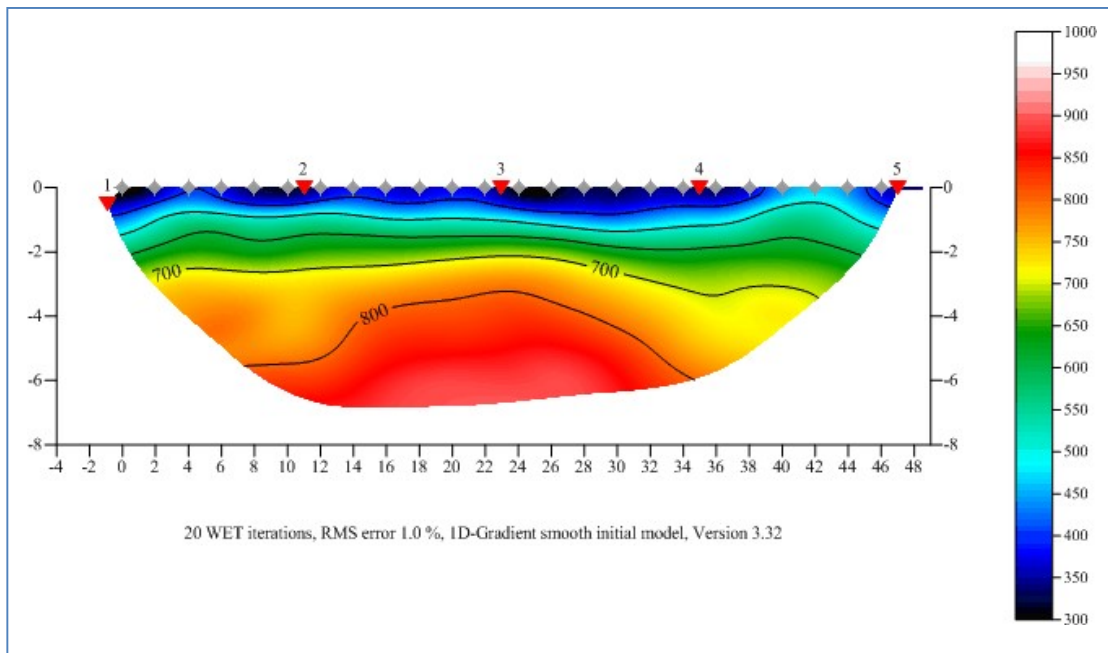
seguito è stata fatta l'inversione tomografica vera e propria con 20 iterazioni, allo scopo tramite il Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing, di ricostruire i fronti d'onda tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell'equazione Eikonal, fino a ridurre al minimo le differenze tra i tempi osservati e quelli calcolati.

Di seguito si riporta il grafico con l'andamento delle domocrone sperimentali in rosso e di quelle calcolate in blu a tratteggio.

La comparazione evidenzia un discreto fitting tra le curve. In termini numerici l'errore RMS (scarto quadratico medio) risulta pari a 0,66 ms e RMS normalizzato = 1,0% (RMS diviso per il massimo valore dei primi arrivi di tutte le tracce modellate).

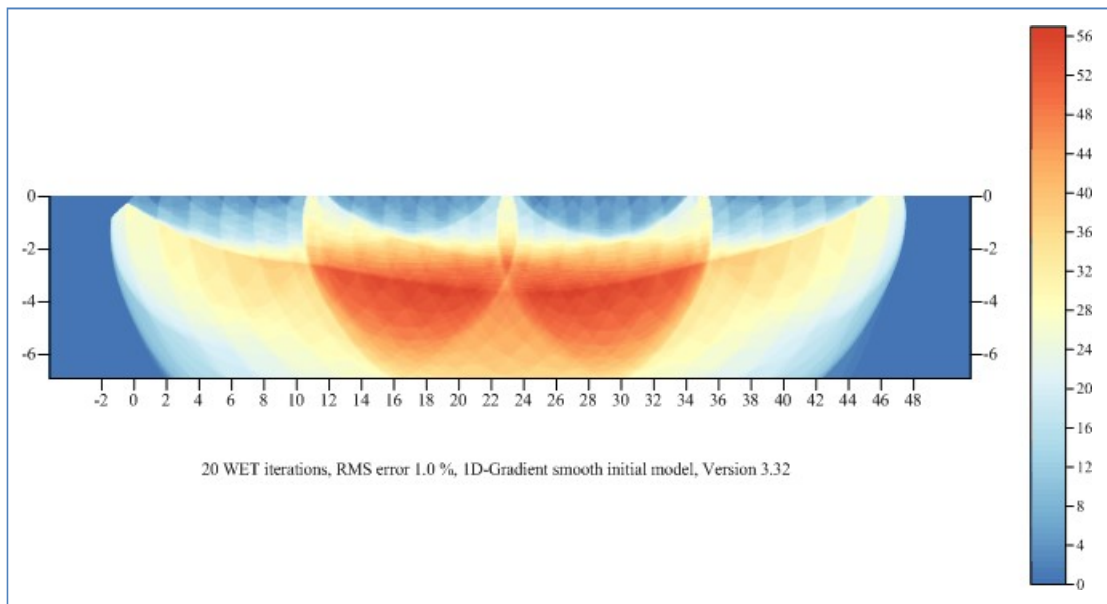


Nella figura successiva si riporta il modello tomografico.



Non si notano anomalie laterali di velocità o zone di inversione con una scarsa definizione in profondità del modello.

Nella figura sottostante si riporta la densità delle distribuzioni dei raggi sismici lungo la sezione tomografica. Si nota una buona copertura fino a circa 8 m di profondità con massimi, nella parte centrale della sezione, tra circa 4-6 m di profondità dal p.c.

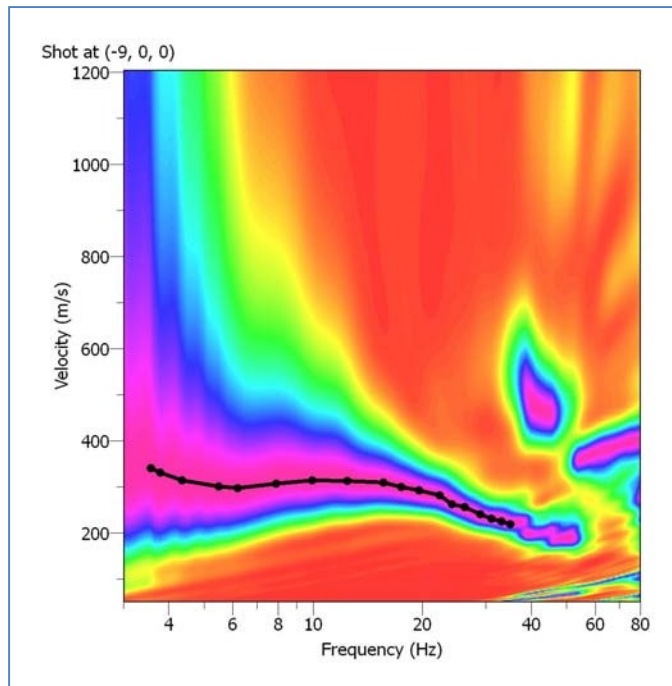


Risultati dell'analisi multicanale onde di superficie - MASW

I dati di campagna sono stati raccolti utilizzando lo stendimento impiegato nella sismica a rifrazione, quindi con geofoni a distanza intergeofonica pari a 2,00 m. Sono stati eseguiti due shot con offset di 3,00 m, esterni rispettivamente ai geofoni 1 e 24 e uno shot esterno al geofono 1 con offset di 9,0 m. La lunghezza delle registrazioni è stata fissata in 2,00 s con frequenza di campionamento pari a 3000 Hz. Con tale configurazione si ottiene una frequenza di Nyquist pari a circa 1500 Hz e una risoluzione in frequenza di 0,50 Hz.

Dall'elaborazione dei dati sono state ricavate per ogni shot le densità spettrali nel piano frequenza-velocità di fase delle onde superficiali e per il picking della curva di dispersione è stato usato lo shots che meglio ne permetteva la definizione.

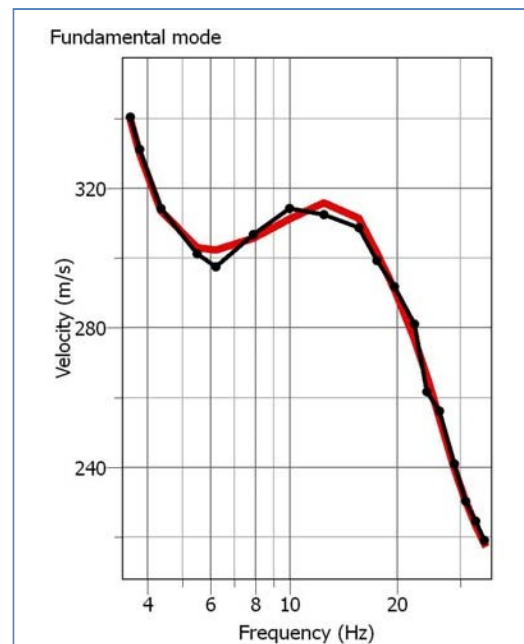
Nella figura accanto si riporta la densità spettrale delle onde superficiali relativa allo shot fatto a 9,00 m dal canale 1 con la definizione della curva di dispersione (massimi dello spettro), attribuita al modo fondamentale.



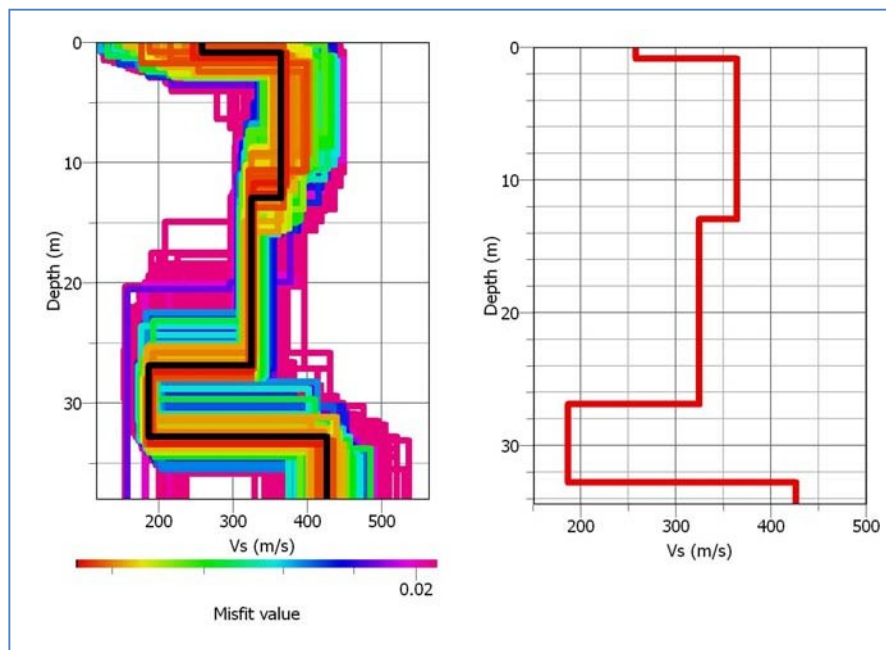
Sui dati relativi è stata verificata la coerenza di fase del segnale per determinare la frequenza minima affidabile risultata pari a circa 3,50 Hz, pari ad una lunghezza d'onda di circa 95,00 m, pertanto l'indagine ha permesso di investigare il sottosuolo fino ad una profondità stimabile in circa 38,00 m dal p.c

Il processo d'inversione con il quale sono ricercati i modelli di sottosuolo che meglio approssimano il dato sperimentale è iniziato ipotizzando due strati con variazioni molto ampie dei parametri di rigidezza. Successivamente il modello è stato affinato facendo riferimento anche ai dati della sismica a rifrazione per ridurre al minimo possibile lo scarto con il dato sperimentale.

Nella figura accanto si riporta il grafico per il confronto tra la curva di dispersione sperimentale (linea nera) attribuita al modo fondamentale con quella teorica relativa al modello con miglior misfit (linea rossa).



Il profilo verticale del parametro Vs relativo a tale modello sismostratigrafico è graficato nella figura sottostante a sinistra (linea nera) mentre le linee variamente colorate rappresentano modelli con scarti maggiori rispetto al modello sperimentale. Il profilo con



valore minimo di misfit, $\approx 1,14 \%$ è riportato per maggiore chiarezza nel grafico a destra.

Il profilo verticale delle velocità delle onde di taglio è così riassumibile:

✓ un primo sismostrato caratterizzato da modeste oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a 257 m/s e 0,80 m.

✓ un secondo sismostrato caratterizzato da modeste oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a 365 m/s e 12,90 m.

✓ un terzo sismostrato caratterizzato da modeste oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a 325 m/s e 26,80 m.

✓ un quarto sismostrato caratterizzato da modeste oscillazioni della velocità delle onde S e della profondità della base rispetto ai valori di riferimento del modello a migliore misfit, pari rispettivamente a 187 m/s e 32,70 m

✓ un quinto sismostrato identificabile, dati i limiti e le risultanze della presente indagine, come semispazio omogeneo caratterizzato da modeste oscillazioni del valore della velocità di onde di taglio rispetto al valore del modello con miglior misfit pari a circa 425 m/s.

Per quanto riguarda il grado d'incertezza del risultato osserviamo che in un ampio intervallo di profondità la variabilità del dato sperimentale si mantiene entro limiti più che accettabili, con buona convergenza verso il modello migliore.

1. Unità sismo-stratigrafiche e parametri elasto meccanici

Le indagini hanno permesso di definire 5 unità sismo-stratigrafiche con differenti caratteristiche elastiche. I valori delle velocità delle onde sismiche stimate nel paragrafo precedente, consentono di determinare alcuni parametri che descrivono il comportamento dei terreni sotto condizioni dinamiche.

Nella Tabella sottostante sono riassunti i parametri calcolati:

Sismo-strato	V _s (m/s)	Go (MPa)	ρ (gr/cm ³)
A	257	142	≈ 2,16
B	365	278	≈ 2,09
C	325	205	≈ 1,94
D	187	59	≈ 1,71
E	425	365	≈ 2,03

V_s = Velocità delle onde di taglio; Go = modulo di deformazione di taglio, ρ = densità geofisica;

2. Categoria di suolo di fondazione

Ai fini della definizione per via semplificata dell'azione sismica di progetto (D.M. 14 gennaio 2008, cap. 3.2.2.), è stata stimata la categoria di sottosuolo di fondazione utilizzando i dati delle onde superficiali elaborati con tecnica MASW.

L'indagine ha consentito di esplorare il terreno fino ad una profondità massima di circa 38 m dal p.c., profondità entro la quale non è stato individuato il bedrock sismico (V_s > 800 m/s).

Facendo riferimento al profilo verticale delle onde S elaborato nel capitolo della Masw i terreni presentano rispetto al p.c. una velocità equivalente, V_{s30} = 312 m/s, calcolata con la seguente espressione:

$$V_{s_{30}} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}} \text{ [m/s]}$$

In riferimento alla tabella 3.2.II del DM 14/01/2008 il sito in esame, tenendo conto delle incertezze correlate alla tipologia di indagine è in modo cautelativo attribuibile alla categoria di sottosuolo C: *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)*

Bibliografia

- Burns S.E., and P.W. Mayne (1996) – Small- and high-strain soil properties using the seismic piezocone. Transportation Research Record 1548, National Acad. Press, Wash. DC, 81-88
- Clinton J.F., Bradford S.C, Heaton T.H., Favela J., (2006) - The observed wander of the natural frequencies in a structure, Bull. Seismol. Soc. Am., 96, 237–257.
- Nakamura, Y., (1989) - A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface: Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute, **30**, 25-33.
- Nogoshi M., Igarashi T. (1970) - On the propagation characteristics of microtremors., J. Seism. Soc. Japan, 23, 264-280
- Rix, G. J., and Leipski, A. E., 1991, Accuracy and resolution of surface wave inversion: Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics, Geotechnical Special Publication No. 29, ASCE, 17-23
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz, A., (1993) - Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics 58, 1314 - 1323

Documentazione fotografica

SIS1

Base sismica dal punto di scoppio A



Base sismica dal punto di scoppio E



Geofono 12 a 22 m



Geofono 24 a 46 m

SIS2



FOTO 1:allineamento della base sismica 1 vista dal punto di scoppio A



FOTO 2: allineamento della base sismica 1 vista dal punto di scoppio E



FOTO 3: geofono 1 a 0,00 metr



FOTO 4: geofono 12 a 22,00 metri

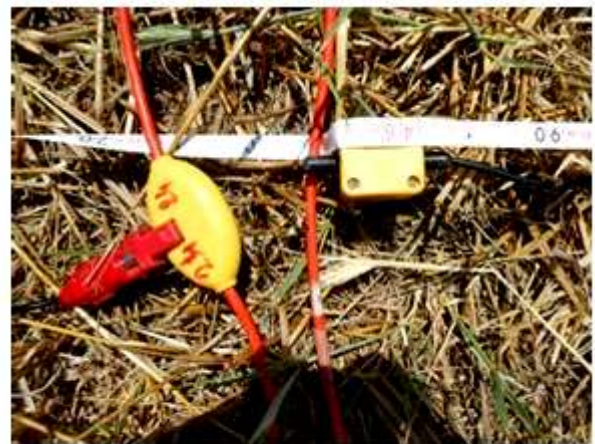


FOTO 5: geofono 12 a 46,00 metri