

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 GEOTECNICA



livello prog.	Cod.	tipo doc.	N° elaborato	N° foglio	Tot. fogli	NOME FILE	DATA	SCALA
PD	202102255	R	A11			AGRIVEN_A11	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 e Inquadramento Normativo	Pag. 2
2- Inquadramento Area d'intervento	Pag. 6
2.1-Ubicazione area d'intervento	Pag. 6
3 – Lineamenti Geologici e Geomorfologici	Pag. 8
3.1 – Geolitologia	Pag. 8
3.2 - Geomorfologia	Pag. 12
4 – Pianificazione ed esecuzione delle indagini	Pag. 15
4.1 – Metodologia di Indagini adottate	Pag. 15
4.2 – Risultati Indagine Geosismica	Pag. 19
5 – Successione Litostratigrafica	Pag. 20
6 – Sismicità	Pag. 23
6.1 – Inquadramento Sismico	Pag. 23
7 – Caratteri Fisico – Meccanici geotecnici del terreno	Pag. 31
8 – Conclusioni	Pag. 32

APPENDICE

Risultati Indagini Eseguite	Allegato n. 1
Calcoli Portanza Palo	Allegato n. 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"

- 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 delle caratteristiche geotecniche delle litologie affioranti nell'area interessata 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.

È stata così programmata una campagna di studi nel rispetto del DM. 17.01.2018 - *Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»*, che ha previsto uno schema di lavoro come di seguito riportato:

- 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];
- Indagini geognostiche in sito, per la definizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione interessati dalle opere in progetto - [accertamento litotecnico].
- Analisi delle indagini geognostiche, con l'interpretazione delle indagini di campagna e la valutazione delle proprietà elastiche e meccaniche dei terreni investigati [definizione portanza del terreno di fondazione].

Durante la fase preliminare di studio è stata effettuata una ricerca bibliografica alla quale è seguita un esame fotointerpretativo e un successivo rilievo di superficie per verificare lo stato dei luoghi e l'idoneità delle indagini geognostiche in questo caso già eseguite.

La campagna di indagini già eseguita e riscontrabile nella relazione geologica è consistita in:

- 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.



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"

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 considerazioni tecniche conclusive sono state ponderate in funzione della conoscenza geologica della zona e dell'attendibilità dei dati ottenuti, operando con un giusto grado di cautela nella definizione delle principali caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, avvalendosi anche di studi pregressi realizzati nello stesso ambito di riferimento

Dal punto di vista Legislativo, invece, si sono tenute in debito conto le indicazioni programmatiche e tecniche, oltre che le norme, contenute nei seguenti provvedimenti:

- 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 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"*;



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"

- 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*;
- 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 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. 2). L’area d’intervento, però, è compresa integralmente all’interno del Foglio 175 “Cerignola”.

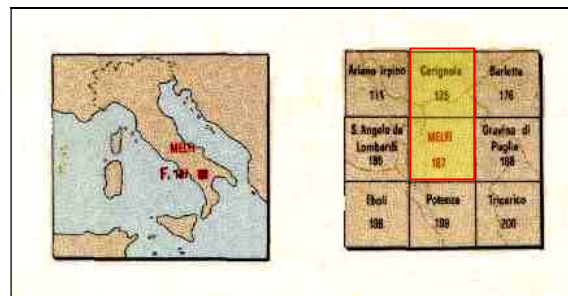


Fig. 2: Inquadramento geologico dell’area

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. 3) **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 quellimetamorfici.

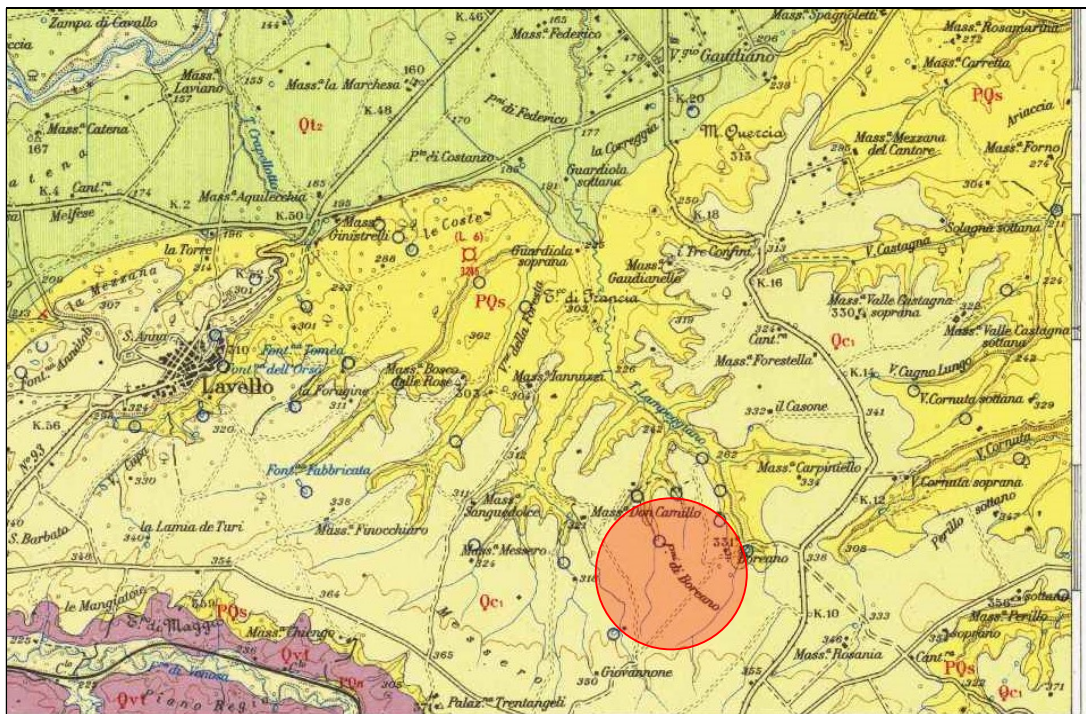


Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

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

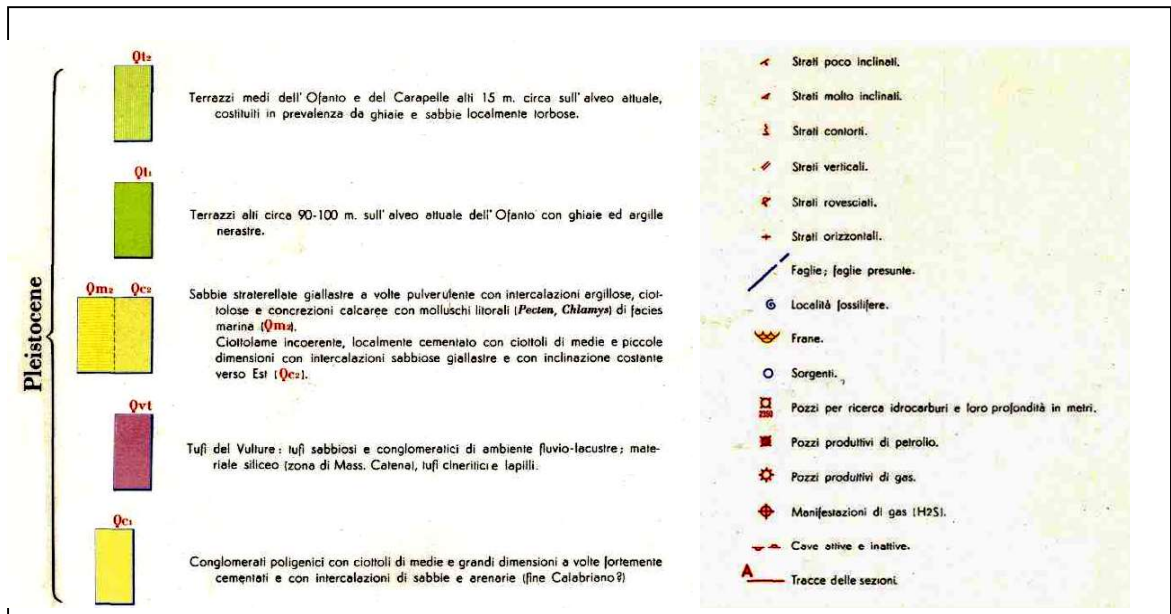


Fig. 3: Stralcio Carta Geologica dell'Area d'intervento con Legenda

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 cinematismo (Fig. 4).

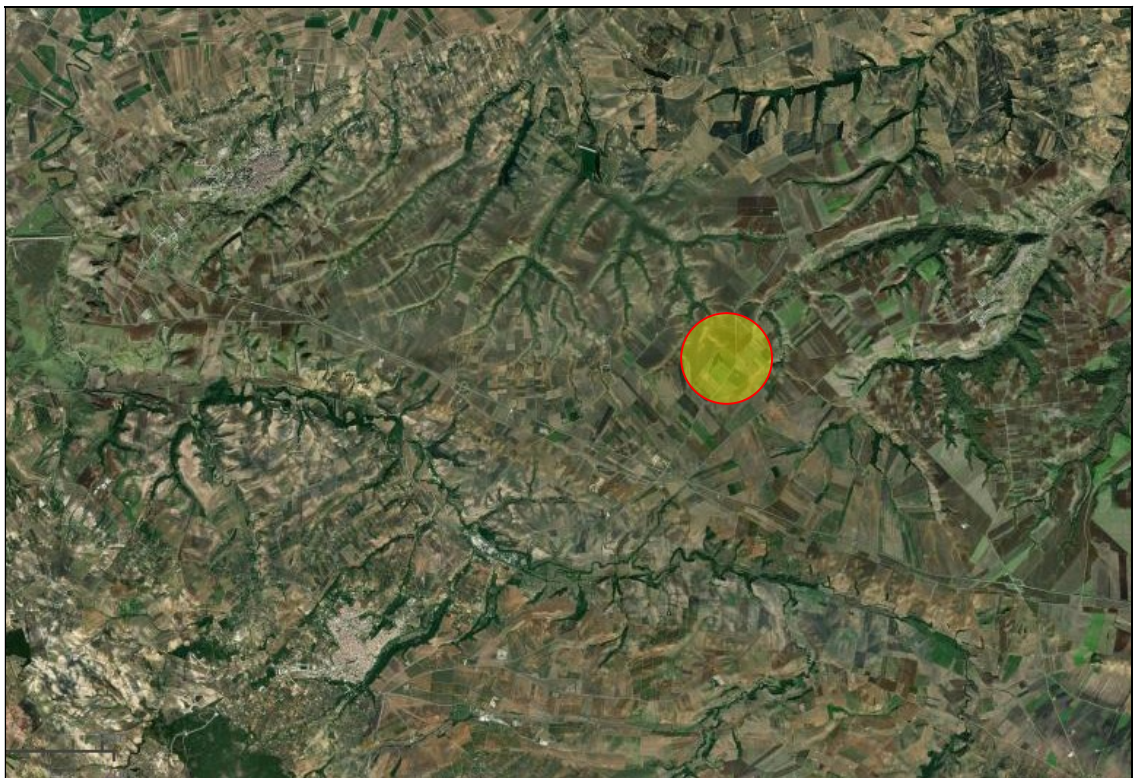


Fig. 4: Situazione Faglie Capaci territorio di Venosa
Tratta <http://sgi.isprambiente.it/ithaca/viewer/index.html>



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"

3.2 – Geomorfologia

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. 5) 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"

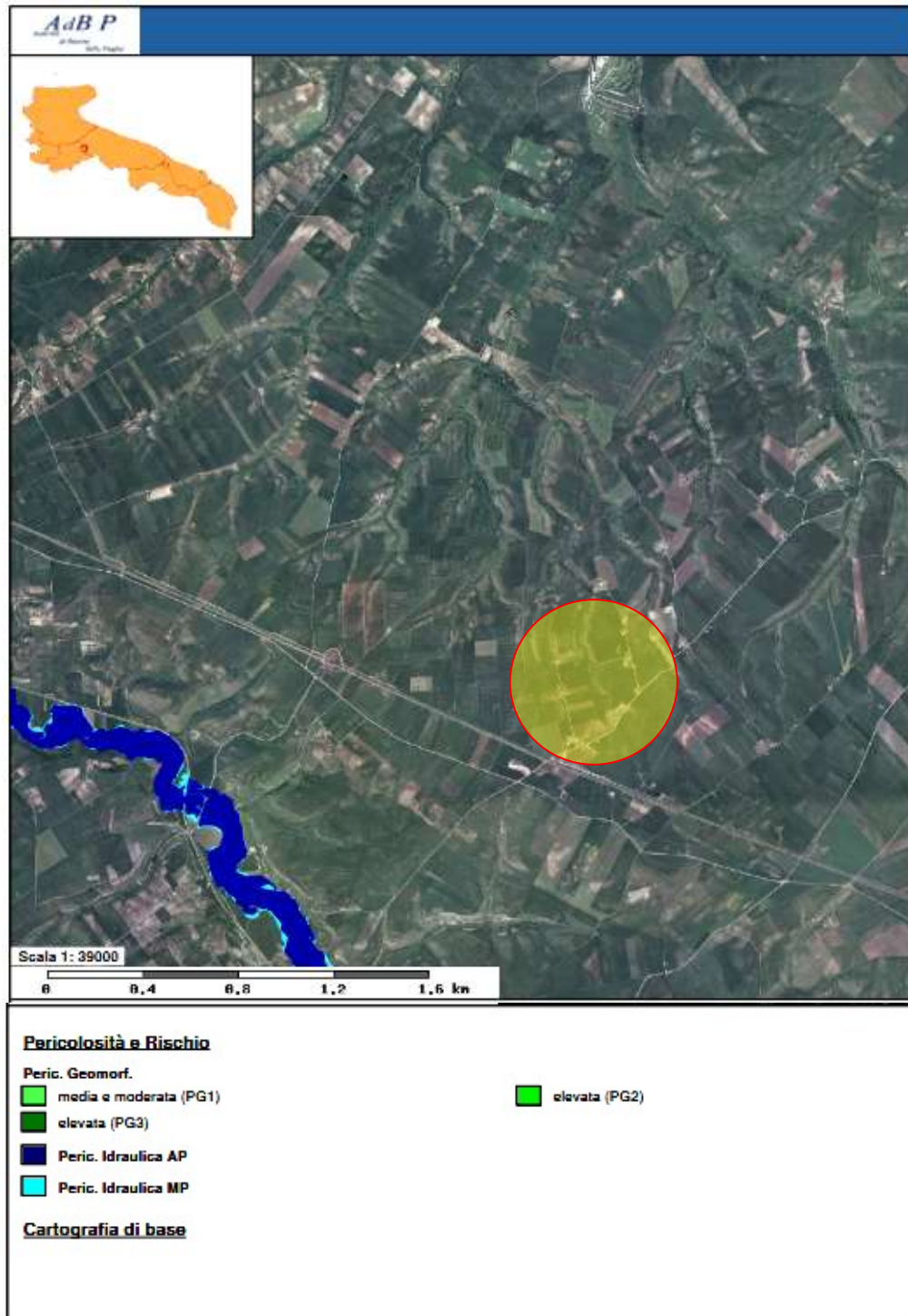


Fig. 5: Carta PAI – Pericolosità Geomorfologica



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 – PIANIFICAZIONE

ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI

L'area è stata investigata con la realizzazione indagini sismiche MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) necessarie per determinare dei parametri sismo-elastici del terreno indagato.

4.1 Metodologie di indagini adottate

Ai fini della definizione del profilo stratigrafico dei terreni di fondazione sono stati realizzati n. 2 stendimenti sismici per la determinazione delle V_{S30} .

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 (V_{seq}).

Per l'interpretazione litostratigrafica delle sezioni sono stati utilizzati i dati ottenuti dal rilevamento geologico. Gli stendimenti sono stati eseguiti in corrispondenza dell'area di intervento, su terreno naturale

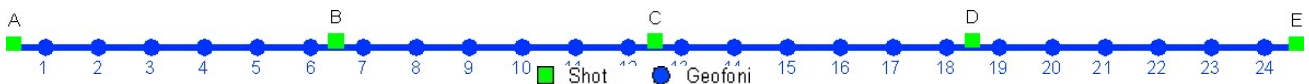


Progetto dell'impianto agrivoltaico e delle relative opere di connessione da realizzare nel Comune di Venosa in Località Boreano di potenza pari a 19.996,20 kWp (19.993,87 kW in immissione) denominato "Agrivoltaico Venosa Boreano"

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	3,0 m	24,00 m	5

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



Nome profilo	Distanza intergeofonica (m)	Offset battute, x = 0 in corrispondenza del geofono 1	Lunghezza stendimento (m)
Base 1	2,00	- 9,00; - 3,00;	24

Tabella 2 - Riepilogo geometria prospezione sismica 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, on-



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"

de 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, $V_S \cong 1.1 V_R$, 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.

Le indagini, i cui risultati sono riportati in Appendice (Allegato A1) sono state eseguite secondo l'ubicazione riportata alla Fig. 6.



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: Ubicazione delle indagini eseguite

 *Stendimenti Sismici*  *Sondaggio Geognostico progressivo*

I risultati delle indagini sismiche sono riportate nella relazione sismica in appendice- Allegato A1



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"

4.2 Risultati Indagine Geosismica

La topografia della superficie del sito investigato è sostanzialmente pianeggiante e quindi non è stato necessario correggere le quote di acquisizione. Il rumore ambientale rilevato è stato assolutamente trascurabile. Per tutte le stese si è utilizzato un sistema di riferimento relativo, la cui origine è posta in corrispondenza dell'endshot esterno al 1° geofono.

L'elaborazione si è sviluppata in due fasi:

- 1) determinazione della curva di dispersione e valutazione dello spettro di velocità;
- 2) Inversione della curva di dispersione interpretata con picking della curva di dispersione, vale adire che sono stati selezionati i punti che appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale con successiva applicazione di algoritmi genetici.

La sovrapposizione della curva teorica e sperimentale fornisce un parametro abbastanza indicativo sull'attendibilità del modello geofisico risultante. Dall'esame dei profili sismici si mette in evidenza una sostanziale omogeneità della successione litologica, pur osservando variazione degli spessori delle singole unità litostratigrafiche che possono essere messe in relazione alle modalità di sedimentazione e alle diverse lavorazioni agricole. In particolare emerge un modello costituito da una sola unità sismostratigrafica, seppur riconducibili ad un solo tipo di terreno, con valori di velocità sismica compatibili con un suolo di tipo B



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 - SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

Il rivelamento di campagna unito alle indagini eseguite hanno confermato i dati rinvenibili in letteratura e cioè la presenza di una sequenza di natura alluvionale formata da un'alternanza di conglomerati poligenici con sabbia

L'analisi delle stratigrafie, ottenute da sondaggi sismici, opportunamente integrate dal sondaggio di riferimento, consente di definire che i terreni in esame, nella loro variabilità granulometrica e nei rapporti geometrici verticali, pur nella loro eterogeneità, mostrano una sostanziale uniformità che permette di inquadrali in unità litotecniche dalle caratteristiche geotecniche definite per una corretta progettazione geotecnica e strutturale delle opere da realizzarsi.

Nell'area di progetto, quindi, è possibile il riconoscimento di una sola Unità litotecnica, oltre il terreno vegetale superficiale, definita:

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. 7



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. 7: 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"

6 - SISMICITÀ

6.1: Inquadramento Sismico

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e s.m.i. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche e sono state definite le nuove norme tecniche per la progettazione di nuove opere, per le opere di fondazione, per le strutture di sostegno, ecc. Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo. A tal fine è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003.

Il Decreto 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" - fornisce le indicazioni per la progettazione e la verifica di nuove strutture secondo criteri antisismici.

Ai sensi del decreto, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferi-



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"

mento VR. In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica del sito.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g = accelerazione orizzontale massima al sito;

F_0 = valore massimo di fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T^*C = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per l'area in esame, sulla base delle indagini eseguite, si verifica l'assoluta stabilità dell'area; ai fini della determinazione dell'azione sismica di progetto e della categoria di sottosuolo (Ordinanza P.C.M. n.3274 del 20/03/03 e aggiornamenti, modifiche, integrazioni, sostituzioni del D.M. 14/09/2005 "Norme Tecniche per le Costruzioni" D.M. Infrastrutture del 17/01/2018), si potranno prendere in considerazione i seguenti elementi di valutazione:

➤ In base alla localizzazione geografica del sito di progetto vengono definiti i parametri di riferimento del moto sismico in superficie, successivamente correlati con gli stati limite e la vita nominale dell'opera. Ciò al fine di definire gli obiettivi da raggiungere in termini di sicurezza e prestazioni delle opere o parti di essa.



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"

- o Individuazione del sito
 - Regione Basilicata, Provincia di Potenza, Comune di Venosa;
 - La velocità media di propagazione potrà essere assunta mediamente di 450 m/s, entro 30 m di profondità delle onde di taglio ($V_{S,eq}$) per deformazioni di taglio $\Phi < 10^{-6}$, dello strato iesimo, per un totale di N strati presente nei 30 m superiori;
 - Sulla base del valore $V_{S,eq}$ avendo considerato l'insieme delle indagini effettuate durante la campagna geognostica, considerando in modo cautelativo i risultati peggiori riscontrati, non considerando l'aumento delle caratteristiche geotecniche dei terreni con la profondità, si ipotizza un sottosuolo riferibile alla categoria "B":

CATEGORIE SUOLI DI FONDAZIONE	
Tab. 3.2.II - D.M. 17 gennaio 2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".	
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 fine 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	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m., caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori di velocità equivalente comprese tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine 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 definiti per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

- Le condizioni topografiche del sito che si colloca su un'area perfettamente pianeggiante con inclinazione media $i < 15^\circ$ (max 2°), sono riferibili alla



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"

categoria "T1", per cui il coefficiente di amplificazione topografica (ST) è pari a 1,0 (valori massimi del coefficiente tab. 3.2. III Norme Tecniche per le Costruzioni 2018).

CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA	
Categoria Topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento
T ₁	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T ₂	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T ₃	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T ₄	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

VALORI MASSIMI DEL COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA		
Categoria Topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S _T
T ₁	-	1,0
T ₂	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T ₃	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T ₄	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Per il calcolo dei parametri sopra citati sono stati considerati i seguenti parametri:

- Classe d'uso: classe nella quale sono suddivise le opere, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso; per le opere in progetto è la II (tab.2.4.II) il cui uso prevede normali affollamenti), per cui il coefficiente d'uso risulta CU=1,0

VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO C _U				
CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C _U	0,7	1,0	1,5	2,0

- Vita nominale dell'opera VN: intesa come il numero di anni nel



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"

quale la struttura, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantiene gli specifici livelli prestazionali di progetto (da questo valore viene calcolato il Periodo di riferimento per l'azione sismica VR come:

$VR=VN*CU$ (dove CU è il coefficiente d'uso);

- Probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR: in funzione dello stato limite di riferimento.

Nel caso dell'opera in oggetto sono considerati i seguenti valori:

Classe d'uso "II": Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente.

Vita nominale VN: 50 anni: costruzioni con livelli di prestazione ordinari. Coefficiente d'uso CU: 1 relativo alla classe d'uso II.

Periodo di riferimento per l'azione sismica: $VR=VN*CU= 50*1 = 50$ anni

In funzione della probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR vengono calcolati i valori ag , $F0$, T^*C e del periodo di ritorno:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

SPETTRI DI RISPOSTA SECONDO LE NTC 2018

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O. - S.LE	30,0	0,441	2,468	0,286
S.L.D. - SLE	50,0	0,569	2,572	0,309
S.L.V. - SLO	475,0	1,716	2,502	0,415
S.L.C. - SLO	975,0	2,373	2,456	0,425



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"

Dove:

- SLE = stati limite di esercizio
 - o SLO = stato limite di operatività: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
 - o SLD = stato limite di danno: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.
- SLU = stati limite ultimi
 - o SLV = stato limite di salvaguardia della vita: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
 - o SLC = stato limite di prevenzione del collasso: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non



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"

strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

COEFFICIENTI SISMICI (Per Stabilità Pendii e Fondazioni)

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,5292	1,0	0,054	0,027
S.L.D.	0,6828	0,47	0,0327	0,0164
S.L.V.	2,0592	0,38	0,0798	0,0399
S.L.C.	2,7581	1,0	0,2813	0,1406

Dove:

β = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito = $0,2 a_{max}$ = accelerazione orizzontale massima attesa al sito

a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido (a_g/g) g = accelerazione di gravità

S_s = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,5 (SLO)-1,5 (SLD)-1,48 (SLV)-1,42 (SLC) S_t = coefficiente di amplificazione topografica = 1,0

Si ottengono i seguenti parametri sismici:



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"

Dati Generali

Località

Indirizzo
Venosa

Lat. Long.

Dati opera

Tipo opera

Classe d'uso

V. Nominale V. Rif.

Parametri sismici su sito di riferimento

SL	TR [Anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec.]
SLO	30.00	0.441	2.468	0.286
SLD	50.00	0.569	2.572	0.309
SLV	475.00	1.716	2.502	0.415
SLC	975.00	2.373	2.456	0.425

Categoria sottosuolo

Categoria topografica

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera

SL	amax [m/s ²]	Beta	khk [-]	kvk [-]	Khi [-]
SLO	0.5292	1.0	0.054	0.027	0.0
SLD	0.6828	0.47	0.0327	0.0164	0.0
SLV	2.0592	0.38	0.0798	0.0399	0.0
SLC	2.7581	1.0	0.2813	0.1406	0.0

Stato limite di riferimento



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 - CARATTERI FISICO-MECCANICI-GEOTECNICI

DEL TERRENO

Sulla base dei report delle indagini geognostiche effettuate sul sito interessato dall'impianto, stabilita la litologia delle formazioni geolitologiche presenti nel sottosuolo e considerando che la falda acquifera non è stata intercettata nel corso dell'indagine diretta del terreno, fino ad una profondità di 15,0 m dal p.c. si passa al calcolo della portanza.

Il carico limite verticale, attesa la categoria di suolo di tipo B, verrà calcolata attraverso la formula di **Terzaghi** in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche del terreno e dell'interfaccia palo-terreno, applicata agli Stati Limite Ultimi, ai sensi del Nuovo Testo Unico per le Costruzioni (NCT 2018).

In appendice all'allegato 2 si riportano i risultati dei calcoli eseguiti con il programma MP della Geostru, licenziato alla scrivente.



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"

8 - CONCLUSIONI

Considerate le risultanze dell'indagine e le finalità del presente studio, teso alla ricostruzione di un modello geotecnico del terreno per eseguire le verifiche fondali dell'impianto agrivoltaico, si traggono le seguenti considerazioni conclusive:

Aspetti geologici- geotecnici

✚ 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 ;



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"

✚ Stante la litologia del luogo si abbia cura di eseguire i lavori di fondazione subito dopo i lavori di scavo al fine di evitare il deterioramento delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni di fondazione.

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

Dovendo sempre supporre un certo grado di imprevedibilità che è proprio delle formazioni geolitologiche, il progettista e/o direttore dei lavori deve verificare, in fase esecutiva, la rispondenza tra quanto previsto e l'effettiva situazione riscontrata, differendo, in caso contrario, le soluzioni progettuali sulla scorta di ulteriori indagini geognostiche e geotecniche.

Sulla base degli studi condotti è possibile affermare che le previsioni progettuali sono compatibili con le condizioni geologiche/geotecniche 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>	5
<i>Elaborazione dati</i>	6
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>	9
<i>Elaborazione indagine MASW</i>	14
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).

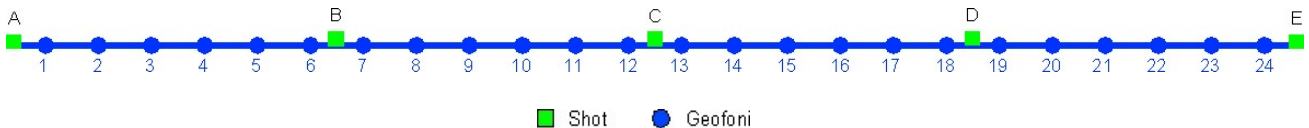
Per l'interpretazione litostratigrafica delle sezioni sono stati utilizzati i dati ottenuti dal rilevamento geologico. La campagna di indagine è consistita in n. 2 stendimenti multicanale su cui è stata condotta una prospezione di sismica a rifrazione in onde P e un'indagine MASW. Lo stendimento è stato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

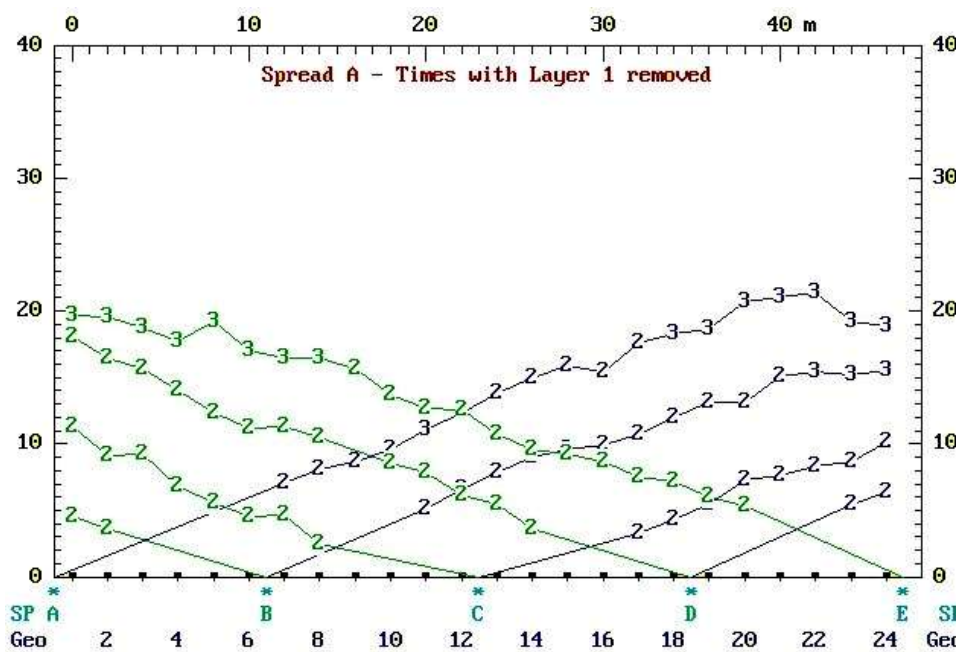
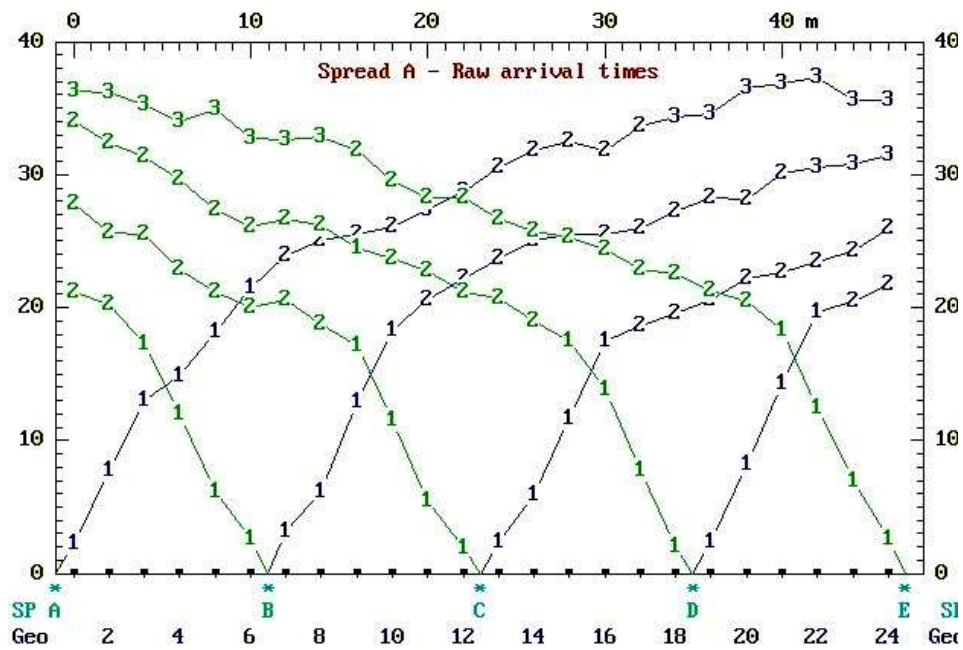
Sismica a rifrazione in onde P (elaborazione classica e tomografica)

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.

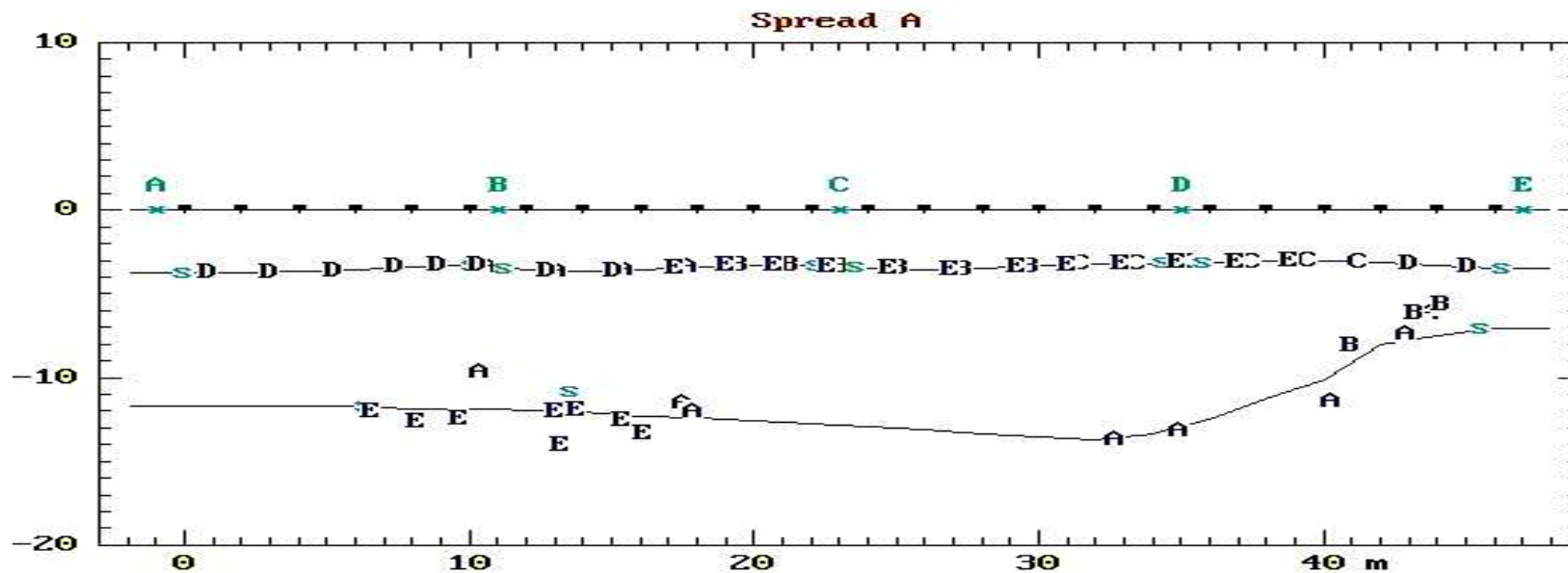


Di seguito si riporta l'output della sezione sismostratigrafica elaborata con tecnica classica, utilizzando il codice di calcolo SIPT2.

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

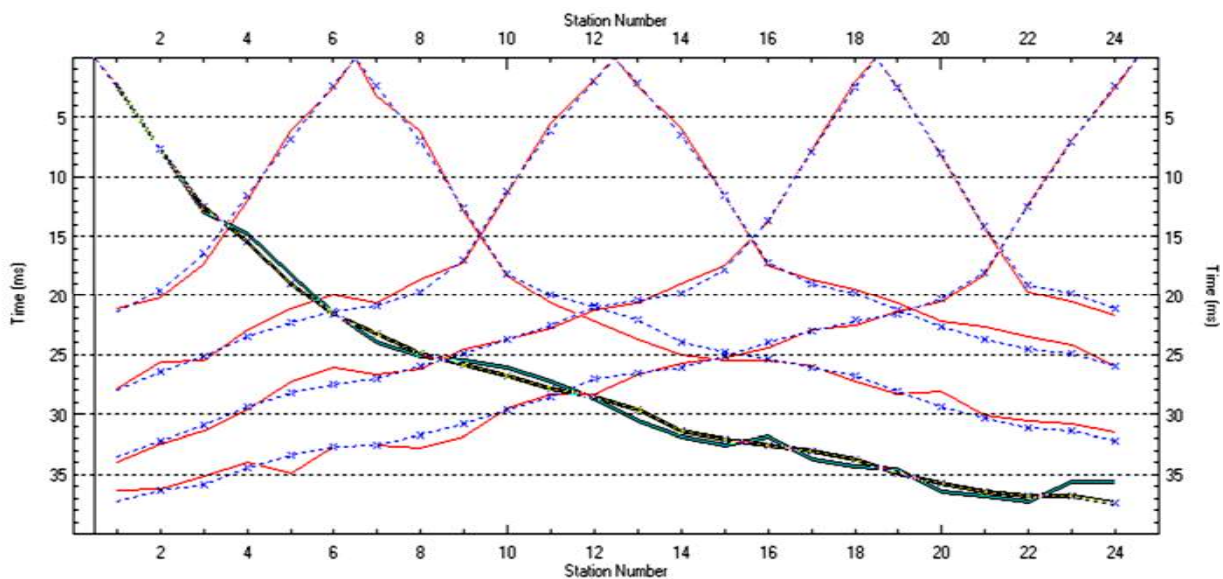
	SP	A	B	C	D	E	
Surface	X-Loc	-----	-1,0	11,0	23,0	35,0	47,0
	Elev	-----	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Layer 2	Depth	-----	3,7	3,4	3,4	3,2	3,5
Layer 3	Depth	-----	11,7	11,9	12,8	12,9	7,0



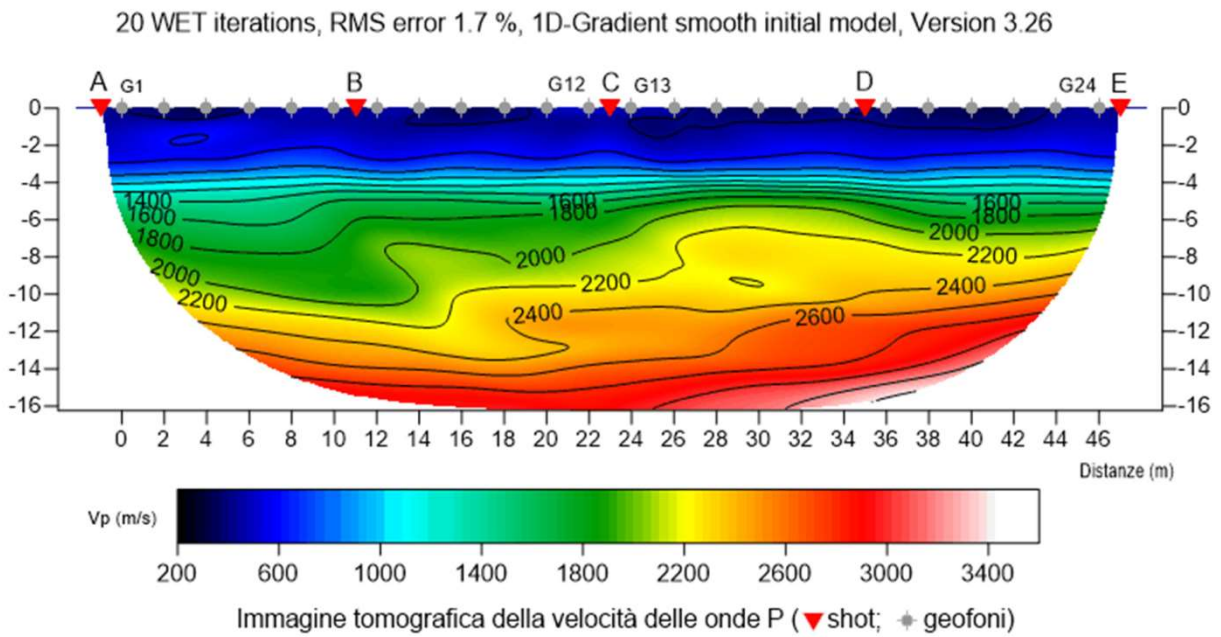
Sezione sismostratigrafica

- 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.

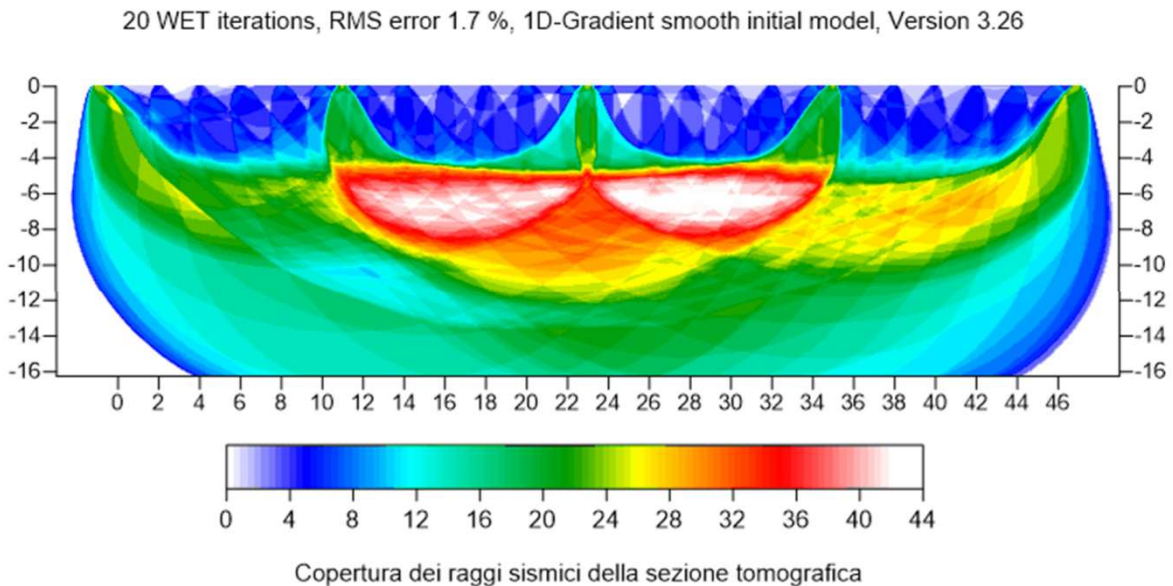
Le acquisizioni di sismica a rifrazione sono state elaborate anche con **tecnica tomografica**, metodo che permette una maggiore risoluzione nella definizione delle velocità delle onde sismiche, l'individuazione di anomalie di velocità ed inoltre consente la ricostruzione di rifrattori a morfologia complessa. 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 Travelttime 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

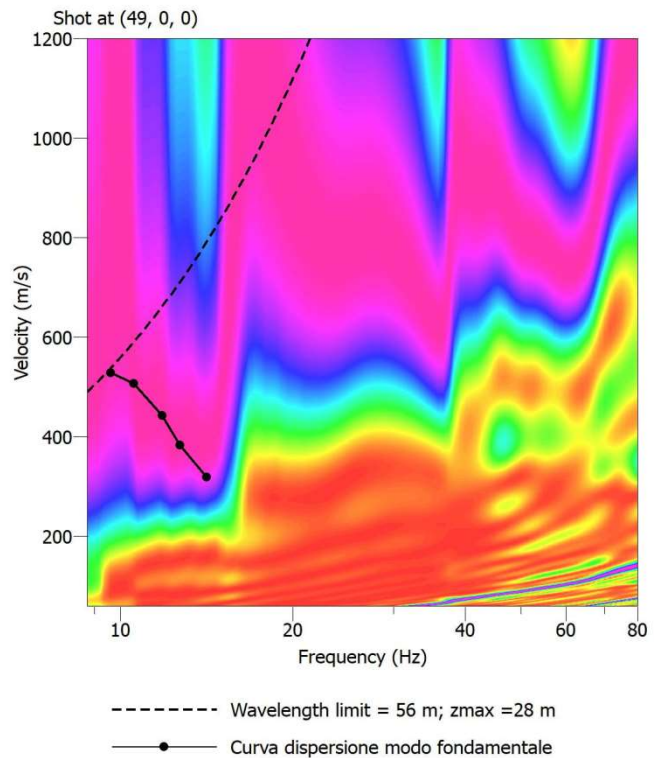


Elaborazione indagine MASW

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.

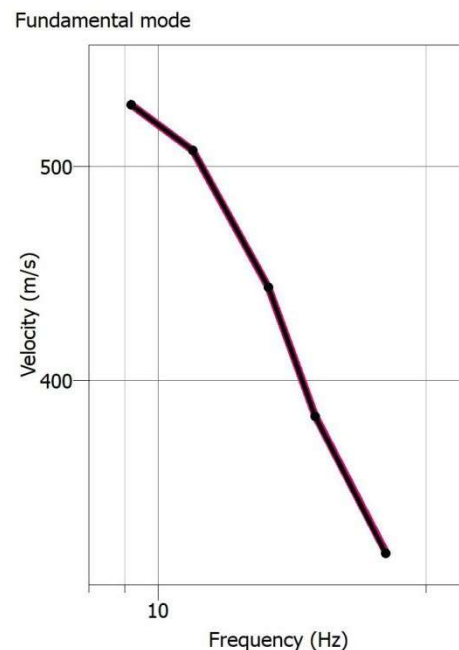
Nella figura accanto si riporta la densità spettrale dello shot eseguito a 3,00 m dal geofono 24, con la definizione della curva di dispersione (massimi dello spettro) attribuita al modo fondamentale.

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 ($\lambda/2$).



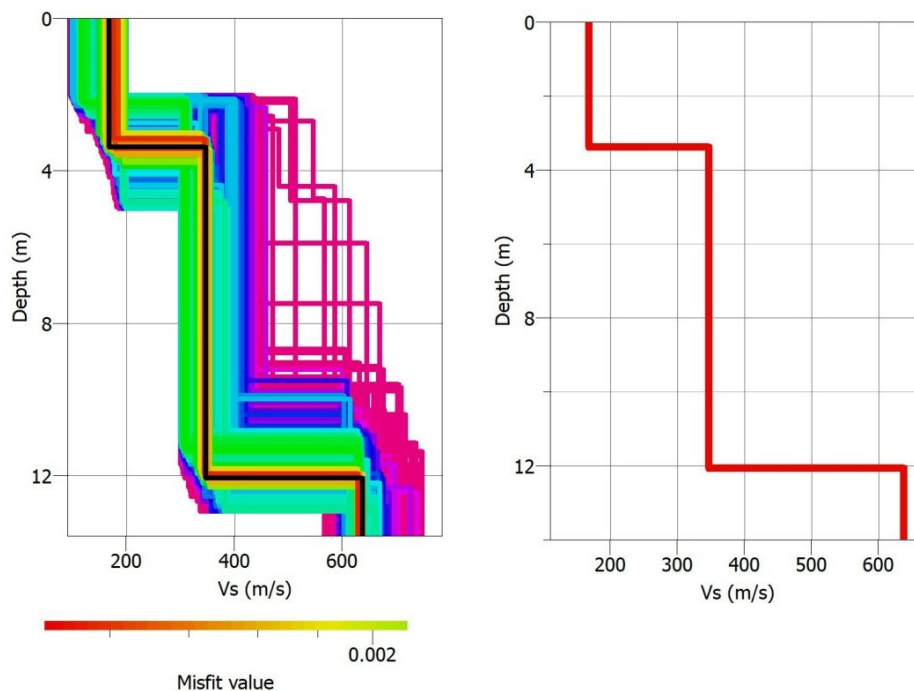
Il processo d'inversione è iniziato ipotizzando due strati con variazioni molto ampie dei parametri di rigidità. Successivamente il modello è stato affinato implementando anche i risultati della rifrazione in onde P e ricavando la curva di dispersione teorica del modello che meglio approssima quelle 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/m³) 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 x 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 sh 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 $n = 1,2,...A\infty$

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

Vs sismostrato (A + B)	Vs sismostrato C	H (A + B)	Frequenza di risonanza terreno
266 m/s	638 m/s	12,00 m	≈ 5,53 Hz

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

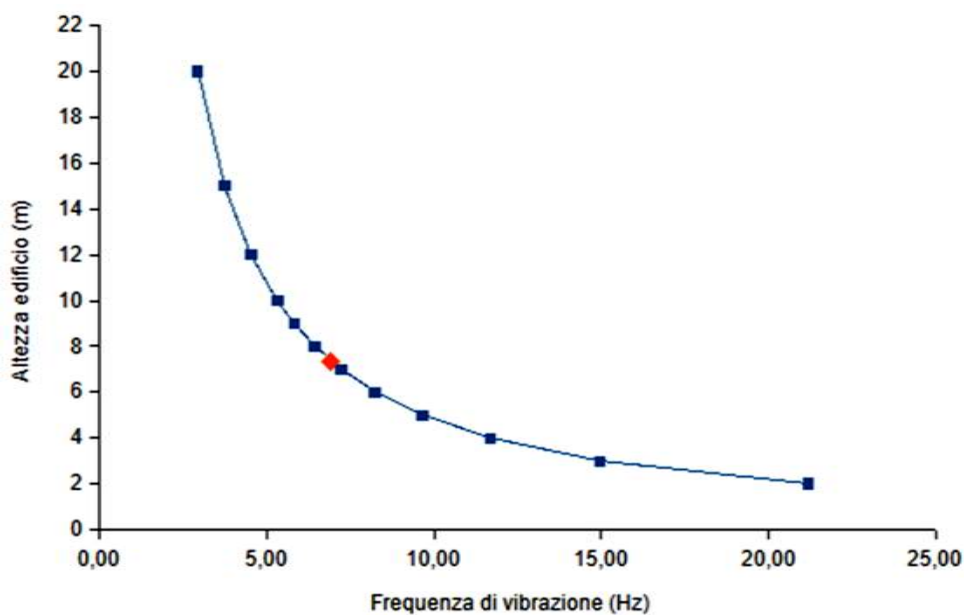
La frequenza riportata in tabella è indicativa, si ricorda infatti che nella letteratura scientifica internazionale la metodologia di indagine sperimentale riconosciuta per la misura delle frequenze di risonanza dei terreni è quella dei rapporti spettrali H/V o sismica passiva a stazione singola (Nogoshi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

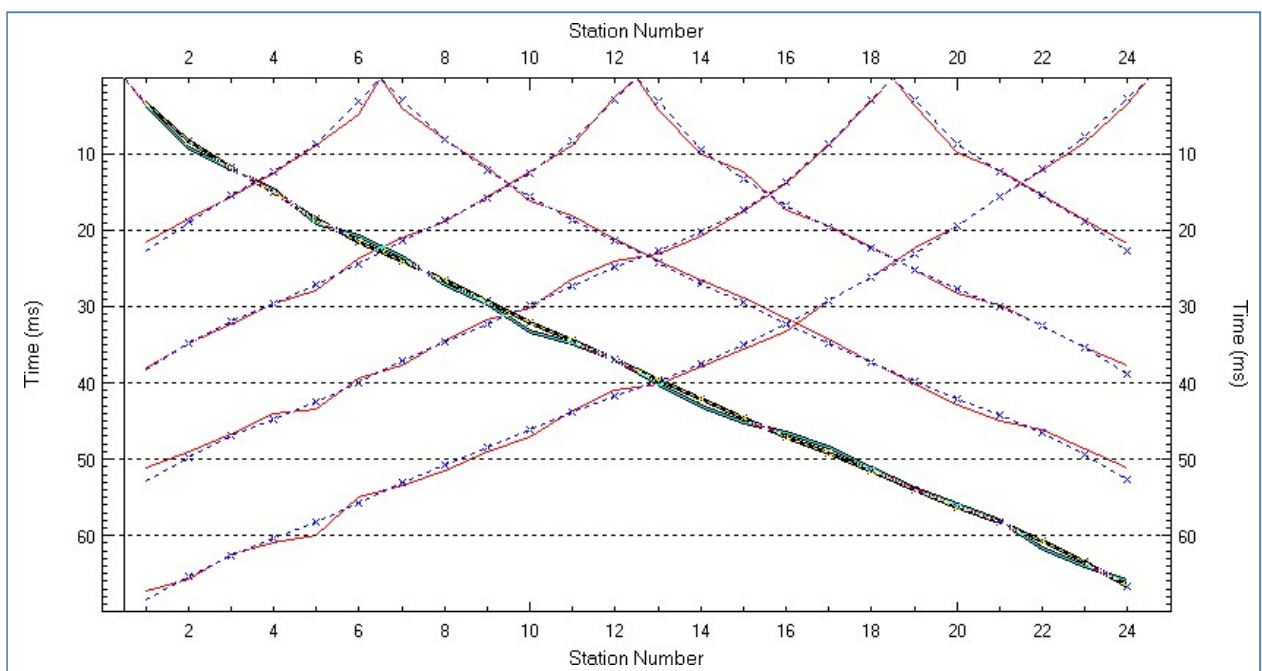
Tempi primi arrivi (ms)									
					Shot B				
1	0,0	0,00	0,00	3,80	21,50	38,00	51,20	67,30	
2	0,0	2,00	0,00	9,20	18,40	34,90	49,10	65,80	
3	0,0	4,00	0,00	12,00	15,70	32,40	46,80	62,50	
4	0,0	6,00	0,00	14,60	12,50	29,70	44,10	60,90	
5	0,0	8,00	0,00	19,00	8,80	27,90	43,40	59,90	
6	0,0	10,00	0,00	20,80	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

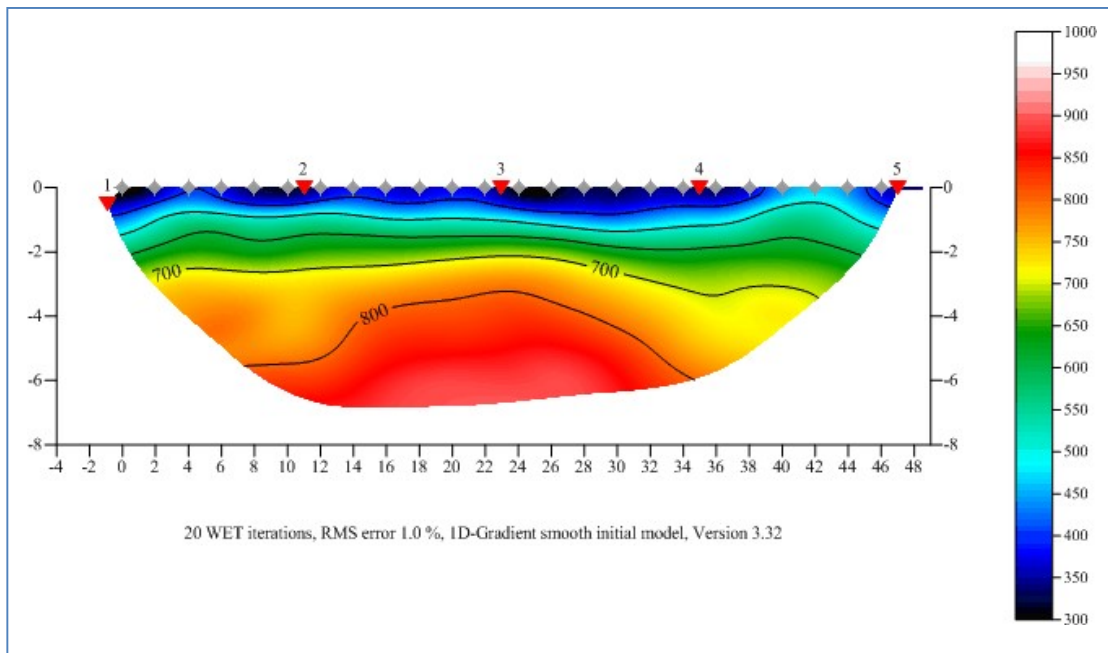
seguito è stata fatta l'inversione tomografica vera e propria con 20 iterazioni, allo scopo tramite il Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing, di ricostruire i fronti d'onda tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell'equazione Eikonal, 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).

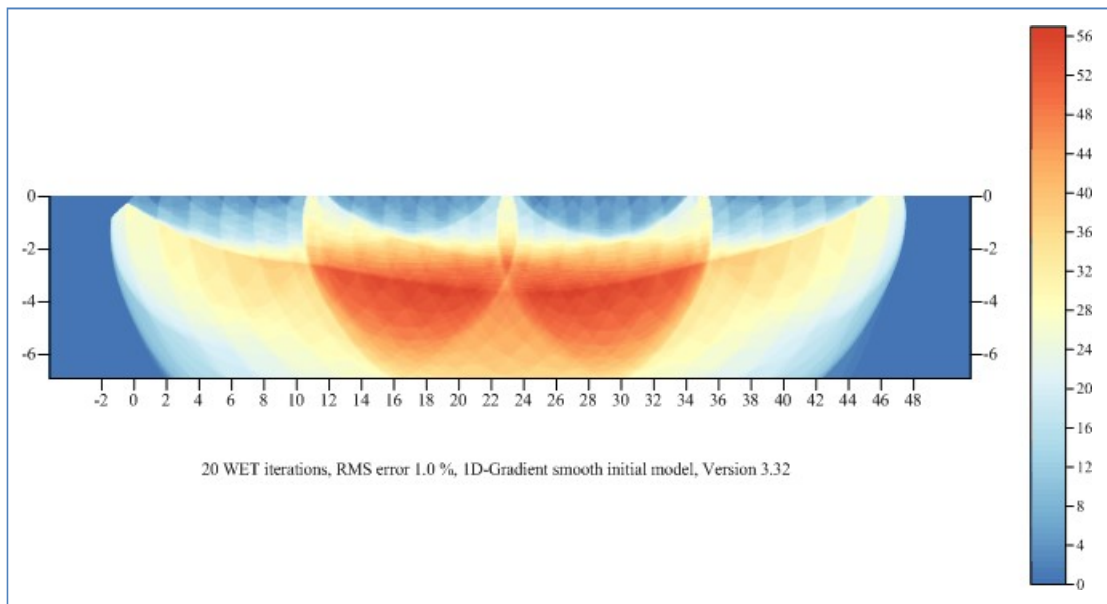


Nella figura successiva si riporta il modello tomografico.



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.

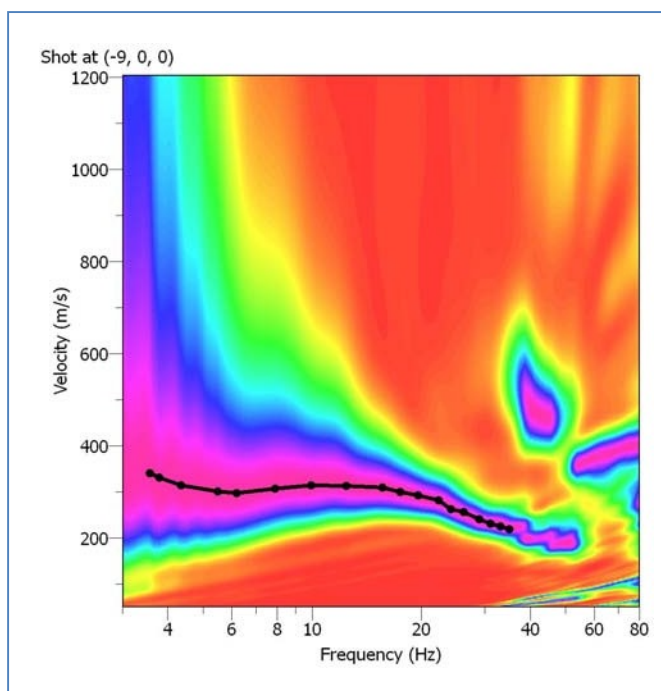


Risultati dell'analisi multicanale onde di superficie - MASW

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.

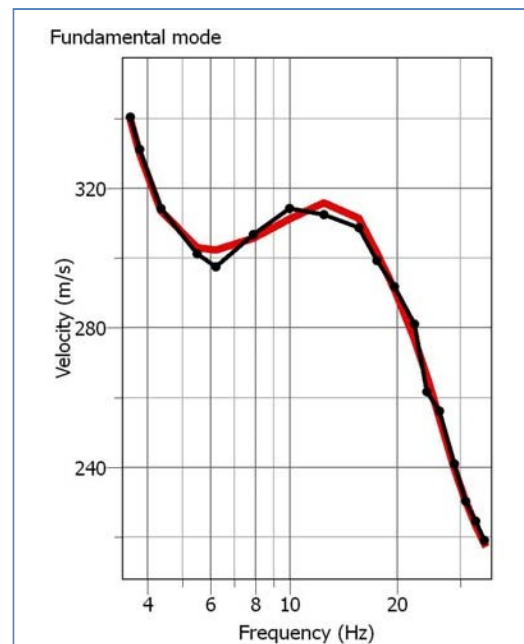
Nella figura accanto si riporta la densità spettrale delle onde superficiali relativa allo shot fatto a 9,00 m dal canale 1 con la definizione della curva di dispersione (massimi dello spettro), attribuita al modo fondamentale.



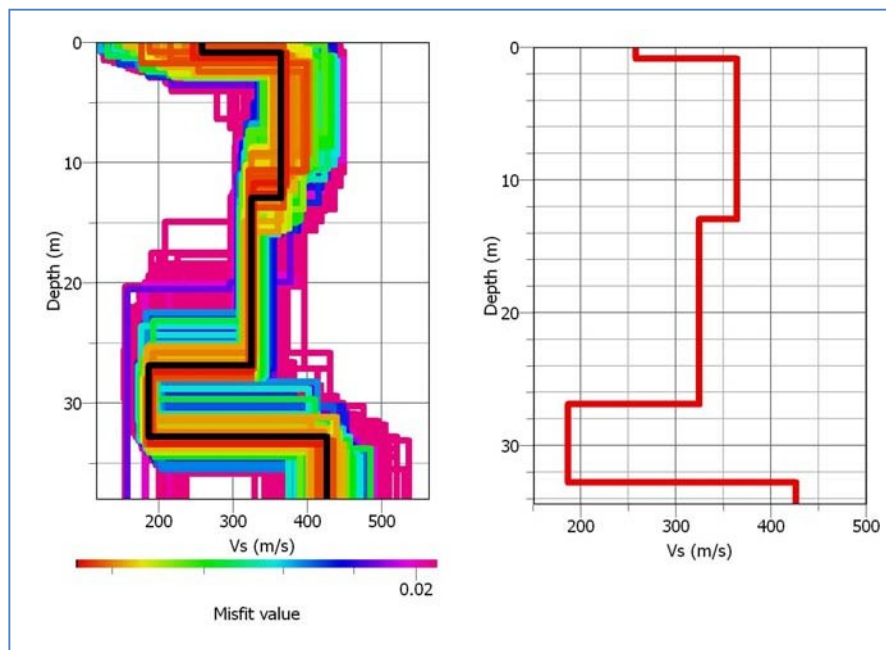
Sui dati relativi è stata verificata la coerenza di fase del segnale per determinare la frequenza minima affidabile risultata pari a circa 3,50 Hz, pari ad una lunghezza d'onda di circa 95,00 m, pertanto l'indagine ha permesso di investigare il sottosuolo fino ad una profondità stimabile in circa 38,00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

PALI DI FONDAZIONE

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

NTC2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» - D.M. 17 gennaio 2018

NTC2008 - Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008.

CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27)

Eurocodice 7: Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.

Eurocodice 8: Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

Carico limite verticale

Il carico limite verticale è stato calcolato con le formule statiche, che esprimono il medesimo in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche del terreno e dell'interfaccia palo-terreno. A riguardo, poiché la realizzazione di un palo, sia esso infisso o trivellato, modifica sempre le caratteristiche del terreno nell'intorno dello stesso, si propone di assumere un angolo di resistenza a taglio pari a:

$$\phi' = \frac{3}{4}\phi + 10 \text{ nei pali infissi}$$

$$\phi' = \phi - 3^\circ \text{ nei pali trivellati}$$

dove ϕ è l'angolo di resistenza a taglio prima dell'esecuzione del palo. Di seguito indicheremo con ϕ il parametro di resistenza scelto.

Ai fini del calcolo, il carico limite Q_{lim} viene convenzionalmente suddiviso in due aliquote, la resistenza alla punta Q_p e la resistenza laterale Q_l .

Resistenza unitaria alla punta

Formula di Terzaghi

La soluzione proposta da Terzaghi assume che il terreno esistente al disopra della profondità raggiunta dalla punta del palo possa essere sostituito da un sovraccarico equivalente pari alla tensione verticale efficace (trascurando pertanto il fatto che l'interazione tra palo e terreno di fondazione possa modificare tale valore) e riconduce l'analisi al problema di capacità portante di una fondazione superficiale.

La formula di *Terzaghi* può essere scritta:

$$Q_p = c \cdot N_c \cdot s_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot D \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma$$

dove:

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2(45 + \phi/2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \phi/2) \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$$

Metodo di Berezantzev

Fondamentalmente *Berezantzev* fa riferimento ad una superficie di scorrimento “alla Terzaghi” che si arresta sul piano di posa (punta del palo); tuttavia egli considera che il cilindro di terreno coassiale al palo ed avente diametro pari all'estensione in sezione della superficie di scorrimento, sia in parte “sostenuto” per azione tangenziale dal rimanente terreno lungo la superficie laterale. Ne consegue un valore della pressione alla base

inferiore a γD , e tanto minore quanto più questo “effetto silo” è marcato, cioè quanto più grande è il rapporto D/B ; di ciò tiene conto il coefficiente N_q , che quindi è funzione decrescente di D/B .

La resistenza unitaria Q_p alla punta, per il caso di terreno dotato di attrito (ϕ) e di coesione (c), è data dall'espressione:

$$Q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

Avendo indicato con:

- γ peso unità di volume del terreno;
- L lunghezza del palo;
- N_c e N_q sono i fattori di capacità portante già comprensivi dell'effetto forma (circolare);

Metodo di Vesic

Vesic ha assimilato il problema della rottura intorno alla punta del palo a quello di espansione di una cavità cilindrica in mezzo elasto-plastico, in modo da tener conto anche della compressibilità del mezzo.

Secondo Vesic i coefficienti di capacità portante N_q e N_c si possono calcolare come segue:

$$N_q = \frac{3}{3 - \sin \phi} \left\{ \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi \right] \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{(4 \sin \phi)} [3(1 + \sin \phi)] \right\}$$

L'indice di rigidezza ridotto I_{rr} nella precedente espressione viene calcolato a partire dalla deformazione volumetrica ε_v .

L'indice di rigidezza I_r si calcola utilizzando il modulo di elasticità tangenziale G' e la resistenza a taglio s del terreno.

Quando si hanno condizioni non drenate o il suolo si trova in uno stato addensato, il termine ε_v può essere assunto pari a zero e si ottiene $I_{rr} = I_r$.

E' possibile fare una stima di I_r con i valori seguenti:

TERRENO	I_r
Sabbia	75-150
Limo	50-75
Argilla	150-250

Il termine N_c della capacità portante viene calcolato:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (a)$$

Quando $\phi = 0$ (condizioni non drenate)

$$N_c = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

Metodo di Janbu

Janbu calcola N_q (con l'angolo ψ espresso in radianti) come segue:

$$N_q = \left(\tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi)$$

N_c si può ricavare dalla (a) quando $\phi > 0$.

Per $\phi = 0$ si usa $N_c = 5.74$

Formula di Hansen

La formula di Hansen vale per qualsiasi rapporto D/B , quindi sia per fondazioni superficiali che profonde, ma lo stesso autore introdusse dei coefficienti per meglio interpretare il comportamento reale della fondazione, senza di essi, infatti, si avrebbe un aumento troppo forte del carico limite con la profondità.

Per valori $L/D > 1$:

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

Nel caso $\phi = 0$

D/B	0	1	1.1	2	5	10	20	100
d'_c	0	0.40	0.33	0.44	0.55	0.59	0.61	0.62

Nei fattori seguenti le espressioni con apici (') valgono quando $\phi = 0$.

Fattore di forma:

$$s'_c = 0.2 \cdot \frac{D}{L}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{D}{L}$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \cdot \tan \phi$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \cdot \tan \phi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \cdot \frac{D}{L}$$

Fattore di profondità:

$$d'_c = 0.4 \cdot k$$

$$d_c = 1 + 0.4k$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi) \cdot k$$

$$d_\gamma = 1 \text{ perqualsiasik}$$

$$k = \tan^{-1} \frac{L}{D} \text{ se } \frac{L}{D} > 1$$

Resistenza del fusto

Il metodo utilizzato per il calcolo della capacità portante laterale è il metodo α , proposto da Tomlinson (1971); la resistenza laterale viene calcolata nel seguente modo:

$$Q_1 = (\alpha c + \sigma K \tan \delta) \cdot A_l \cdot f_w$$

A_l = superficie laterale del palo;

f_w = fattore di correzione legato alla tronco-conicità del palo, ossia la diminuzione percentuale del diametro del palo con

c = valore medio della coesione (o della resistenza a taglio in condizioni non drenate);

σ = pressione verticale efficace del terreno;

K = coefficiente di spinta orizzontale, dipendente dalla tecnologia di esecuzione del palo e dal precedente stato di addensamento, viene calcolato come segue:

Per pali infissi

$$K = 1 - \tan^2\phi$$

o, nel caso specifico, è possibile assegnare i seguenti valori proposti in tabella:

Palo	K	
	Terreno sciolto	Terreno denso
Acciaio	0.5	1
Calcestr. Pref.	1	2
Legno	1	3

Per pali trivellati

$$K = 1 - \text{sen}\phi$$

δ = attrito palo-terreno funzione della scabrezza della superficie del palo;

Per pali infissi

$$\delta = 3/4 \tan\phi$$

Per pali trivellati

$$\delta = \tan\phi$$

α = coefficiente d'adesione ricavato come di seguito riportato:

Pali trivellati:

Caquot – Kerisel
$$\alpha = \frac{100 + c^2}{100 + 7c^2}$$

Meyerhof – Murdock (1963)

$$\alpha = 1 - 0.1 \cdot c \quad \text{per } c < 5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.525 - 0.005 \cdot c \quad \text{per } c \geq 5 \text{ t/m}^2$$

Whitaker – Cooke (1966)

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c < 2.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.8 \quad \text{per } 2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.6 \quad \text{per } 5 \leq c \leq 7.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c > 7.5 \text{ t/m}^2$$

Woodward (1961)

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c < 4 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.6 \quad \text{per } 4 \leq c < 8 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.5 \quad \text{per } 8 \leq c < 12 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.4 \quad \text{per } 12 \leq c \leq 20 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.20 \quad \text{per } c > 20 \text{ t/m}^2$$

Pali infissi

Coefficiente α per palo infisso	
$2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$	$\alpha = 1.00$
$5 \leq c < 10$	$\alpha = 0.70$
$10 \leq c < 15$	$\alpha = 0.50$
$15 \leq c < 20$	$\alpha = 0.40$
$c \geq 20$	$\alpha = 0.30$

Attrito negativo

Quando un palo viene infisso o passa attraverso uno strato di materiale compressibile prima che si sia esaurito il processo di consolidazione, il terreno si muoverà rispetto al palo facendo insorgere sforzi attritivi tra palo e terreno che inducono al cosiddetto fenomeno dell'attrito negativo. L'effetto dell'attrito negativo è quello di aumentare il carico assiale sul palo, con conseguente aumento del cedimento, dovuto all'accorciamento elastico del palo stesso per effetto dell'aumento di carico. La forza che nasce per effetto dell'attrito negativo è stimata pari alla componente attritiva della resistenza laterale (vedi Resistenza del fusto) lungo la superficie laterale a contatto con lo strato in cui si genera tale fenomeno, ma di verso opposto all'attrito positivo. La risultante così determinata non viene detratta dal carico limite, ma da quello di esercizio.

Fattore di correzione in condizioni sismiche.

Criterio di Vesic

Secondo questo autore per tenere conto del fenomeno della dilatanza nel calcolo della capacità portante è sufficiente diminuire di 2° l'angolo d'attrito degli strati di fondazione. Il limite di questo suggerimento è nel fatto che non tiene conto dell'intensità della sollecitazione sismica (espressa attraverso il parametro dell'accelerazione sismica orizzontale massima). Questo criterio pare però trovare conferma nelle osservazioni fatte in occasione di diversi eventi sismici.

Criterio di Sano

L'autore propone di diminuire l'angolo d'attrito degli strati portanti di una quantità data dalla relazione:

$$D_p = \arctg\left(\frac{a_{max}}{\sqrt{2}}\right)$$

dove a_{max} è l'accelerazione sismica orizzontale massima.

Questo criterio, rispetto a quello di *Vesic*, ha il vantaggio di prendere in considerazione anche l'intensità della sollecitazione sismica. L'esperienza però dimostra che l'applicazione acritica di questa relazione può condurre a valori eccessivamente cautelativi di *Qlim*.

Le correzioni di *Sano* e di *Vesic* si applicano esclusivamente a terreni incoerenti ben addensati. È errato applicarle a terreni sciolti o mediamente addensati, dove le vibrazioni sismiche producono il fenomeno opposto a quello della dilatanza, con aumento del grado di addensamento e dell'angolo d'attrito.

Cedimenti metodo di Davis-Poulos

Il cedimento verticale è stato calcolato con il metodo di *Davis-Poulos*, secondo il quale il palo viene considerato rigido (indeformabile) immerso in un mezzo elastico, semispazio o strato di spessore finito.

Si ipotizza che l'interazione palo-terreno sia costante a tratti lungo n superfici cilindriche in cui viene suddivisa la superficie laterale del palo.

Il cedimento della generica superficie i per effetto del carico trasmesso dal palo al terreno lungo la superficie j -esima può essere espresso:

$$W_{i,j} = (\tau_j / E) \cdot B \cdot I_{i,j}$$

Avendo indicato con:

τ_j = Incremento di tensione relativo al punto medio della striscia

E = Modulo elastico del terreno

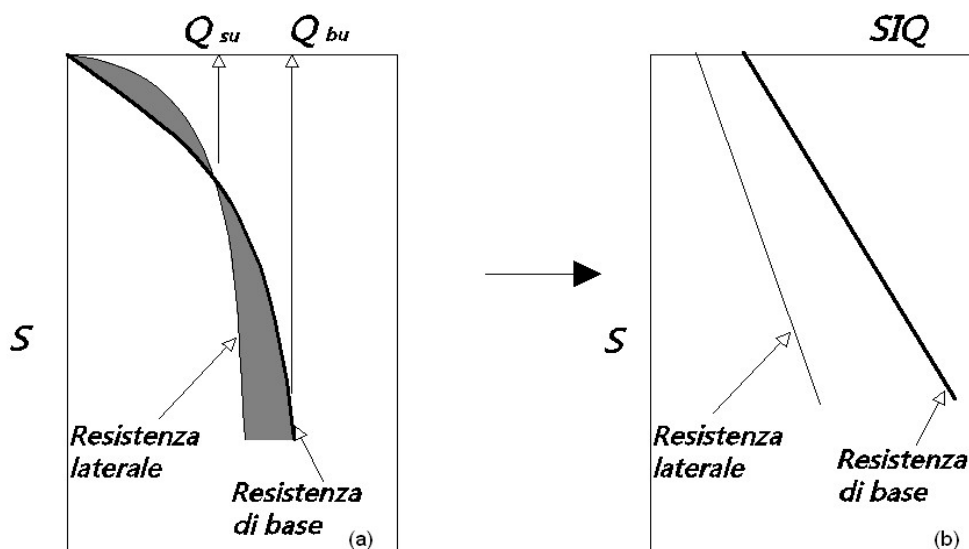
B = Diametro del palo

$I_{i,j}$ = Coefficiente di influenza

Il cedimento complessivo si ottiene sommando $W_{i,j}$ per tutte le j aree

Cedimento Metodo Iperbolico

Il metodo iperbolico modificato rappresenta uno sviluppo dello studio di Chin (1970,1972,1983) che consente di stimare il cedimento di pali singoli partendo dall'idea che il diagramma carico-cedimento, per il corpo di un palo e la sua base, abbia un andamento iperbolico. I valori del *carico ultimo laterale* (Q_{su}) e la *resistenza di base ultima* (Q_{bu}) rappresentano i termini asintotici della curva (figura a) (*Terzaghi, 1943*). Sotto queste ipotesi è possibile giungere ad una rappresentazione linearizzata del problema considerando la variazione della quantità S/Q rispetto allo spostamento S (figura b).



Grafici cedimento iperbolico (a) e linearizzato (b).

Grafici cedimento iperbolico (a) e linearizzato (b)

Lo studio di *Fleming* ha dimostrato che gli spostamenti totali stimati col metodo di *Chin* erano distorti dall'*accorciamento elastico* del corpo del palo e suggerì una tecnica semplificata per la quale la deformazione elastica del palo può essere determinata, con sufficiente accuratezza, sottraendo alla stima di *Chin* l'*accorciamento* del palo.

Considerando lo schema in figura l'*accorciamento elastico* del palo dipende dal carico applicato Q in rapporto all'*attrito laterale ultimo* Q_{su} . In particolare se $Q \leq Q_{su}$ la deformazione elastica del corpo del palo corrisponde alla somma dell'*accorciamento elastico* lungo la zona ad *attrito basso o nullo* e quello che si sviluppa lungo la parte *attiva* del fusto:

$$S_e = \frac{4Q(L_o + K_e L_a)}{\pi d_s^2 E_c}$$

Se, invece, si ha che $Q > Q_{su}$ bisogna considerare un ulteriore *accorciamento* legato alla parte attiva del palo che deve essere aggiunta alla deformazione elastica:

$$S_e = \frac{4}{\pi d_s^2 E_c} [Q(L_o + L_a) - L_a Q_{su} (1 - k_e)]$$

I parametri della formula sono:

- d_s : diametro testa del palo.
- E_c : modulo di elasticità del materiale del palo il cui valore può essere ricavato da una interpolazione lineare tra i valori di $E_c = 26 \cdot 10^6$ kN/m² per calcestruzzo con forza specifica di 20 N/mm² e il valore di $E_c = 40 \cdot 10^6$ kN/m² per calcestruzzo da 40 N/mm².
- L_o : lunghezza del palo ad *attrito basso o nullo*.
- L_a : lunghezza attiva del palo.
- k_e : rapporto della lunghezza equivalente del fusto del palo rispetto alla lunghezza attiva L_a . Si può considerare un valore di 0.5 quando si ha un *attrito* che si sviluppa uniformemente lungo L_a oppure quando il palo è inserito in sabbia o ghiaia. Per pali in argilla caratterizzati da uno sforzo che cresce in profondità si può usare un valore di 0.45.

Lo spostamento del *palo rigido* può essere calcolato sapendo che la somma dell'*attrito laterale* e della resistenza di base corrisponde al carico totale applicato alla testa del palo.

$$Q=Q_s+Q_b$$

Considerando il palo rigido lo spostamento totale in testa è uguale a quello che si ottiene lungo il fusto ed è uguale a quello misurato alla base del palo:

$$S_t=S_s=S_b$$

Dal grafico linearizzato si può vedere che lo spostamento lungo il fusto del palo può essere calcolato come:

$$S_s = \frac{M_s d_s Q_s}{Q_{su} - Q_s}$$

In cui

- M_s : fattore adimensionale di flessibilità terreno/fusto.
- d_s : diametro testa.
- Q_s : attrito.
- Q_{su} : attrito ultimo determinato col metodo statico (condizione drenata)

L'equazione dello spostamento alla base del palo ricavata da Fleming è:

$$S_b = \frac{0.6 Q_{bu} Q_b}{d_b E_b (Q_{bu} - Q_b)}$$

dove

- d_b : diametro della base del palo.
- Q_b : resistenza alla base.
- Q_{bu} : resistenza ultima alla base
- E_b : modulo di taglio corrispondente a $Q_{bu}/4$

Infine, ponendo la condizione di uguaglianza $S_s=S_b$ e considerando il carico totale applicato Q si ottiene lo spostamento totale di un palo rigido considerando solo i valori positivi della relazione:

$$S_t = \frac{-g \pm \sqrt{g^2 - 4fh}}{2f}$$

In cui le variabili sono così definite:

- $f = \eta(Q - \alpha) - \beta$
- $g = Q(\delta + \lambda\eta) - \alpha\delta - \beta\lambda$
- $h = \lambda\delta Q$
- $\alpha = Q_{su}$
- $\beta = d_b E_b Q_{bu}$
- $\lambda = M_s d_s$
- $\delta = 0.6 Q_{bu}$

$$\bullet \eta = d_b E_b$$

Lo spostamento complessivo del palo comprende la componente di spostamento rigido e quella di accorciamento elastico.

Il modulo elastico del terreno E_b al di sotto della base del palo è legato alle caratteristiche del terreno ed è fortemente influenzato dalla tecnica di costruzione del palo. Fleming sostiene che è consigliabile che questo parametro di progetto sia determinato da un insieme accurato di prove in cui i pali sono caricati fino al punto in cui viene mobilitata una sostanziale quota della resistenza di punta. In mancanza di questi dati si può scegliere, cautelativamente, il valore di E_b da range di valori relativi al tipo di terreno e alla tecnica di costruzione del palo.

CARICO LIMITE ORIZZONTALE

Il carico limite orizzontale è stato calcolato secondo la teoria sviluppata da Broms il quale assume che il comportamento dell'interfaccia palo-terreno sia di tipo rigido perfettamente plastico, e cioè che la resistenza del terreno si mobilita interamente per un qualsiasi valore non nullo dello spostamento a rimanga costante al crescere dello spostamento stesso.

Si assume che il comportamento flessionale del palo sia di tipo rigido-perfettamente plastico, vale a dire che le rotazioni elastiche del palo sono trascurabili finché il momento flettente non raggiunge il valore M_y di plasticizzazione.

Per i terreni coesivi Broms propone di adottare una reazione del terreno costante con la profondità pari a:

$$p = 9 \cdot c_u \cdot B$$

con reazione nulla fino alla profondità di 1.5 d; avendo indicato con:

c_u = Coesione non drenata,

B = Diametro del palo

p = Reazione del terreno per unità di lunghezza del palo.

Per i terreni incoerenti si assume che la resistenza vari linearmente con la profondità secondo la legge:

$$p = 3K_p \gamma z \cdot B$$

avendo indicato con:

p = Reazione del terreno per unità di lunghezza del palo;

K_p = Coefficiente di spinta passiva;

γ = Peso unità di volume del terreno;

z = Profondità;

B = Diametro del palo.

Palo in condizioni d'esercizio

Analisi del palo in condizioni di esercizio: **Metodo degli elementi finiti.**

Il metodo degli elementi finiti modella il palo di fondazione, sottoposto a carichi trasversali, in modo realistico in quanto fa uso sia degli spostamenti che delle rotazioni ai nodi per definire la linea elastica del palo, pertanto rappresenta il metodo più razionale ed efficace attualmente disponibile per analizzare questo tipo di strutture.

Di seguito si richiamano i fondamenti teorici del metodo indicando con \mathbf{P} la matrice delle forze nodali esterne, con \mathbf{F} quella delle forze interne e con \mathbf{A} la matrice dei coefficienti di influenza che, per l'equilibrio tra forze esterne ed interne, lega le prime due secondo la ben nota forma:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{F}$$

Gli spostamenti interni \mathbf{e} (traslazioni e rotazioni) dell'elemento nel generico nodo sono legati agli spostamenti esterni \mathbf{X} (traslazioni e rotazioni) applicati ai nodi, dalla seguente relazione:

$$\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{X}$$

dove la matrice \mathbf{B} è dimostrato essere la trasposta della matrice \mathbf{A} .

D'altra parte, le forze interne \mathbf{F} sono legate agli spostamenti interni \mathbf{e} dalla seguente espressione:

$$\mathbf{F} = \mathbf{S}\mathbf{e}$$

Applicando le consuete sostituzioni, si ottiene:

$$\mathbf{F} = \mathbf{SA}^T \mathbf{X}$$

e quindi

$$\mathbf{P} = \mathbf{AF} = \mathbf{A SA}^T \mathbf{X}$$

Pertanto, calcolando l'inversa della matrice $\mathbf{A SA}^T$ si ricava l'espressione degli spostamenti esterni \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A SA}^T)^{-1} \mathbf{P}$$

Noti, quindi, gli spostamenti \mathbf{X} è possibile ricavare le forze interne \mathbf{F} necessarie per il progetto della struttura.

La matrice $\mathbf{A SA}^T$ è nota come matrice di rigidità globale in quanto caratterizza il legame tra spostamenti e forze esterni nodali.

Il metodo ad elementi finiti ha, tra l'altro, il vantaggio di consentire di mettere in conto, come condizioni al contorno, rotazioni e spostamenti noti.

Le reazioni nodali delle molle che schematizzano il terreno vengono considerate come forze globali legate al modulo di reazione e all'area d'influenza del nodo. Nella soluzione ad elementi finiti per pali soggetti a carichi trasversali, il modulo di reazione viene considerato nella forma:

$$k_s = A_s + B_s Z^n$$

o, non volendo far crescere illimitatamente il k_s con la profondità, nella forma:

$$k_s = A_s + B_s \tan^{-1}(Z/B)$$

nella quale Z è la profondità e B è il diametro del palo.

I valori di A_s e $B_s Z^n$ sono ottenuti dall'espressione della capacità portante (Bowles) con fattori correttivi s_i , d_i , e i_i pari a 1:

$$k_s = q_{ult}/\Delta H = C(cN_c + 0.5\gamma B N_\gamma)$$

$$B_s Z^n = C(\gamma N_q Z^1)$$

Dove $C = 40$ è ottenuto in corrispondenza di un cedimento massimo di 25 mm.

Momenti cinematici

In presenza dell'azione sismica la risposta del palo è il risultato di una complessa interazione terreno-palo, resa di difficile interpretazione a causa dei fenomeni di non linearità nel terreno e degli effetti cinematici associati al moto del terreno.

Generalmente, alle sollecitazioni trasmesse dalla sovrastuttura si aggiungono, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, quelle derivanti dall'interazione cinematica che produce nei pali sollecitazioni aggiuntive dipendenti principalmente dalla rigidità relativa palo-terreno.

Dalla letteratura esistente in merito a questo tipo di studi, emerge che nel caso di palo immerso in terreni stratificati, la sollecitazione flettente subisce un pronunciato incremento in prossimità dell'interfaccia fra strati di differente rigidità e tale incremento è tanto maggiore quanto più elevato è il contrasto di rigidità. In alcuni casi il valore del momento prodotto da questo effetto potrebbe superare quello che insorge nei pali in testa in presenza di incastro.

Da un'analisi di numerosi risultati, *Nikolaou et al. 2001*, ha proposto una relazione che consente di calcolare, in maniera approssimata, il momento flettente massimo in corrispondenza dell'interfaccia tra due strati di differente rigidità, in condizioni di moto stazionario con frequenza prossima alla frequenza fondamentale del deposito in cui è immerso il palo:

$$M = 0.042 \cdot \tau_c \cdot d^3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.30} \cdot \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{V_{s2}}{V_1}\right)^{0.50}$$

in cui $\tau_c = a_{\max} \rho_1 H_1$; a_{\max} accelerazione sismica, ρ_1 densità del terreno, H_1 spessore dello strato, V_{s1} e V_{s2} , rispettivamente, la velocità delle onde di taglio nei due strati; E_1 è modulo di rigidezza dello strato superiore di terreno, E_p modulo di elasticità del palo, d diametro del palo, L lunghezza del palo.

Dati generali...

Diametro punta	1,00 m
Lunghezza	15,00 m
Tipo	Trivellato
Portanza di punta calcolata con:	Terzaghi
Calcestruzzo tipo	1
Acciaio tipo	1

SISMA

Accelerazione sismica	0,072
Coefficiente di intensità sismico [Kh]	0,0129
Coefficiente di intensità sismico [Kv]	0,0065

Coefficienti sismici [N.T.C.]**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50,0 [anni]
Vita di riferimento:	50,0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T1

S.L.	TR Tempo ritorno	ag	F0	TC*
Stato limite	[anni]	[m/s ²]	[-]	[sec]
S.L.O. - S.LE	30,0	0,441	2,468	0,286
S.L.D. - SLE	50,0	0,569	2,572	0,309
S.L.V. - SLO	475,0	1,716	2,502	0,415
S.L.C. - SLO	975,0	2,373	2,456	0,425

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Opere di sostegno

S.L.	amax	beta	kh	kv
Stato limite	[m/s ²]	[-]	[-]	[sec]
S.L.O.	0,5292	1,0	0,054	0,027
S.L.D.	0,6828	0,47	0,0327	0,0164
S.L.V.	2,0592	0,38	0,0798	0,0399
S.L.C.	2,7581	1,0	0,2813	0,1406

Archivio materiali**Conglomerati**

Nr.	Classe Calcestruzzo	fck,cubi [Kg/cm ²]	Ec [Kg/cm ²]	fck [Kg/cm ²]	fcd [Kg/cm ²]	fctd [Kg/cm ²]	fctm [Kg/cm ²]

1	C20/25	250	299600	200	113,3	10,1	22,1
2	C25/30	300	314750	250	141,6	11,4	25,6
3	C28/35	350	323080	280	158,6	12,6	27,6
4	C40/50	500	352200	400	226,6	16,3	35

Acciai:

Nr.	Classe Acciaio	Es [Kg/cm2]	fyk [Kg/cm2]	fyd [Kg/cm2]	ftk [Kg/cm2]	ftd [Kg/cm2]	ep_tk	epd_ult	$\beta_1 * \beta_2$ in.	$\beta_1 * \beta_2$ fin.
1	B450C	2000000	4500	3913	4500	3913	.075	.0675	1	0,5
2	B450C*	2000000	4500	3913	5400	4500	.075	.0675	1	0,5
3	B450C**	2000000	4500	3913	4582	3985	.012	.01	1	0,5
4	S235H	2141370	2447,28	2128,11	3670,92	2128,11	0,012	0,01	1	0,5
5	S275H	2141370	2855,16	2482,97	4384,71	2482,97	0,012	0,01	1	0,5
6	S355H	2141370	3670,92	3191,66	5200,47	3670,92	0,012	0,01	1	0,5

Stratigrafia

Nr.: Numero dello strato. Hs: Spessore dello strato. Fi: Angolo di attrito. c: Coesione Alfa: Coefficiente adesione attrito laterale. Vs: Velocità onde di taglio.

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

Carico limite

Stratigrafia	Nq	Nc	Fi/C strato punta Palo (°)/[kg/cm ²]	Peso palo [kg]	Carico limite punta [kg]	Carico limite laterale [kg]	Carico limite [kg]	Attrito negativo [kg]	Carico limite orizzontale [kg]
A1+M1+R3	27,16	38,78	34/0,00	19634,95	0,00	92708,34	73073,39	--	--

RESISTENZA DI PROGETTO CARICHI ASSIALI

Resistenza caratteristica carichi assiali. Nome combinazione:

Numero verticali di indagine	1
Fattore correlazione verticale indagate media (xi3)	1,00
Fattore correlazione verticale indagate minima (xi4)	1,00

	Rc, Min [kg]	Rc, Media [kg]	Rc, Max [kg]
Base	--	--	--

Laterale	92708,34	92708,34	92708,34
Totale	73073,39	73073,39	73073,39

Coefficiente parziale resistenza caratteristica	R3
Laterale	2,50
Resistenza di progetto laterale	37083,34 kg
Resistenza di progetto	17448,38 kg

Cedimento (Poulos e Davis 1968)

Carico applicato	100,00 kg
Coefficiente influenza	0,15
Cedimento	0,00 cm

Modello ad elementi finiti

Max spostamento lineare del terreno	0,013 cm
Tipo analisi	Lineare
Massimo numero di iterazioni	1,00
Fattore di riduzione molla fondo scavo	1,00
Numero di elementi	9,00
Nodo sulla superficie del terreno [$< n^{\circ}$ nodi]	1,00
Modulo di reazione Ks	Bowles

ANALISI AD ELEMENTI FINITI [Stratigrafia di riferimento...1]

El. No	Lunghezza [m]	Ks [kg/cm ³]	Sforzo normale [kg]	Momento [kgm]	Taglio [kg]	Reazione terreno [kg]	Rotazione (°)	Spostamento [m]	Pressione terreno [kg/cm ²]
1	1,67	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,67	0,087	3272,49	0	0	0	0	0	0
3	1,67	11,566	6544,98	0	0	0	0	0	0
4	1,67	11,566	9817,48	0	0	0	0	0	0
5	1,67	11,566	13089,97	0	0	0	0	0	0
6	1,67	11,566	16362,46	0	0	0	0	0	0
7	1,67	11,566	19634,95	0	0	0	0	0	0
8	1,67	11,566	22907,45	0	0	0	0	0	0
9	1,67	11,566	26179,94	0	0	0	0	0	0
10		11,566	29452,43	0	0	0	0	0	0

ARMATURE

Nodo	Z [m]	Nd [kg]	Md [kgm]	Td [kg]	Nr. Barre Diametro	Nu [kg]	Mu [kgm]	Cond. Verifica Flessione	Ver. Presso-Flessione	Def. Max Cls	Def. Max Fe	Asse Neutro [cm]	Passo Staffe [cm]	Res. Taglio [kg]	Sicurezza taglio	Cond. Verifica Taglio
1	0	--	--	--	12Ø16	-0,55	28648,91	2864,89	Verificata	5,79E-04	-1,96E-03	27,16	--	--	--	Verificata
2	1,67	3272,49	--	--	12Ø16	3272,50	29770,87	2977,09	Verificata	6,02E-04	-1,96E-03	26,47	--	--	--	Verificata
3	3,33	6544,98	--	--	12Ø16	6544,62	30883,53	3088,35	Verificata	6,24E-04	-1,96E-03	25,80	--	--	--	Verificata
4	5	9817,48	--	--	12Ø16	9816,79	31986,31	3198,63	Verificata	6,46E-04	-1,96E-03	25,17	--	--	--	Verificata
5	6,67	13089,97	--	--	12Ø16	13090,52	33080,22	3308,02	Verificata	6,68E-04	-1,96E-03	24,55	--	--	--	Verificata
6	8,33	16362,46	--	--	12Ø16	16362,46	34164,72	3416,47	Verificata	6,89E-04	-1,96E-03	23,96	--	--	--	Verificata
7	10	19634,95	--	--	12Ø16	19634,10	35240,39	3524,04	Verificata	7,10E-04	-1,96E-03	23,38	--	--	--	Verificata
8	11,67	22907,45	--	--	12Ø16	22907,45	36307,45	3630,45	Verificata	7,30E-04	-	22,83	--	--	--	Verificata

		,45			6	,31	,91	79	cata	-04	1,96E-03					cata
9	13,33	26179,94	--	--	12016	26179,39	37366,50	3736,65	Verificata	7,50E-04	-1,96E-03	22,29	--		--	Verificata
10	15	29452,43	--	--	12016	29451,47	38416,62	3841,66	Verificata	7,70E-04	-1,96E-03	21,77	--		--	Verificata