OTTOBRE 2021

## TS ENERGY 3 S.r.L.

**IMPIANTO INTEGRATO AGRIVOLTAICO**
**COLLEGATO ALLA RTN**
**POTENZA NOMINALE 20 MW**

**COMUNE DI SAN SEVERO (FG)**

Nantong

# PROGETTO DEFINITIVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO

## Relazione Geotecnica

**Progettista**
Ing. Laura Maria Conti n. ordine Ing. Pavia 1726

**Codice elaborato**
*2748_4499_SSCAP_PD_R04_Rev0_Relazione-Geotecnica*

## Memorandum delle revisioni

| Cod. Documento | Data | Tipo revisione | Redatto | Verificato | Approvato |
|---|---|---|---|---|---|
| 2748_4499_SSCAP_PD_R04_Rev0_Relazione-Geotecnica | 10/2021 | Prima emissione | MP | CP | L. Conti |

## Gruppo di lavoro

| Nome e cognome | Ruolo nel gruppo di lavoro | N° ordine |
|---|---|---|
| Laura Maria Conti | Direzione Tecnica | Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia al n. 1726 |
| Corrado Pluchino | Project Manager | Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano n. A27174 |
| Riccardo Festante | Progettazione Elettrica, Rumore e Comunicazioni | Tecnico competente in acustica ambientale n. 71 |
| Daniele Crespi | Coordinamento SIA | |
| Francesca Jasparro | Esperto Ambientale | |
| Elena Comi | Esperto Ambientale | Ordine Nazionale dei Biologi n. 60746 |
| Marco Corrù | Architetto | |
| Lia Buvoli | Biologa | |
| Massimo Busnelli | Geologo | |
| Mauro Aires | Ingegnere strutturista | Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9583J |
| Sergio Alifano | Architetto | |
| Andrea Fronteddu | Ingegnere Elettrico | Ordine degli Ingegneri di Cagliari n. 8788 |
| Matteo Lana | Ingegnere Ambientale | |
| Vincenzo Gionti | Ingegnere Ambientale | |

| | | |
|---|---|---|
| Lorenzo Griso | Geologo | |
| Nazzario d'Errico | Agronomo | Ordine professionale Degli Agronomi di Foggia n. 382 |
| Marianna Denora | Studio Previsionale Impatto Acustico | Ordine degli Architetti della Provincia di Bari, Sez. A n. 2521 |
| Giovanni Cis | Progetto di Connessione | Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano n. 28287 |
| Antonio Acito | Rilievo Topografico | |
| Antonio Bruscella | Archeologo | Elenco dei professionisti abilitati alla redazione del documento di valutazione archeologica n. 4124 |
| Michele Pecorelli (Studio Geodue) | Geologo – Indagini Geotecniche Geodue | Ordine dei Geologi della Regione Puglia n. 327 |

INDICE

1. PREMESSA ..... 5
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE ..... 6
2. LINEAMENTI GEOLOGICI E MORFOLOGICI GENERALI ..... 7
2.1 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO ..... 7
3. PIANIFICAZIONE ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE ..... 9
3.1 METODOLOGIE DI INDAGINE ADOTTATE ..... 9
3.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI: ATTIVITÀ DI CAMPO ..... 11
3.3 RISULTATI INDAGINE GEOSISMICA ..... 12
3.3.1 Elaborazione dell'indagine sismica di tipo MASW ..... 12
3.3.2 Elaborazione dell'indagine sismica a rifrazione ..... 13
4. INDAGINE GEOMECCANICA ..... 14
4.1 POZZETTI GEOGNOSTICI ..... 14
4.2 PROSPEZIONE A CAROTAGGIO CONTINUO ..... 14
5. INDAGINE PENETROMETRICA ..... 15
6. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA ..... 17
6.1 INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ LITOTECNICHE ..... 17
7. VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA (D.M. 17.01.2018 N.T.C.) ..... 20
8. SINTESI CONCLUSIVA ..... 25

ALLEGATI

I. UBICAZIONI INDAGINI CAMPO FOTOVOLTAICO
II. UBICAZIONI INDAGINI STAZIONE DI ELEVAZIONE MT/AT
III. INDAGINE SIMISCA MASW
IV. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE
V. INDAGINE PENETROMETICA

# 1. PREMESSA

Il presente studio descrive le caratteristiche geotecniche delle litologie affioranti nell'area interessata progetto per la realizzazione di un impianto solare fotovoltaico per la produzione di energia da fonte solare – di potenza stimata di 20 MW – della relativa linea di connessione alla cabina di consegna, a circa 7 km a Sud rispetto al centro abitato di San Severo, all'interno di un'area in disponibilità della società TE GREEN DEV 3 S.r.l.

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 indicazione dell'ambiente geologico, geomorfologico, idrogeologico e strutturale generale [pericolosità geologica del territorio]
- Rilevamento geologico di dettaglio, di un'area sufficientemente ampia, entro la quale ricade l'intervento in oggetto, atto alla definizione geologica, geomorfologica, idrogeologica, con particolare riferimento alla caratterizzazione della natura e del tipo di strutture sedimentarie dei corpi geologici presenti [controllo litologico di dettaglio]
- Indagini geognostiche eseguite 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.

Durante la prima fase è stato effettuato una ricerca bibliografica, un esame fotointerpretativo e un successivo rilievo di superficie per la verifica dello stato dei luoghi e la corretta pianificazione delle indagini geognostiche.

Da qui è stata pianificata una campagna di indagini geofisiche che ha previsto l'esecuzione di prospezioni come di seguito elencate.

- n. 1 prospezione sismica superficiale con tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves);
- n. 1 prospezione sismica a rifrazione.
- n. 3 pozzetti geognostici.
- n. 3 prove penetrometriche dinamiche eseguite con penetrometro PENNI 30 della COMPAC di Fermignano (PU).

Infine, il quadro conoscitivo è stato completato correlando le indagini eseguite in situ con il risultato di una campagna di indagini pregresse eseguite dallo scrivente in ambito adiacente dove era stato realizzato un sondaggio meccanico a carotaggio continuo spinto sino alla profondità di 20 metri dal piano di campagna.

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.

## 1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il progetto in esame è ubicato nel territorio comunale di San Severo a circa 7 km in direzione Sud. L'area si trova all'interno di un quadrilatero individuato dalla Strada Statale 90 delle Puglie e le strade provinciali SP 115 e SP 116.

Figura 1 – Inquadramento territoriale su ortofoto – da Google earth.

Nella cartografia I.G.M. a scala 1:50000 l'area è compresa nel quadrante 396 (San Severo); nella cartografia in scala 1:25000 l'intervento interessa la Tavoletta 163 I NE (Masseria Farfalla); infine, nella sezione in scala 1:5000, l'intervento si colloca nelle sezioni 396132 e 408011 (linea di connessione e stazione di consegna).

# 2. LINEAMENTI GEOLOGICI E MORFOLOGICI GENERALI

## 2.1 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO

Il territorio del Comune di San Severo si sviluppa lungo l'asse principale del Tavoliere delle Puglie a circa 30 Km dal litorale adriatico e comprende, a Nord, parte della media valle del Torrente Salsola e a Sud la parte media del Torrente Vulgano, i cui terreni, sia sotto il punto di vista geologico che morfologico, costituiscono una unità omogenea.

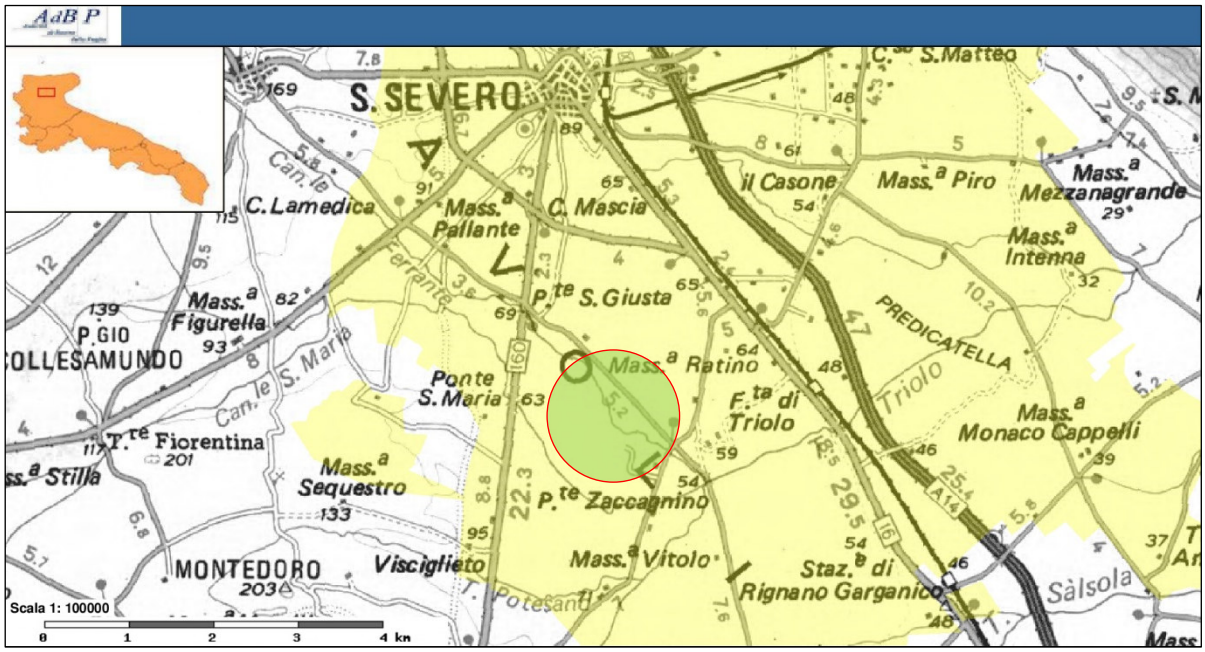



Figura 2 – Inquadramento territoriale

La morfologia del territorio comunale è tipica della Pianura di Capitanata, ad assetto sub-orizzontale, che è l'espressione attuale dello smantellamento delle falde tettoniche dell'Appennino Dauno e della sedimentazione nell'Avanfossa Bradanica avvenuta dapprima in ambiente marino (quindi con grandi continuazioni orizzontali dei terreni) poi in condizioni d'emersione totale con la deposizione di terreni a continuità orizzontale locale.

La totalità del territorio comunale presenta pendenze molto basse (<3%), con quote che scendono da poco più di 85 metri s.l.m. nel centro abitato a circa 60 nell'area del campo agrivoltaico. Qui i terreni sono generalmente riferibili alle piane alluvionali generate dai corsi d'acqua che lo attraversano. Nello specifico, il sito di intervento è parte integrante della piana del Torrente Ferrante, un sub-affluente ddi sinistra del Torrente Candelaro che, unitamente al Sanale Santa Maria e al Torrente Triolo hanno generato l'estesa pianura in cui si inserisce l'area progettuale. Qui le pendenze sono piuttosto contenute, mediamente < 1°, solo localmente possono raggiungere punte di 2÷3°.

Nella figura 3 che rappresenta il foglio 396 della Carta Geologica d'Italia, si evidenzia una potente successione terrigena di avanfossa, sormontata tettonicamente da lembi dell'Unità tettonica della Daunia. Questi ultimi sono a loro volta coperti da una successione terrigena di avanfossa di età più recente (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore), che viene comunemente indicata come ciclo della Fossa Bradanica.

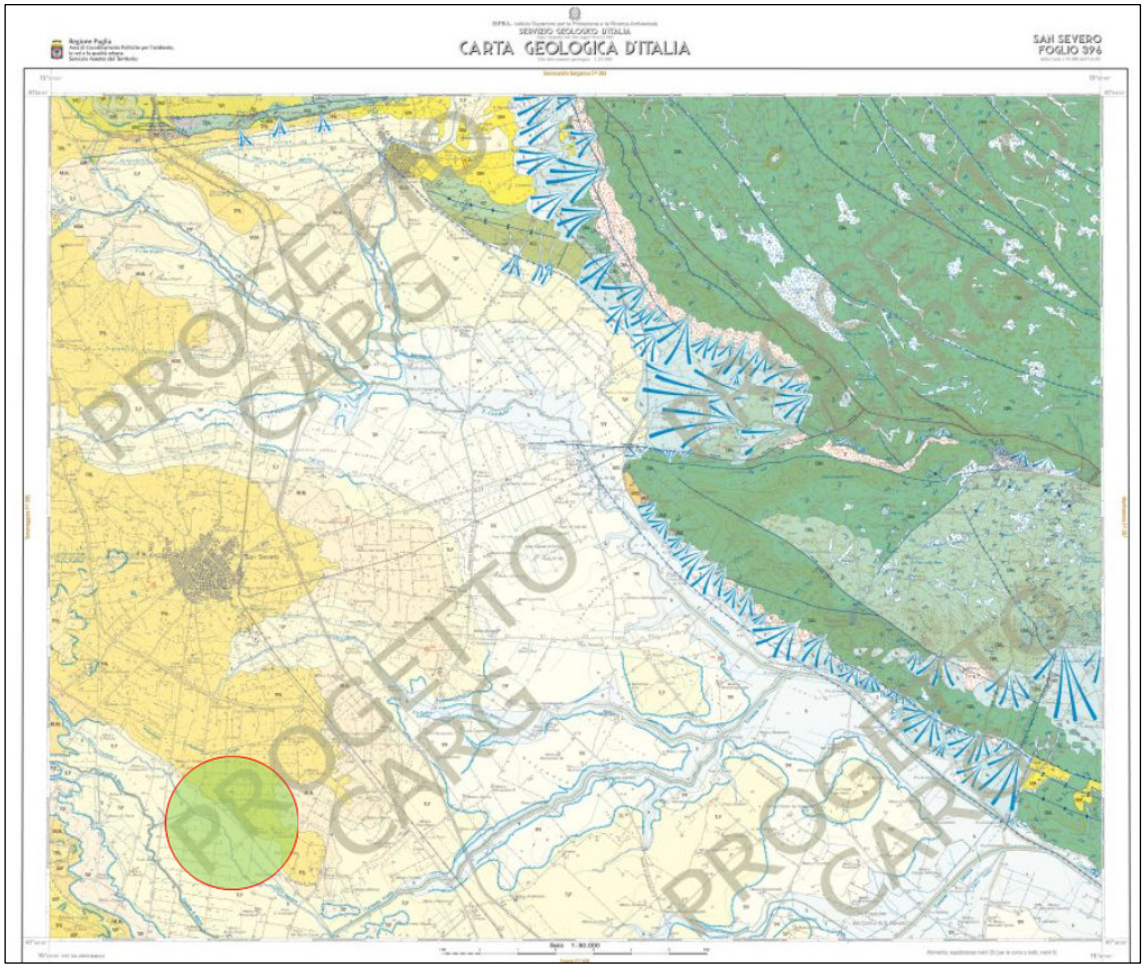



Figura 3 – Carta Geologica d'Italia - Foglio 396 San Severo.

Nello specifico si rilevano un'unica formazione ascrivibile all'Unità Quaternarie del Tavoliere di Puglia, riferibili al Pleistocene medio-superiore-Olocene.

- Unità Quaternarie del Tavoliere di Puglia
  - Supersintema del Tavoliere di Puglia (TP)
    - TLP – Sintema di Motta del Lupo

1. TLP – Sintema di Motta del Lupo – Pleistocene superiore.

   Alternanze di silt brunastri e argille verdastre. E' costituito dal basso verso l'alto da: -argille e silt di colore verdastro a laminazione piano-parallela (8 m); -argille brune e verdi con rare lamine siltose (circa 22 m di spessore). E' interpretabile come un deposito di piana alluvionale. Lo spessore varia da pochi metri a massimo 30 m.

# 3. PIANIFICAZIONE ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

L'area è stata già investigata a più riprese, in relazione a diversi interventi eseguiti nell'intero comprensorio, con la realizzazione indagini geomeccaniche a carotaggio continuo e indagini geofisiche.

In questa fase di studi è stata eseguita una prima ricognizione cartografica e aerofotogrammetrica a cui ha fatto seguito una indagine di superficie che è stata integrata con i risultati di indagini geofisiche che comprendono indagini sismiche a rifrazione e con tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves); il quadro conoscitivo è stato, infine, completato con l'esecuzione di n. 3 prove penetrometriche dinamiche necessarie a determinare la resistenza del suolo nei primi metri (max 10 metri) della successione stratigrafica e con l'0esame della stratigrafia ottenuta da un sondaggio meccanico a carotaggio continuo eseguito nelle immediate vicinanze del sito in esame.

Da qui si è risaliti alla determinazione dei parametri sismo-elastici e geomeccanici del terreno indagato.

## 3.1 METODOLOGIE DI INDAGINE ADOTTATE

La prospezione MASW è stata eseguita in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni del D. M. 17 gennaio 2018. Queste, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio ($V_S$).

Inoltre, con l'indagine sismica a rifrazione è stato possibile determinare le caratteristiche dinamiche del sottosuolo nelle prime decine di metri con l'individuazione delle principali unità geofisiche e delle relative proprietà meccaniche elastiche, quali velocità delle onde longitudinali P (Vp), velocità delle onde trasversali S (Vs) ed i relativi parametri elastici (E, G, K e $\nu$)[1].

L'ubicazione degli stendimenti sismici è stata accuratamente valutato in campagna, per fornire indicazioni utili sulle successioni litostratigrafiche e ricoprire l'intera area interessata dal Parco Fotovoltaico. Di seguito metodologia d'indagine geofisica, di cui vengono evidenziati brevemente i fondamenti teorici.

### Prospezione sismica di tipo MASW

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{hi}{Vi}}$$

Dove

$h_i$ = spessore dello strato $i_{esimo}$;

$V_{si}$ = 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 Vs non inferiore a 800 m/sec[2].

[1] Allegato IV

[2] *Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della 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 $V_{S30}$, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Questo parametro può essere determinato attraverso indagini indirette ed in particolar modo tramite l'analisi delle onde di Rayleigh, ossia onde di superficie generate dall'interazione tra onde di pressione (P) e le onde di taglio verticali (Sv) ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo.

In presenza di un semispazio non omogeneo la velocità dipende dalla frequenza, che provoca dispersione dell'energia trasportata dalle onde stesse, vale a dire che la deformazione del treno di onde nel sottosuolo è dovuta ad una variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza; per le onde di Rayleigh questa deformazione non si manifesta all'interno di un semispazio omogeneo e isotropo ma solo quando questi presenta delle discontinuità come può essere una stratificazione.

Nelle nuove metodologie d'indagine sismica del sottosuolo si valutano le onde di superficie in quanto la percentuale di energia convertita è di gran lunga superiore rispetto alle onde P ed S; inoltre l'ampiezza di queste onde dipende da $\sqrt{r}$ anziché da r (distanza dalla sorgente in superficie) come per le onde di volume.

La propagazione delle onde di Rayleigh, sebbene influenzata dalla $V_p$ e dalla densità, è funzione anzitutto della $V_s$, che rappresenta un parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito.

L'analisi delle onde S, operata con tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del sismogramma, che, a seguito di una trasformata di Fourier, restituisce lo spettro del segnale. In questo dominio è possibile separare il segnale relativo alle onde S da altri tipi di segnale, come onde P, propagazione in aria ecc.

Osservando lo spettro di frequenza è possibile evidenziare che l'onda S si propaga a velocità variabile a seconda della sua frequenza, come risultato del fenomeno della dispersione.

La metodologia MASW risulta particolarmente indicata in ambienti con spaziature limitate e, a differenza della sismica a rifrazione, consente di individuare la presenza di inversioni di velocità con la profondità, associabili alla presenza di strati "lenti" al di sotto del bedrock. Tuttavia, un limite di questa metodologia è che esso risente particolarmente del principio di indeterminazione e, fornendo un modello mono-dimensionale del sottosuolo, rende necessaria l'applicazione di altre metodologie d'indagine per fornire un modello geofisico-geologico più attendibile.

### Prospezione sismica a rifrazione

La prospezione sismica a rifrazione prende in considerazione i tempi di propagazione delle onde elastiche che, generate al suolo, si diffondono nel semispazio riflettendosi e rifrangendosi su eventuali superfici di discontinuità presenti.

Quando un'onda sismica incontra una superficie di separazione tra due mezzi con caratteristiche elastiche differenti, una parte dell'energia dell'onda si riflette nello stesso mezzo in cui si propaga l'onda incidente, e una parte si rifrange nel mezzo sottostante.

Le relazioni matematiche dei principi fisici della riflessione e rifrazione sono regolate dalle note leggi di Snell. La condizione necessaria per la riflessione e la rifrazione di un'onda sismica è la variazione del parametro impedenza sismica fra i 2 mezzi separati dalla superficie di discontinuità. L'impedenza sismica si determina attraverso il prodotto tra la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo e la densità del materiale attraversato.

Ogni litotipo è caratterizzato dalla capacità di lasciarsi attraversare dalle onde elastiche con determinata velocità, questa è definita sperimentalmente attraverso prove di laboratorio o in situ. La

velocità di propagazione delle onde sismiche nelle rocce dipende essenzialmente dai parametri elastici che sono influenzati, a loro volta, da numerosi fattori quali, ad esempio, la densità, la porosità, la tessitura, il grado di alterazione e/o di fratturazione, la composizione mineralogica, il contenuto di fluidi, la pressione ed altro.

Questi parametri rendono piuttosto ampio il campo di variabilità della velocità per uno stesso litotipo. Per questo motivo, non sempre un orizzonte individuato con metodologie sismiche coincide con un orizzonte litologico.

Un impulso generato da una sorgente sismica in superficie genera un treno d'onde sismiche di varia natura; in fase di acquisizione e di elaborazione è possibile analizzare onde sismiche di volume o di superficie, a seconda delle modalità con cui esse si propagano nel sottosuolo.

In funzione del tipo di analisi delle onde sismiche investigate, è possibile distinguere fra la metodologia d'indagine sismica a rifrazione (analisi di onde di volume) e di tipo MASW (analisi di onde di superficie).

Disponendo un certo numero di sensori (geofoni) sul terreno lungo uno stendimento sismico e osservando il tempo di percorrenza delle onde per giungere ai sensori, è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde sismiche che attraversano i vari strati nel sottosuolo, consentendo una ricostruzione attendibile delle sue caratteristiche elastico-dinamiche.

Al fine di una corretta interpretazione dei risultati dell'indagine sismica è importante sottolineare che:

a) i sismostrati non sono necessariamente associabili a litotipi ben definiti, ma sono rappresentativi di livelli con simili caratteristiche elastiche, in cui le onde sismiche si propagano con la stessa velocità;
b) la risoluzione del metodo è funzione della profondità di indagine e la risoluzione diminuisce con la profondità: considerato uno strato di spessore h ubicato a profondità z dal piano campagna, in generale non è possibile individuare sismostrati in cui h < 0,25 * z;
c) nelle indagini superficiali, le onde di taglio (onde S), meno veloci, arrivano in un tempo successivo, per cui il segnale registrato sarà la risultante delle onde S con le onde P; quindi la lettura dei tempi di arrivo delle onde S può risultare meno precisa della lettura dei tempi di arrivo delle onde P;
d) le velocità delle onde p, misurate in terreni saturi o molto umidi dipende, talora in maniera decisiva, dalle vibrazioni trasmesse dall'acqua interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda, le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidezza del terreno sono quelle di taglio.

## 3.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI: ATTIVITÀ DI CAMPO

Indagine sismica di tipo MASW

Le prospezioni geofisiche sono state eseguite con strumentazione *Combinata PASI mod. 16SG24 (sismica 24 canali + tomografia elettrica 32 elettrodi).*

La tecnica MASW prevede l'utilizzo di una sorgente attiva per l'energizzazione (massa battente di peso pari a 8 Kg) e la registrazione simultanea di 12 o più canali, utilizzando geofoni a bassa frequenza. L'esigenza di analizzare con elevato dettaglio basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz e corrispondenti a maggiori profondità d'investigazione) richiede la necessità di utilizzare geofoni ad asse verticale con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz.

Per il profilo MASW eseguito è stata adottata la seguente configurazione:

- lunghezza stendimento = 16,50 m;
- numero geofoni = 12;

- Spaziatura = 1,50 m;
- offset di scoppio = 3,00 metri;
- durata dell'acquisizione = 1 secondo;
- tempo di campionamento = 1 millisecondo.

Per energizzare il terreno è stata usata una sorgente impulsiva del tipo "mazza battente" del peso di 8 Kg, ad impatto verticale su piastra per la generazione delle onde elastiche.

Contrariamente a quanto richiesto nell'indagine sismica a rifrazione, il segnale sismico acquisito nella tecnica MASW deve includere tutto il treno d'onda superficiale; pertanto la durata dell'acquisizione deve essere definita in modo da contenere tutto il segnale e non troncato nelle ultime tracce. Inoltre, lo stesso segnale viene acquisito senza applicazione di filtri e incrementi del segnale.

Indagine sismica a rifrazione

L'indagine sismica a rifrazione è consistita nell'esecuzione di n. 01 profilo con acquisizione di onde longitudinali (P), avente la seguente configurazione:

- lunghezza stendimento = 44,00 m;
- numero geofoni = 12;
- Spaziatura = 4,00 m;
- End Shot A = 0,00 metri;
- Central Shot E = 24,00 metri;
- End Shot B = 48,00 metri;
- durata dell'acquisizione = 128 msec;
- tempo di campionamento = 250 µsec;
- Frequenza geofoni = 10.00 Hz;
- Sistema di energizzazione = "massa battente".

## 3.3 RISULTATI INDAGINE GEOSISMICA

La topografia della superficie del sito investigato è perfettamente pianeggiante e quindi non è stato necessario correggere le quote di acquisizione. Il rumore ambientale rilevato è stato assolutamente trascurabile e riferito alle normali attività di lavorazione dei campi limitrofi. 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 sia per l'indagine sismica a rifrazione e sia per l'indagine MASW.

### 3.3.1 Elaborazione dell'indagine sismica di tipo MASW

L'elaborazione è stata sviluppata in due fasi:

1) determinazione della curva di dispersione e la valutazione dello spettro di velocità;

2) inversione della curva di dispersione interpretata con picking della curva di dispersione, vale a dire 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.

Per l'inversione dei dati sperimentali è stato utilizzato il software WinMasw 4.0 della Eliosoft.

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, abbastanza chiaramente, un modello costituito da 7 unità sismostratigrafiche e un valore di $V_{S,eq}$ misurato in 277 m/sec.

### 3.3.2 Elaborazione dell'indagine sismica a rifrazione

L'indagine MASW risente particolarmente del problema della non univocità del modello geofisico rispetto ai dati sperimentali ed è principalmente finalizzata alla determinazione del parametro Vs,eq. più che alla ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo. Pertanto, è stato eseguito uno stendimento sismico con la tecnica della rifrazione che ha permesso, unitamente a informazioni dirette di carattere geologico, geotecnico e idrogeologico, di ricostruire un modello geomeccanico ben definito.

Dai sismogrammi sperimentali sono stati letti i tempi di arrivo dei "first-break" attraverso l'utilizzo del software SISMOPC per la costruzione delle relative dromocrone (diagrammi tempo-distanza), mostrate in allegato.

L'interpretazione delle dromocrone, anche questa eseguita con l'ausilio di processi computerizzati, è stata effettuata attraverso il software INTERSISM della Geo&Soft, utilizzando come tecnica di interpretazione il Metodo GRM.

In allegato sono riportate le sezioni sismostratigrafiche interpretative, ottenute, scegliendo dei modelli a 3 strati, dove vengono indicate con SnA – SnB, rispettivamente le progressive iniziali e finali delle stese.

# 4. INDAGINE GEOMECCANICA

## 4.1 POZZETTI GEOGNOSTICI

A seguito della prima ricognizione e delle indagini sismsiche, sono stati effettuati n. 3 pozzetti geognostici eseguiti con escavatore Hitachi U29, spinti sono alla profondità di circa 1.50 m dal piano di campagna. L'obbiettivo era quello di verificare l'omogeneità dello stratopedologico e la granulometria della parte alta della successione stratigrafica.

È stato così possibile verificare la presenza di uno strato di terreno vegetale dello spessore di compreso tra 70 ÷ 80 cm, costituito da limo sabbioso con argilla, di colore scuro a luoghi nerastro che poggia direttamente su un substrato limo sabbioso con argilla di colore beige.

## 4.2 PROSPEZIONE A CAROTAGGIO CONTINUO

Il sondaggio meccanico ha evidenziato, sotto lo strato di terreno agrario limoso-sabbioso-argilloso nerastro dello spessore di circa 70 cm., la presenza di una successione stratigrafica continua, più o meno omogenea, riferibile al richiamato "Sintema di Motta del Lupo". Infatti, sotto la copertura vegetale, si riscontra la presenza di limo sabbioso di colore beige con noduli e concrezioni calcaree biancastre, seguito da materiale più argilloso, più scuro, talora verdastro, con frequenti patine di materiale evaporitico (calcinelli) fino alla quota di -3.30 m. Verso il basso, fino a -9.70 m, questo strato evidenzia frustoli di sostanze organica. Segue sabbia fine limosa beige della potenza di 3.70 m, dove è stata riscontra a la presenza a -11.50 m di un modesto acquifero confinato. Alla base delle sabbie è presente uno straterello di circa 0.70 m di ghiaia arrotondata, poligenica, di piccole dimensioni, in abbondante matrice sabbiosa. In profondità a quota di -14.10 m si rinvengono, in continuità, sedimenti limosi con argilla, talora debolmente sabbiosi di colore avana-verdastro fino a fondo foro (20 m).

Sulla base del sondaggio e dei rilievi eseguiti in zona, il *sintema di Motta del Lupo* può essere interpretabile come un deposito di piana alluvionale ove nella porzione inferiore dominano argille, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale con condizioni idrodinamiche anche di moderata energia; verso l'alto argille brune e verdastre di ambiente alluvionali associati ad aree marginali di esondazione o paludose con acque più stagnanti.

# 5. INDAGINE PENETROMETRICA

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi d) misurando il numero di colpi N necessari.

Le Prove Penetrometriche Dinamiche sono molto diffuse ed utilizzate data la loro semplicità esecutiva, economicità e rapidità di esecuzione. La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

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

L'utilizzo dei dati, ricavati da correlazioni indirette e facendo riferimento a vari autori, dovrà comunque essere trattato con le opportune cautele e, possibilmente, dopo esperienze geologiche acquisite in zona

Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono i seguenti:

- peso massa battente M;
- altezza libera caduta H;
- punta conica: diametro base cono D, area base A (angolo di apertura a);
- avanzamento (penetrazione) 5;
- presenza o meno del rivestimento esterno (fanghi bentonitici).

Con riferimento alla classificazione ISSMFE (1988) dei diversi tipi di penetrometri dinamici (Tabella 3) si rileva una prima suddivisione in quattro classi (in base al peso M della massa battente):

| TIPO | SIGLA DI RIFERIMENTO | PESO DELLA MASSA BATTENTE | PRPF. MAX. DI INDAGINE |
|---|---|---|---|
| | | | |
| Leggero | DPL | M ≤ 10 | 8 m. |
| Medio | DPM | 10 ≤ M ≤ 60 | 20 ÷ 25 m. |
| Pesante | DPH | 40 ≤ M ≤ 60 | 25 m. |
| Super Pesante | DPSH | M ≥ 60 | 25 m. |

Tabella 1 – Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici

Il penetrometro in uso nel corso dell'indagine PENNI 30 COMPAC, ha le seguenti caratteristiche:

- altezza di caduta H = 0.20 m;
- avanzamento $\delta$ = 10 cm;
- punta conica ($\alpha$ = 60-90°);
- diametro D = 35.7 mm;
- area base cono A = 10 $cm^2$

### Correlazione con $N_{SPT}$

Poiché la prova penetrometrica standard (SPT) rappresenta, ad oggi, uno dei mezzi più diffusi ed economici per ricavare informazioni dal sottosuolo, la maggior parte delle correlazioni esistenti

riguardano i valori del numero di colpi Nspt ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con Nspt. Il passaggio viene dato da:

$$N_{SPT} = (\beta_t\ N)$$

Dove:

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

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

Le prove penetrometriche eseguite hanno ricoperto l'intera area interessata dalla proposta progettuale, per quanto possibile, sovrapponendole alle linee degli stendimenti geofisici.

Tutte le prove eseguite sono state ripetute in adiacenza, a distanza di circa 1 metro in quanto, per la presenza a diverse profondità di elementi lapidei anche di grosse dimensioni, il rifiuto all'avanzamento della punta interveniva a profondità non compatibili con il quadro geolitologico d'insieme.

In appendice sono riportate le valutazioni statistiche e le correlazioni che permettono l'utilizzazione delle prove penetrometriche.

Dall'esame delle prove si è potuto sintetizzare un modello costituito da tre diverse unità litotecniche.

Delle tre prove una è stata eseguita in prossimità dello stendimento sismico e le restanti in corrispondenza della stazione di consegna.

| UNITÀ LITOTECNICA | SPESSORE | PROFONDITÀ | PESO DI VOLUME | $N_{SPT}$ | ANGOLO DI ATTRITO |
|---|---|---|---|---|---|
| | (metri) | (metri) | [Kn/m$^3$] | | (°) |
| Coltre superficiale | 0,70 | 0,70 | 16,77 | 3 | 22 |
| Limo sabbioso | 2,60 | 3,30 | 17,35 | 14 | 23 |
| Limo sabbioso con argilla | > 5,00 | >10,00 | 19,31 | 16 | 32 |

Tabella 2 – Correlazioni con prove penetrometriche.

# 6. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

Le esposizioni naturali e i tagli di origine antropica in corrispondenza di piccole sezioni occasionali, osservati in vari luoghi del comprensorio, unitamente ai sondaggi eseguiti nell'intera area hanno evidenziato la presenza di una sequenza di sabbie fini, talora limose, con intercalate lenti di ghiaia e ciottoli subarrotondati, poligenici, eterometrici, in matrice sabbiosa, medio-fine, localmente limosa, di colore beige. Queste lenti sono tendenzialmente non cementate. Poco frequenti sono sottili livelli, di spessore contenuto, di argilla o di arenaria.

L'analisi delle stratigrafie, ottenute da sondaggi sismici, penetrometrici e dali riscontri diretti nei pozzetti geognostici eseguiti, correlati con il sondaggio meccanico a carotaggio continuo, consente di definire che i terreni in esame, nella loro variabilità granulometrica e nei rapporti geometrici verticali tra i vari strati, pur nella loro eterogenietà, mostrano una sostanziale uniformità che permette di inquadrarli in unità litotecniche dalle caratteristiche geotecniche definite.

La successione stratigrafica così individuata è si compone di uno strato superficiale costituito da terreno vegetale localmente misto a riporto generico, che poggia su banco limo sabbioso. Infine al di sotto si ha un sabbie limose fini con ghiaie poligeniche.

## 6.1 INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ LITOTECNICHE

L'analisi delle indagini pregresse e la conoscenza diretta dei luoghi ha permesso la ricostruzione dettagliata e il locale assetto litostratigrafico, con l'identificazione e la caratterizzazione dei principali orizzonti litologici caratteristici del substrato dell'area d'intervento e definendo, per ognuno di essi, le caratteristiche litotecniche peculiari indispensabili per una corretta progettazione geotecnica e strutturale delle opere che si vogliono realizzare consolidando alla base quanto già edificato.

Da quanto emerso nel corso delle indagini geognostiche è stato possibile individuare, nell'ambito della successione stratigrafica, diverse unità litotecniche omogenee per litologia e geotecnica.

Unità Litotecnica "A"

Si tratta di suoli di copertura, di natura prevalentemente limo-sabbiosa con argilla raramente frammisti a riporto generico e localmente arricchiti di sostanza organica. È considerato un suolo coesivo da molle a mediamente consistente

Lo spessore medio è di circa 1,40 metri.

| Caratteristiche elastiche e meccaniche dell'unità Litologica "A" | |
|---|---|
| | |
| Spessore variabile | h = 1,40 m |
| Peso volume medio | $\gamma_m$= 16,67 KN/m$^3$ |
| Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine) | $\varphi$'= 23° |
| Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine) | c' = 4,0 kN/m$^2$ |
| Modulo di Edometrico medio | $E_m$ = 1,90 MPa |
| Modulo di Poisson | $\nu$ = 0.43 |
| Modulo di Young dinamico | $E_{din}$ = 80,12 MPa |
| Modulo di Taglio dinamico | $G_d$ = 27,95 MPa |

Tabella 3

Unità Litotecnica "B"

È costituita da depositi limo-sabbiosi con argilla di colore marrone, talora verdastro, con calcinelli frequenti rilevati sino alla profondità di circa 1,70 m. per poi proseguire con colorazioni grigio scure quasi nerastre per la presenza di fustoli di sostanza organica. Lo spessore complessivo è di circa 8.60 m.

| Caratteristiche elastiche e meccaniche dell'unità Litologica "B" | |
|---|---|
| | |
| Spessore medio | h = 8,60 m. |
| Peso volume medio | $\gamma_m$ = 20,18 KN/m$^3$ |
| Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine) | $\varphi'_m$= 21° |
| Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine) | $c'_m$ = 32,70 kN/m$^2$ |
| Modulo Edometrico medio | $E_m$ = 6,80 MPa |
| Modulo di Poisson | $\nu$ = 0.47 |
| Modulo di Young dinamico | $E_{din}$ = 137,97 MPa |
| Modulo di Taglio | $G_d$ = 46,97 MPa |

Tabella 4

Unità litotecnica "C"

Questa unità è formata prevalentemente da sabbie fini limose e ghiaie poligeniche ad elementi di piccole dimensioni in matrice sabbioso-limosa di colore beige. È considerato un suolo non coesivo, mediamente denso di bassa compressibilità.

| Caratteristiche elastiche e meccaniche dell'unità Litologica "C" | |
|---|---|
| | |
| Spessore variabile | h = 4,0 m |
| Peso volume medio | $\gamma_m$ = 19,67 KN/m$^3$ |
| Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine) | $\varphi'_m$= 19,67° |
| Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine) | $c'_m$ = 20 kN/m$^2$ |
| Modulo Edometrico medio | $E_m$ = 9,55 MPa |
| Modulo di Poisson | $\nu$ = 0.48 |
| Modulo di Young dinamico | $E_{din}$ = 524,95 MPa |
| Modulo di Taglio | $G_d$ = 177 MPa |

Tabella 5

Unità litotecnica "D"

Questa unità è formata da limo con argilla, talora debolmente sabbioso. Si tratta di un orizzonte coesivo da molto consistente a duro.

| Caratteristiche elastiche e meccaniche dell'unità Litologica "D" | |
|---|---|
| | |
| Spessore variabile | h = > 2,0 m |
| Peso volume medio | $\gamma_m$ = 20,18 KN/m$^3$ |
| Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine) | $\varphi'_m$= 19,67° |
| Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine) | $c'_m$ = 24 kN/m$^2$ |
| Modulo Edometrico medio | $E_m$ = 6,80 MPa |
| Modulo di Poisson | $\nu$ = 0.46 |
| Modulo di Young dinamico | $E_{din}$ = 580,75 MPa |
| Modulo di Taglio | $G_d$ = 189 MPa |

Tabella 6

## 7. VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA (D.M. 17.01.2018 N.T.C.)

Come evidenziato in precedenza, la regione del Tavoliere è notoriamente un'area a bassa attività sismica, ma che risente della vicinanza con zone sismogeneticamente attive (il Promontorio del Gargano e i monti del Subappennino Dauno), a causa dei particolari caratteri tettonici che li contraddistinguono, con notevoli disturbi (faglie), che nel corso degli anni è stata interessata da energia sismica intensa, con magnitudo comprese tra 5.0 e 6.5 e VIII/X grado MSK.

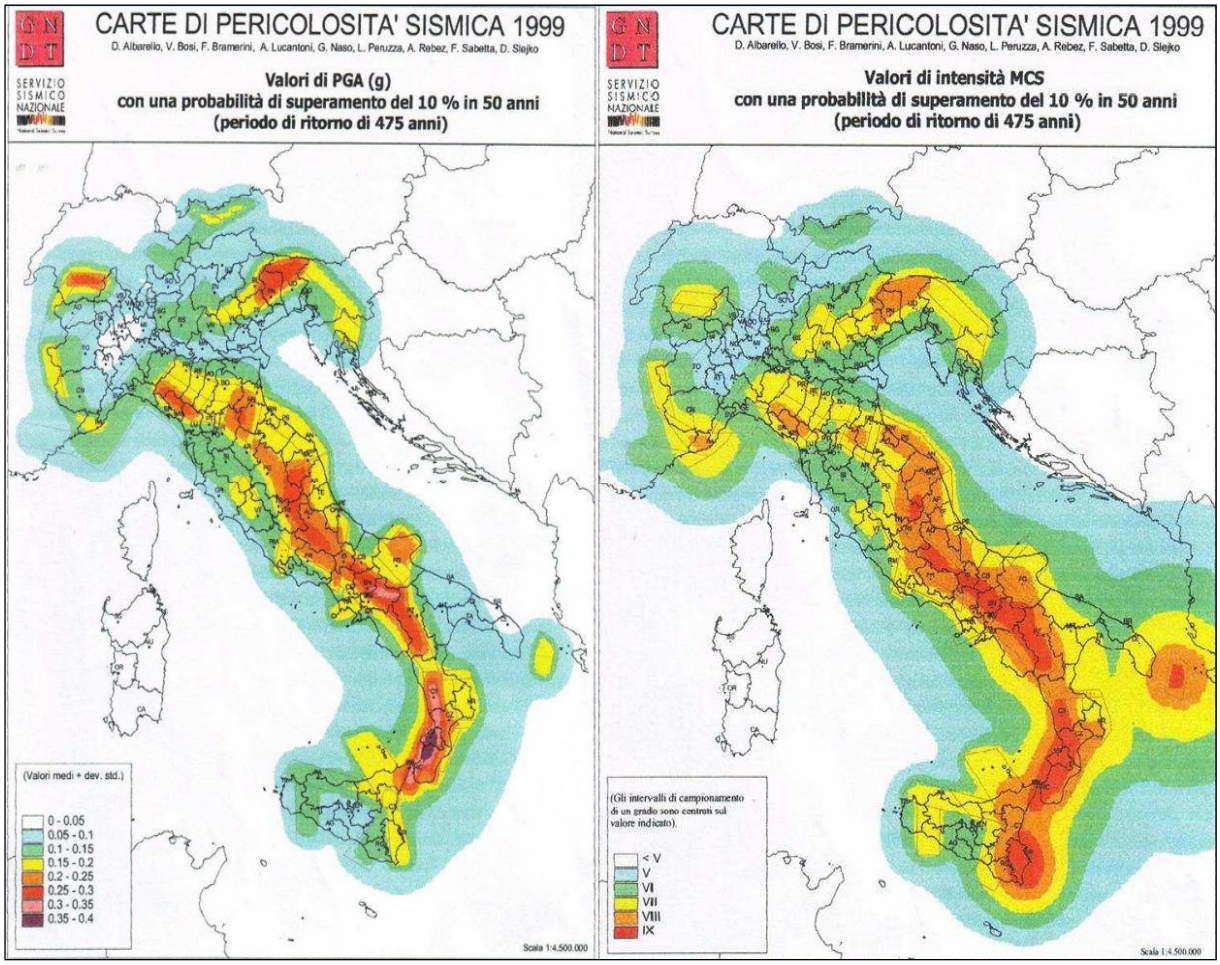



Figura 4 – Carte della pericolosità sismica (Servizio Sismico Nazionale)

Gli studi effettuati, negli ultimi anni, sulla pericolosità sismica del territorio italiano, dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (G.N.D.T.), dal 'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste (O.G.S.) e dal Servizio Sismico Nazionale (S.S.N.), hanno consentito di sviluppare una metodologia probabilistica sismo-tettonica, ampiamente consolidata ed adottata a livello internazionale, che prevede l'utilizzo di dati di base: catalogo sismico e Zonazione Sismogenetica (Z.S.), oltre all'adozione di criteri e metodi per l'elaborazione degli stessi dati.

Attraverso l'elaborazione dei dati, la pericolosità sismica, ossia "la stima dello scuotimento del suolo, previsto in un certo sito, durante un dato periodo, a causa di terremoti" è stata rappresentata dallo S.S.N. su due carte di pericolosità (1999).

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 Se(T), con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza $P_{VR}$ nel periodo di riferimento $V_R$. 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 $P_{VR}$, 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.
    - Individuazione del sito
        - Regione Puglia, Provincia di Foggia, Comune di San Severo;
- Ricerca per coordinate: Long. 15.399288; Lat. 41.617282.
- La velocità media di propagazione potrà essere assunta mediamente superiore a 277 m/s, entro 30 m di profondità delle onde di taglio ($V_{S,eq}$) per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$, dello strato $i_{esimo}$, 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 "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.. (tab. 3.2.II NTC/18).

| CATEGORIA | DESCRIZIONE |
|---|---|
| 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 fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s..** |
| D | 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. |

Tabella 8 Categoria di sottosuoli.

- Le condizioni topografiche del sito che si colloca su un'area perfettamente pianeggiante con inclinazione media i <15° (max 2°), sono riferibili alla categoria "$T_1$", 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).

| 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 |

Tabella 9 – Tabella 3.2.III NTC 2018 – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica $S_T$

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 $C_U$=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 |

Tabella 10 – Tab. 2.4.II NTC 2018 – Valori del coefficiente d'uso $C_U$.

- **Vita nominale dell'opera $V_N$:** intesa come il numero di anni nel 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 $V_R$ come:

$$V_R = V_N * C_U$$ (dove CU è il coefficiente d'uso);

- **Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $P_{VR}$:** 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 $V_N$:** 50 anni: costruzioni con livelli di prestazione ordinari.

**Coefficiente d'uso $C_U$:** 1 relativo alla classe d'uso II.

**Periodo di riferimento per l'azione sismica:** $V_R = V_N * C_U = 50*1 = 50$ anni

In funzione della probabilità di superamento nel periodo di riferimento $P_{VR}$ vengono calcolati i valori $a_g$, $F_0$, $T^*_C$ e del periodo di ritorno:

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

| SPETTRI DI RISPOSTA SECONDO LE NTC 2018 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Stati limite | | $P_{VR}$ | Periodo di ritorno (anni) | $a_g$[3] (g) | $F_0$ | $T^*_C$ (sec) |
| SLE | SLO | 81% | 30 | 0,0449 | 2,442 | 0,290 |
| | SLD | 63% | 50 | 0,0559 | 2,548 | 0,330 |
| SLU | SLV | 10% | 475 | 0.1340 | 2,630 | 0,450 |
| | SLC | 5% | 975 | 0.1714 | 2,606 | 0,516 |

Tabella 11

Dove:

- SLE = stati limite di esercizio
  - 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;
  - 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 rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

[3] $a_g$ espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g

- SLU = stati limite ultimi
  - 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 rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
  - SLC = **stato limite di prevenzione del collasso**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non 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 DI PENDII E FONDAZIONI) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| coefficienti | SLO | SLD | SLV | SLC |
| kh | 0.009 | 0,011 | 0,032 | 0,041 |
| kv | 0.0044 | 0,0055 | 0,016 | 0,0205 |
| $a_{max}$ [m/s²] | 0.44 | 0,55 | 1,314 | 1,681 |
| β | 0.200 | 0,200 | 0,240 | 0,240 |

Tabella 12 – Calcolo dei coefficienti sismici (per stabilità di pendii e fondazioni) con Categoria di Suolo di categoria B.

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

Ss = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,5 (SLO)-1,5 (SLD)-1,48 (SLV)-1,42 (SLC)

St = coefficiente di amplificazione topografica = 1,0

## 8. SINTESI CONCLUSIVA

Il presente studio descrive le caratteristiche geotecniche delle litologie affioranti nell'area interessata progetto per la realizzazione di un impianto solare fotovoltaico per la produzione di energia da fonte solare – di potenza stimata di 20 MW – della relativa linea di connessione alla cabina di consegna, a circa 7 km a Sud rispetto al centro abitato di San Severo, all'interno di un'area in disponibilità della società TE GREEN DEV 3 S.r.l.

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:

- n. 1 prospezione sismica superficiale con tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves);
- n. 1 prospezione sismica a rifrazione;
- n. 3 Prove penetrometriche dinamiche.

L'area oggetto di intervento è ubicata in un ambito perfettamente pianeggiante espressione attuale di un terrazzo alluvionale a quote prossime a 60 metri con pendenze minime, prossime ad 1° in direzione Sud. Qui affiorano depositi alluvionali, di età compresa tra il Pleistocene medio e l'Olocene.

La successione stratigrafica individuata e la caratterizzazione geomeccanica delle singole unità litostratigrafiche è stata eseguita sulla base di un rilievo geologico tecnico e dalle correlazioni dei risultati di indagini geosismiche (MASW e a Rifrazione), geoelettriche (Tomografie) e penetrometriche. È stato così ipotizzato un modello geotecnico a 3 unità litotecniche.

Le indagini sismiche eseguite, hanno consentito di determinare le caratteristiche elasto-dinamiche dei terreni investigati e definire la categoria del sottosuolo di fondazione.

Il substrato di fondazione, sulla base dei risultati dell'indagine sismica è, per l'intera area di intervento, classificabile come un suolo di categoria C, caratterizzato da $V_{S,eq}$ = 277 m/sec, spessore > 30 metri.

Per quanto attiene le condizioni topografiche, valutata la pendenza generale della piana si attribuisce una categoria topografica $T_1$ (pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15° - valori misurati pari ad 1°) e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale si adotta un coefficiente topografico $S_T$ = 1,0.

La presenza della falda freatica è stata riscontrata in numerosi pozzi, utilizzati quasi esclusivamente per uso irriguo, diffusi in tutto il comprensorio, ancorché nel corso del sondaggio geognostico. Il livello freatico varia in relazione alla eterogenità dell'acquifero e comunque la quota è sempre individuata a profondità comprese tra -12 metri e -25 metri dal piano di campagna), il che porta ad escludere l'insorgenza di sovrappressioni neutre nel sistema terreno – fondazione.

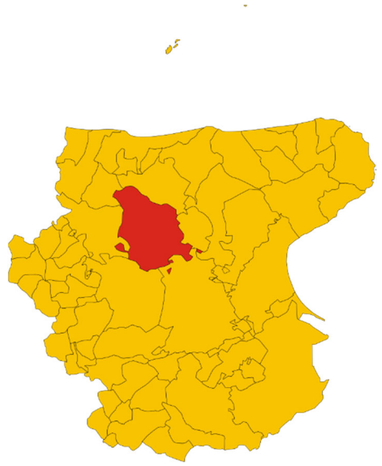
Vieste, luglio 2021

dott. geol. Michele Pecorelli

ORDINE DEI GEOLOGI
Dott. Geol. PECORELLI MICHELE n° 327
PUGLIA

## ALLEGATO I

## UBICAZIONE INDAGINI - CAMPO FOTOVOLTAICO



LEGENDA

- MASW
- SISMICA A RIFRAZIONE
- PROVE PENETROMETRICHE
- POZZETTI GEOGNOSTICI

## ALLEGATO II

## UBICAZIONE INDAGINI STAZIONE DI ELEVAZIONE MT/AT

LEGENDA

- MASW
- SISMICA A RIFRAZIONE
- PROVE PENETROMETRICHE
- POZZETTI GEOGNOSTICI

# ALLEGATO III

# PROSPEZIONI SISMICHE TIPO MASW

## Prospezione MASW 1

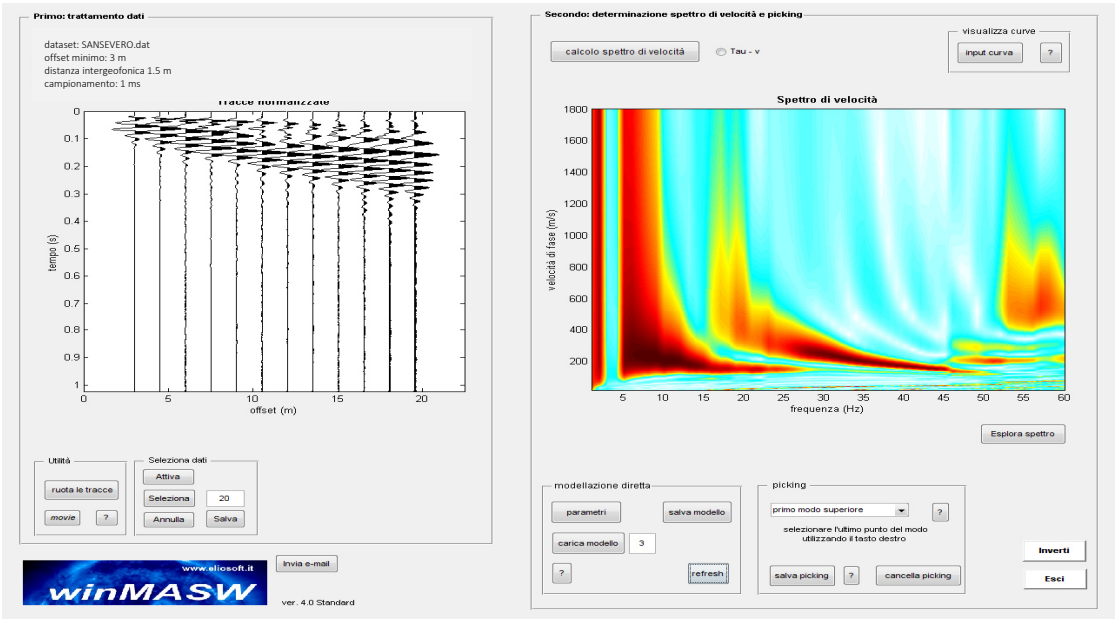
L'indagine MASW 1 ha restituito un valore di $Vs_{30}$=277 m/s, coincidente col valore della $V_{s,eq}$, in quanto non è stato intercettato il bedrock (definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, con Vs>800 m/sec) ad una profondità H = 30.00 m dal p.c..

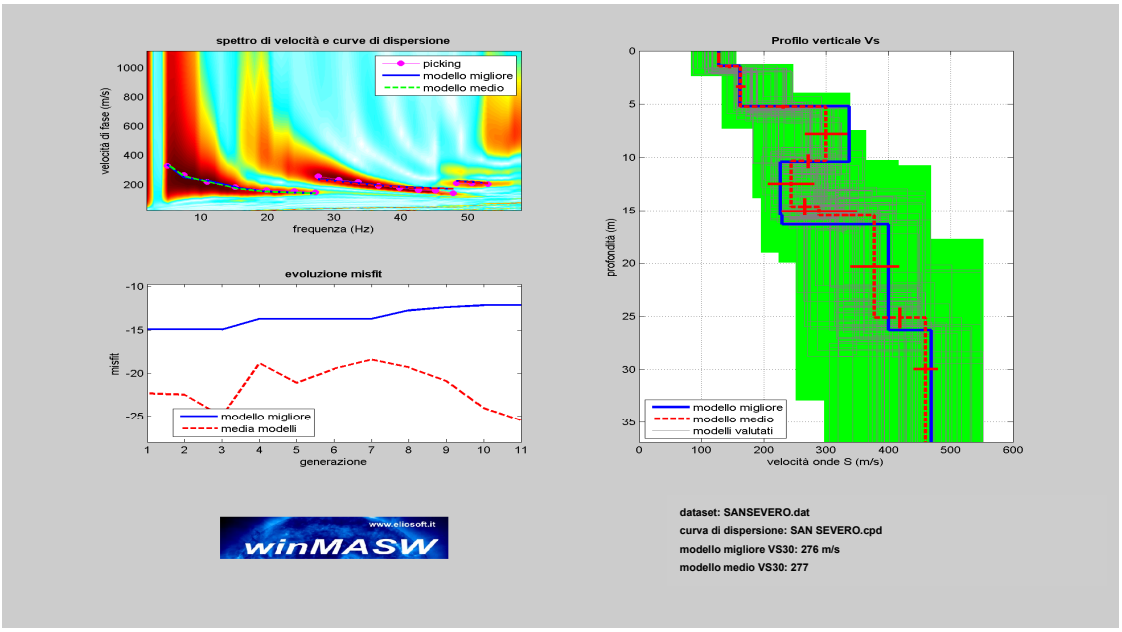
Di seguito si riportano i valori delle Vs in funzione delle profondità investigate.

| MASW 1 | | | |
|---|---|---|---|
| MASW | Velocità di taglio (m/sec) | Spessori (m) | Profondità (m) |
| SISMOSTRATO I | 128 | 1,40 | 0.00 – 1.40 |
| SISMOSTRATO II | 163 | 3,80 | 1.40 – 5.20 |
| SISMOSTRATO III | 300 | 5,10 | 5,20 – 10,30 |
| SISMOSTRATO IV | 244 | 4,30 | 10,30 – 14,70 |
| SISMOSTRATO V | 289 | 0,8 | 14,70 – 15,50 |
| SISMOSTRATO VI | 378 | 9,7 | 15,50 – 25,20 |
| SISMOSTRATO VII | 460 | Semispazio | Semispazio |
| Vs,eq = 277 m/sec | | | |

Per quanto attiene le correlazioni tra le unità sismostratigrafiche e litologie investigate, si rimanda alla tabella seguente.

| MASW 1 | | |
|---|---|---|
| SISMOSTRATI | LITOLOGIA INVESTIGATA | Profondità (m) |
| SISMOSTRATO I | Terreno vegetale | 0.00 – 1.40 |
| SISMOSTRATO II | Limo sabbioso-argilloso con calcinelli | 1.40 – 5.20 |
| SISMOSTRATO III | Limo sabbioso talora argilloso | 5,20 – 10,30 |
| SISMOSTRATO IV | Sabbia fine limosa | 10,30 – 14,70 |
| SISMOSTRATO V | Ghiaia arrotondata poligenica in matrice sabbioso-limosa | 14,70 – 15,50 |
| SISMOSTRATO VI | Limo con argilla | 15,50 – 25,20 |
| SISMOSTRATO VII | Limo con argilla con migliori proprietà tecniche | Semispazio |


Primo: trattamento dati
dataset: SANSEVERO.dat
offset minimo: 3 m
distanza intergeofonica 1.5 m
campionamento: 1 ms
tempo (s)
offset (m)
Utilità
ruota le tracce
movie
Seleziona dati
Attiva
Seleziona
Annulla
Salva
winMASW
invia e-mail
ver. 4.0 Standard
Secondo: determinazione spettro di velocità e picking
calcolo spettro di velocità
Tau - v
visualizza curve
input curva
Spettro di velocità
velocità di fase (m/s)
frequenza (Hz)
Esplora spettro
modellazione diretta
parametri
salva modello
carica modello
refresh
picking
primo modo superiore
selezionare l'ultimo punto del modo utilizzando il tasto destro
salva picking
cancella picking
Inverti
Esci


spettro di velocità e curve di dispersione
picking
modello migliore
modello medio
velocità di fase (m/s)
frequenza (Hz)
evoluzione misfit
misfit
modello migliore
media modelli
generazione
Profilo verticale Vs
profondità (m)
modello migliore
modello medio
modelli valutati
velocità onde S (m/s)
winMASW
dataset: SANSEVERO.dat
curva di dispersione: SAN SEVERO.cpd
modello migliore VS30: 276 m/s
modello medio VS30: 277

# ALLEGATO IV

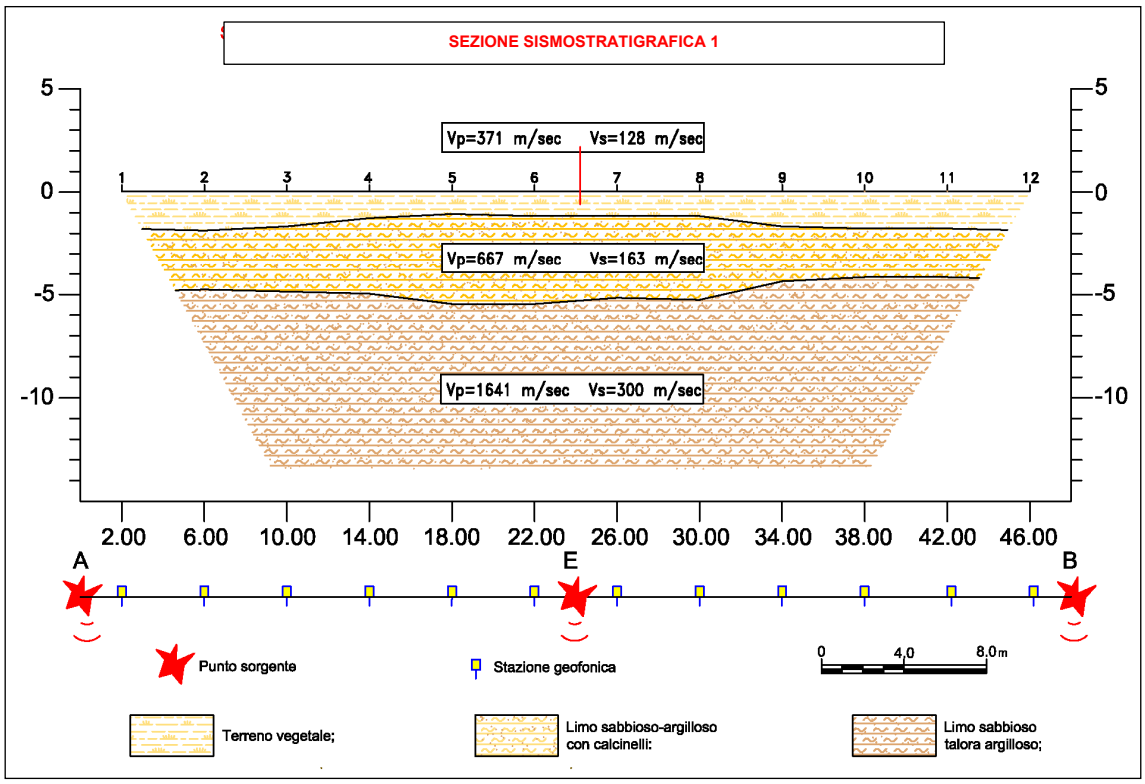
# PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

## Prospezione Sismica 1

| PROSPEZIONE SISMICA 1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sismica a Rifrazione | Velocità Onde P (m/sec) | Velocità Onde S (m/sec) | Profondità | |
| | | | Da (m) | a (m) |
| I | 371 | 128 | 0.00 | 1.10 – 1.90 |
| II | 667 | 163 | 1.10 – 1.90 | 4.20 – 5.50 |
| III | 1641 | 300 | indefinito | |

A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

| PROSPEZIONE SISMICA 1 | |
|---|---|
| SISMOSTRATI | LITOLOGIA INVESTIGATA |
| SISMOSTRATO I | Terreno vegetale |
| SISMOSTRATO II | Limo sabbioso-argilloso con calcinelli |
| SISMOSTRATO III | Limo sabbioso talora argilloso |



| MODULI DINAMICI PROFILO 1 | | | |
|---|---|---|---|
| | Strato 1 | Strato 2 | Strato 3 |
| Velocità Onde P (m/s): | 371 | 667 | 1641 |
| Velocità Onde S (m/s): | 128 | 163 | 300 |
| Modulo di Poisson: | 0.43 | 0.47 | 0.48 |
| Peso di volume (KN/$m^3$): | 1.71 | 1.77 | 1.97 |
| SPESSORE MEDIO STRATO (m) | 1.50 | 3.30 | 9.0 |
| MODULO DI YOUNG DINAMICO $E_{din}$ (Mpa o N/$mm^2$) | 80.12 | 137.97 | 524.94 |
| MODULO DI YOUNG STATICO E (Mpa o N/$mm^2$) | 4.02 | 6.86 | 26.28 |
| MODULO DI TAGLIO G (Mpa o N/$mm^2$) | 27.94 | 46.97 | 177.01 |
| MODULO DI YOUNG DINAMICO $E_{din}$ (Mpa) | 80.12 | 137.97 | 524.94 |
| MODULO DI INCOMPRESSIBILITÀ | 197.80 | 724.02 | 5060.53 |

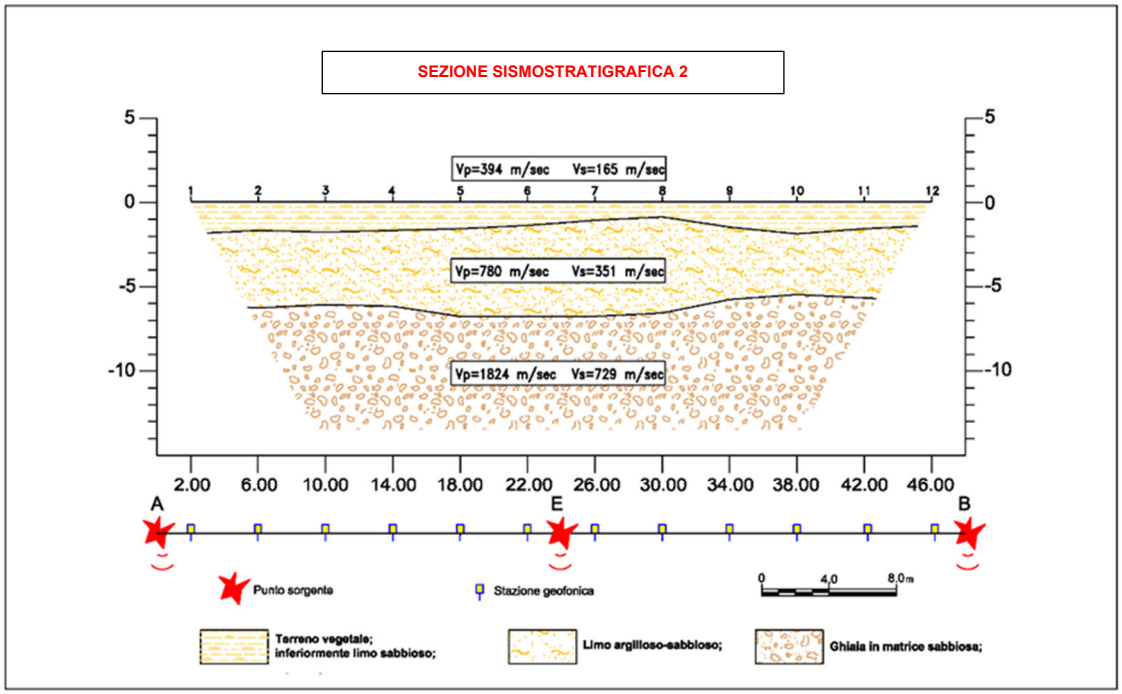
Prospezione Sismica 2

| PROSPEZIONE SISMICA 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sismica a Rifrazione | Velocità Onde P (m/sec) | Velocità Onde S (m/sec) | Profondità | |
| | | | Da (m) | a (m) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| SISMOSTRATO I | 394 | 165 | 0,00 | 0,90 – 1,90 |
| SISMOSTRATO II | 780 | 351 | 0,90 – 1,90 | 5,50 – 6,80 |
| SISMOSTRATO III | 1824 | 729 | Indefinito | |

A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

| PROSPEZIONE SISMICA 2 | |
|---|---|
| SISMOSTRATI | LITOLOGIA INVESTIGATA |
| SISMOSTRATO I | Terreno vegetale con alla base ghiaia sabbiosa |
| SISMOSTRATO II | Limo argilloso - sabbioso |
| SISMOSTRATO III | Ghiaia in matrice sabbiosa |




| MODULI DINAMICI PROFILO 2 | | | |
|---|---|---|---|
| | Strato 1 | Strato 2 | Strato 3 |
| Velocità Onde P (m/s): | 394 | 780 | 1824 |
| Velocità Onde S (m/s): | 165 | 351 | 729 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Modulo di Poisson: | 0,39 | 0,37 | 0,40 |
| Peso di volume (KN/m$^3$): | 16,79 | 17,56 | 20,65 |
| SPESSORE MEDIO STRATO (m) | 1,70 | 4,30 | 6,00 |
| MODULO DI YOUNG DINAMICO $E_{din}$ (Mpa o Nmm$^2$) | 130 | 606 | 3146 |
| MODULO DI TAGLIO DINAMICO Gdin (Mpa o Nmm$^2$) | 5 | 22 | 110 |
| MODULO DI BULK (K) (Mpa o Nmm$^2$)<br>(mod. di incompressibilità di volume) | 204 | 796 | 5517 |
| MODULO DI YOUNG STATICO $E_{stat}$ (Kg/cm$^2$) | 160 | 745 | 3865 |
| POROSITÀ %<br>(correlazione Rzhesvky e Novik (1971) (%) | 47,07 | 43,46 | 33,70 |
| MODULO DI COMPRESSIONE EDOMETRICA (Kg/cm$^2$) | 266 | 1089 | 7005 |
| RIGIDITÀ SISMICA (m/sec · KN/m$^3$) | 2770 | 6164 | 15052 |
| Frequenza dello strato | 24,26 | 20,41 | 30,38 |
| Periodo dello strato | 0,04 | 0,049 | 0,033 |

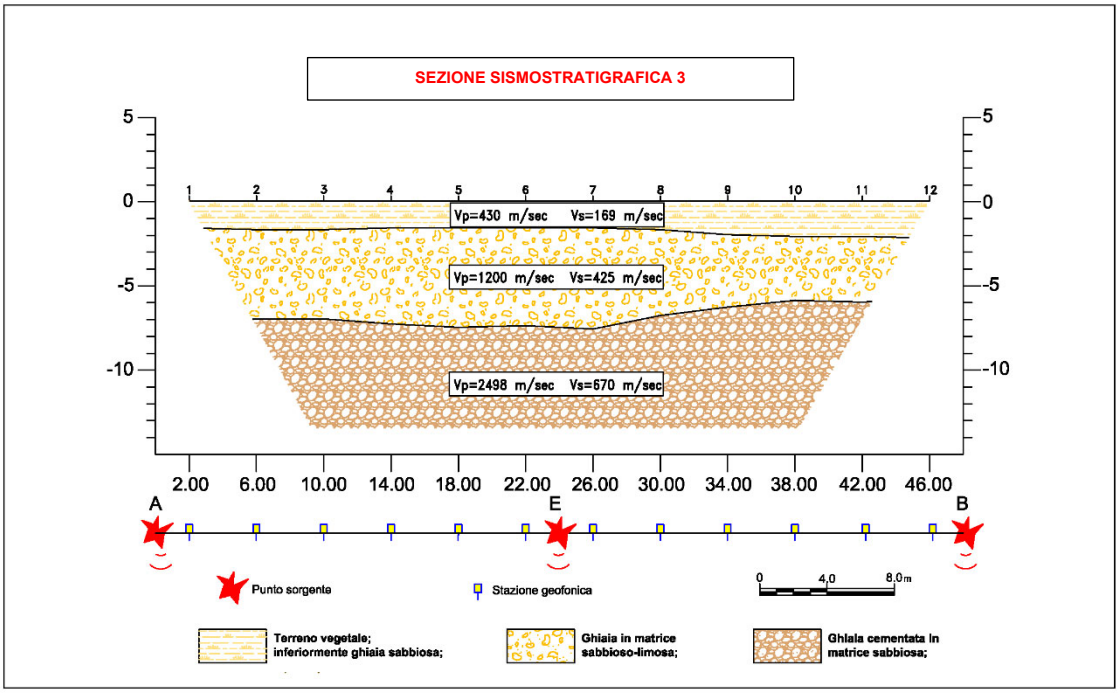
Prospezione Sismica 3

| PROSPEZIONE SISMICA 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sismica a Rifrazione | Velocità Onde P (m/sec) | Velocità Onde S (m/sec) | Profondità | |
| | | | Da (m) | a (m) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| SISMOSTRATO I | 430 | 169 | 0,00 | 1,60 – 2,20 |
| SISMOSTRATO II | 1200 | 425 | 1,60 – 2,20 | 5,80 – 7,60 |
| SISMOSTRATO III | 2498 | 670 | Indefinito | |

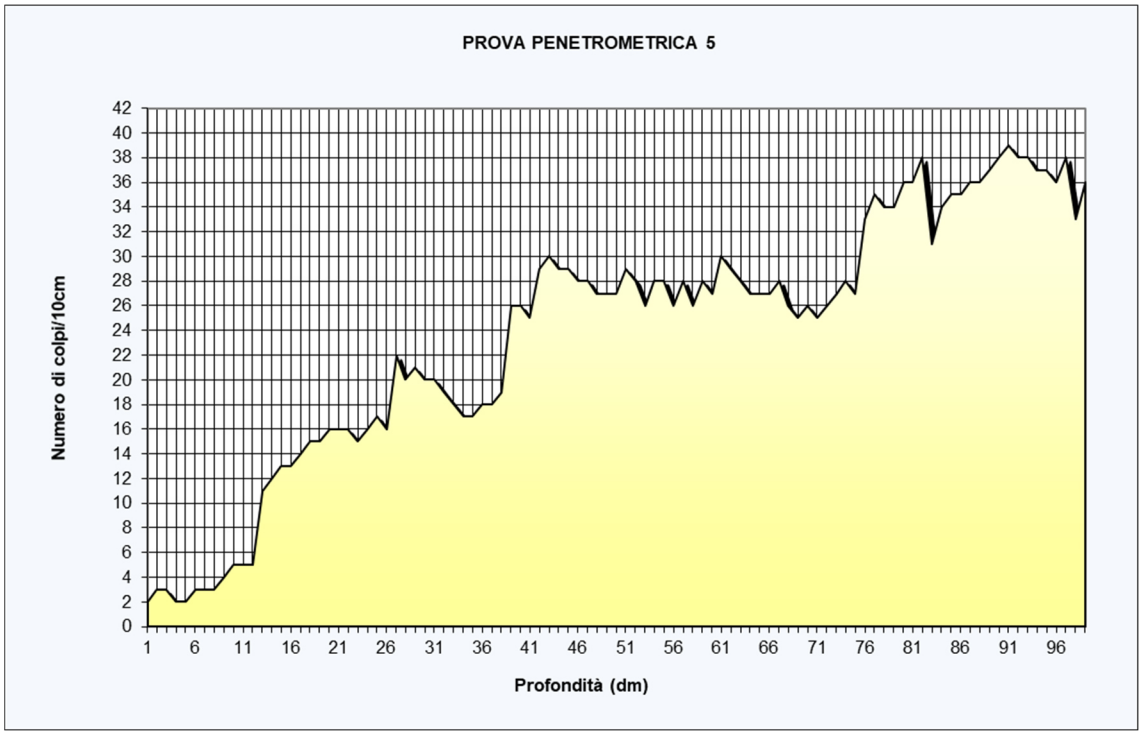
A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

| PROSPEZIONE SISMICA 3 | |
|---|---|
| SISMOSTRATI | LITOLOGIA INVESTIGATA |
| SISMOSTRATO I | Terreno vegetale con alla base ghiaia sabbiosa |
| SISMOSTRATO II | Ghiaia in matrice sabbioso - limosa |
| SISMOSTRATO III | Ghiaia cementata n matrice sabbiosa |




| MODULI DINAMICI PROFILO 3 | | | |
|---|---|---|---|
| | Strato 1 | Strato 2 | Strato 3 |
| Velocità Onde P (m/s): | 430 | 1200 | 2498 |
| Velocità Onde S (m/s): | 169 | 425 | 670 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Modulo di Poisson: | 0,41 | 0,43 | 0,46 |
| Peso di volume (KN/$m^3$) | 16,86 | 19,40 | 22,00 |
| SPESSORE MEDIO STRATO (m) | 1,70 | 4,70 | 6,40 |
| MODULO DI YOUNG DINAMICO Edin (Mpa o $Nmm^2$) | 138 | 1021 | 2945 |
| MODULO DI TAGLIO DINAMICO Gdin (Mpa o $Nmm^2$) | 5 | 35 | 99 |
| MODULO DI BULK (K) (Mpa o $Nmm^2$)<br>(mod. di incompressibilità di volume) | 253 | 2374 | 12662 |
| MODULO DI YOUNG STATICO $E_{stat}$ (Kg/$cm^2$) | 170 | 1255 | 3617 |
| POROSITÀ %<br>(correlazione Rzhesvky e Novik (1971) (%) | 46,73 | 39,53 | 27,40 |
| MODULO DI COMPRESSIONE EDOMETRICA (Kg/$cm^2$) | 318 | 2849 | 13996 |
| RIGIDITÀ SISMICA (m/sec · KN/$m^3$) | 2849 | 8245 | 14737 |
| Frequenza dello strato | 24,85 | 22,61 | 26,17 |
| Periodo dello strato | 0,04 | 0,044 | 0,038 |


PROVA PENETROMETRICA 5
Numero di colpi/10cm
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
1
6
11
16
21
26
31
36
41
46
51
56
61
66
71
76
81
86
91
96
Profondità (dm)