

**IMPIANTO FOTOVOLTAICO A TERRA COLLEGATO ALLA RTN  
POTENZA NOMINALE 26,95 MWp**

*Località Spinazzino – Comune di Ferrara (FE)*

**PROPONENTE:**

**TEP RENEWABLES (FERRARA PV) S.R.L.**  
Viale Shakespeare,71 – 00144 - Roma  
P. IVA e C.F. 16462341005 – REA RM - 1658414

**PROGETTISTI:**

**ING. GIULIA GIOMBINI**  
Iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Viterbo  
al n. A-1009

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

**DOTT. GEOL. MICHELE PECORELLI**  
Iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Puglia  
al n. 327

**PROGETTO DEFINITIVO IMPIANTO FOTOVOLTAICO**

(art. 23 del D. Lgs 152/2006 e ss. mm. ii)

***Relazione geotecnica***

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
21-00007- IT_Ferrara_R01_Rev0_Relazione Geotecnica	02/2022	Prima emissione	MP	GG\MB	F.Battafarano

## INDICE

1. PREMESSA .....	3
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	3
2. LINEAMENTI GEOLOGICI E MORFOLOGICI GENERALI .....	5
2.1 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO.....	5
2.2 LINEAMENTI GEOLOGICI.....	5
3. PIANIFICAZIONE ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE.....	8
3.1 METODOLOGIE DI INDAGINE ADOTTATE .....	8
3.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI: ATTIVITÀ DI CAMPO .....	10
3.3 RISULTATI INDAGINE GEOSISMICA.....	11
3.3.1 Elaborazione dell'indagine sismica di tipo MASW .....	12
3.3.2 Elaborazione dell'indagine sismica a rifrazione .....	12
3.4 INDAGINE GEOELETTRICA.....	13
3.4.1 Prospezione E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography) .....	13
3.4.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI: ATTIVITÀ DI CAMPO .....	14
3.5 ANALISI INDAGINE GEOELETTRICA.....	15
3.5.1 Interpretazione delle sezioni elettrostratigrafiche .....	16
4. INDAGINE PENETROMETRICA.....	17
5. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA .....	19
5.1 INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ LITOTECNICHE.....	19
6. VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA (D.M. 17.01.2018 N.T.C.) .....	21
7. SINTESI CONCLUSIVA .....	26

## 1. PREMESSA

Il presente studio descrive le caratteristiche geotecniche delle litologie affioranti nell'area interessata progetto per la realizzazione di un impianto fotovoltaico a terra collegato alla RTN di potenza nominale 26,95 MWp, sito in località Marrara nel Comune di FERRARA all'interno di un'area in disponibilità della società di scopo TEP Renewables (Ferrara PV ) 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. 3 prospezioni sismiche superficiali con tecnica MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves);
- n. 5 prospezioni sismiche a rifrazione.
- n. 1 prospezione E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography).

Infine, il quadro conoscitivo è stato completato con l'esecuzione di n. 5 prove penetrometriche dinamiche eseguite con penetrometro PENNI 30 della COMPAC di Fermignano (PU)

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 Ferrara a circa 2 km a SudOvest rispetto all'abitato di Marrara, piccola frazione a Sud di Ferrara. L'area è ubicata immediatamente a valle del Canale Cembalina. L'accesso è garantito attraverso viabilità comunale (Via Cembalina) che da Marrara, costeggiando il canale omonimo, giunge sino a Spinazzino (frazione di Ferrara).

Nella cartografia I.G.M. a scala 1:50000 l'area è compresa nel quadrante 185 (FERRARA); nella cartografia in scala 1:25000 l'intervento interessa la Tavoleta 76 III SO (Marrara).

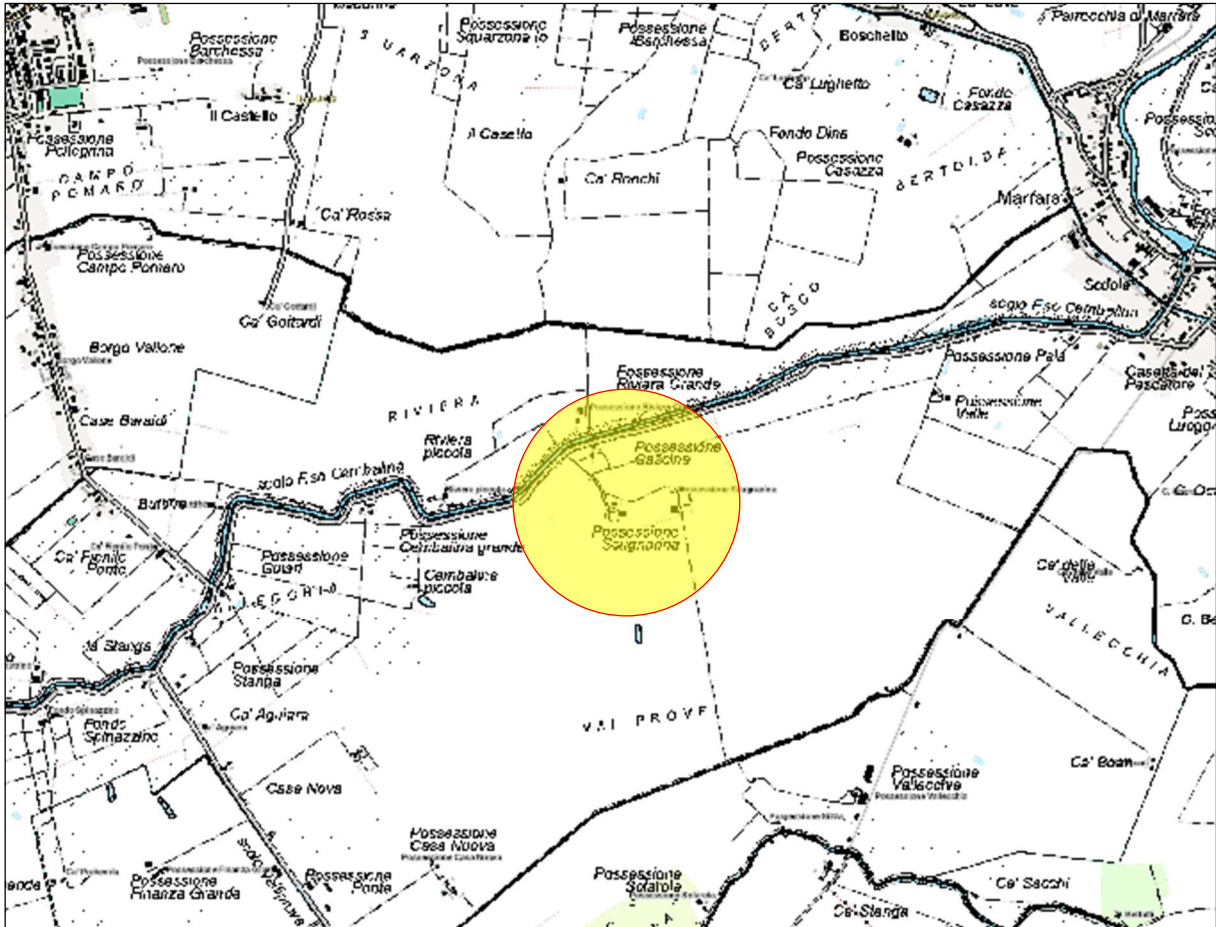


Figura 1– Stralcio della Tavoletta 76 III NE – Marrara.

## 2. LINEAMENTI GEOLOGICI E MORFOLOGICI GENERALI

### 2.1 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO

L'area in esame si inserisce nel settore deposizionale della bassa Pianura Padana caratterizzato da moderate ondulazioni che degradano progressivamente verso Est; le quote sono prossime a 5 metri s.l.m e l'acclività è compresa entro 1°.



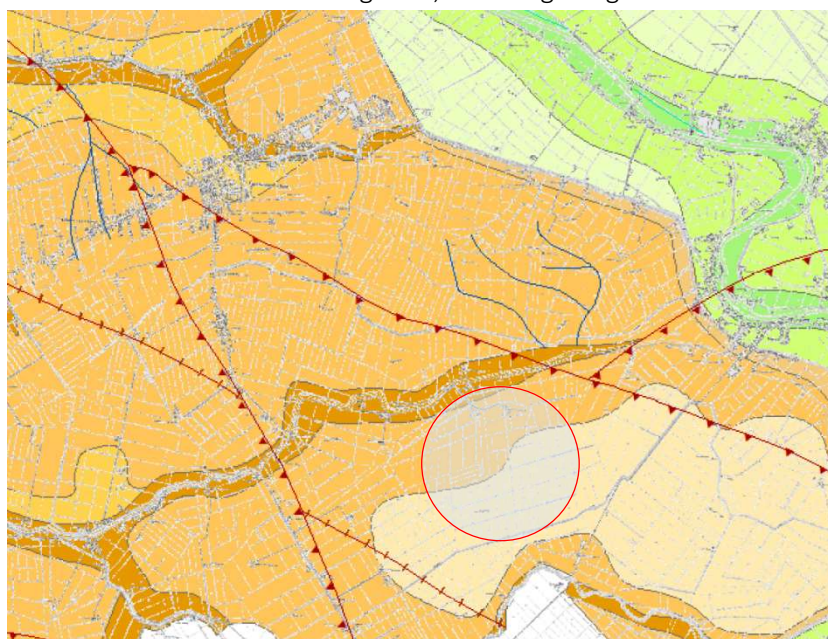
Figura 2– Inquadramento territoriale dell'area di impianto. Ortofoto da Google earth.

La morfologia superficiale risente fortemente del costante e progressivo intervento antropico, volto a migliorarne l'efficienza agricola. Anche la stessa rete idrografica, che connota fortemente l'intero comprensorio è stata determinata dall'intervento antropico che ne ha modificato i corsi per mettere in sicurezza, dal punto di vista idraulico, le aree antropizzate. In precedenza i diversi fossi e canali di scolo trascinavano con costante regolarità, generando alluvioni che hanno sedimentato lenti a diversa granulometria che conferiscono

alla zona un paesaggio leggermente ondulato. Le bonifiche hanno prodotto scoli, collettori, canali artificiali e scolmatori che regolano il deflusso delle acque in eccesso e nello stesso tempo distribuiscono le acque destinate all'irrigazione.

### 2.2 LINEAMENTI GEOLOGICI

Come evidenziato nella figura 3, la carta geologica del Comune di Ferrara e ancor di più evidenzia una



potente successione terrigena di avanfossa appartenente al Super Sintema Emiliano Romagnolo della quale affiorano i termini più recenti, riferibili al Pleistocene medio, propri della Piana Alluvionale dei Fiumi appenninici.

#### Piana alluvionale di fiumi appenninici







-  Sabbie limose di riempimento di canale fluviale
-  Sabbie e limi di riempimento di canale fluviale
-  Limi sabbiosi di riempimento di canale fluviale
-  Limi con sabbie di argine e ventaglio da rotta
-  Argille e argille limose di piana interalvea
-  Argille e argille organiche di depressione interalvea

Figura 3 – Carta Geologica del Comune di Ferrara. – fonte [Quadro conoscitivo - Geologia - Comune di Ferrara](#)

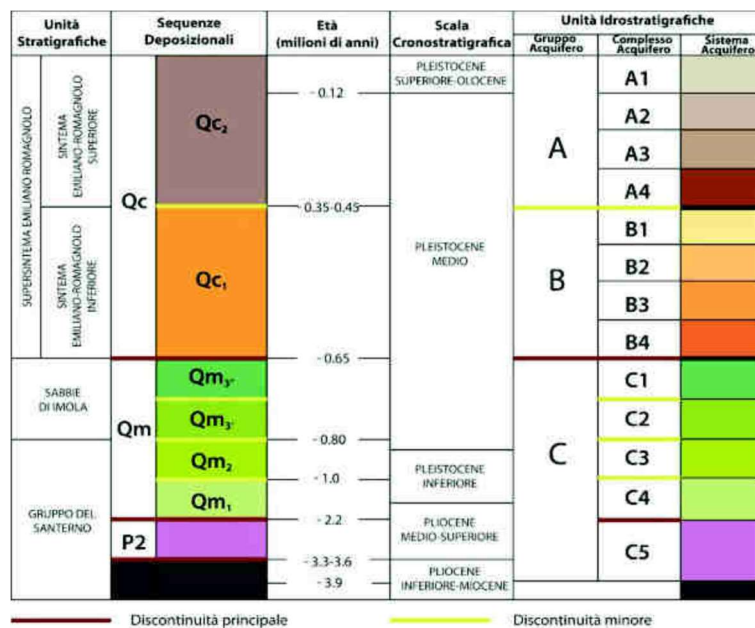


Figura 4 - Schema stratigrafico-sequenziale dei depositi plio-quadernari del bacino padano, con indicazione delle unità idrostratigrafiche. Regione Emilia-Romagna & Eni-Agip, 1998.

Come meglio descritto nell'elaborato Relazione Geologica, dal punto di vista geologico generale il sottosuolo in esame è parte integrante dei depositi continentali quadernari, poggiati sui sedimenti plio-pleistocenici. La parte alta è formata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali. Spostandosi verso il piede dell'Appennino, nei cicli sedimentari scompaiono le intercalazioni marine e la parte superiore è dominata da corpi ghiaioso-sabbiosi di riempimento di canale fluviale, che registrano lobi di conoide alluvionale ad alimentazione certamente appenninica.

Nello specifico affiorano depositi ascrivibili ad una unica formazione.

➤ **SUBSISTEMA DI VILLA VERUCCHIO**

- Sabbie, limi e argille limose di piana alluvionale

Si tratta di sabbie, sabbie fini limose, limi sabbiosi e limi accumulati da prevalenti fenomeni di tracimazione, in ambienti di piana inondabile ben drenata. Assai diffusi sono i livelli limosi, mentre le argille limose sono nel complesso volumetricamente subordinate. Picchi di resistenza alla punta corrispondono a livelli di sabbia a base netta, correlabili ad eventi di tracimazione arealmente estesi. Nel complesso, le successioni mostrano un'evoluzione granulometrica con affinamento verso l'alto, con i livelli di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi diffusi prevalentemente nella parte bassa dell'unità, soprattutto attorno ai 30 m di profondità. Verso l'alto la maggior parte della successione è formata da limi, con qualche intercalazione limoso-sabbiosa. Nell'area di intervento affioramento i sedimenti più fini.



### 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, legate ad opere di pianificazione idraulica con la realizzazione indagini geomeccaniche e 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, MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) e prospezioni E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography); il quadro conoscitivo è stato, infine, completato con l'esecuzione di n. 5 prove penetrometriche dinamiche necessarie a determinare la resistenza del suolo nei primi metri (max 10 metri) della successione stratigrafica.

Da qui si è risaliti alla determinazione dei parametri sismo-elastici 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 (VS).

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 ( $V_p$ ), velocità delle onde trasversali S ( $V_s$ ) ed i relativi parametri elastici ( $E$ ,  $G$ ,  $K$  e  $\nu$ )<sup>1</sup>.

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,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Dove

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

$V_{si}$  = velocità delle onde di taglio nell' $i_{esimo}$  strato;

$N$  = numero di strati;

---

<sup>1</sup> Allegato IV



$H$  = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/sec<sup>2</sup>.

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 spazature 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.

---

<sup>2</sup> 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.

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 rigidità 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 leggera pendenza, pertanto è stata applicata una correzione delle quote di acquisizione. Il rumore ambientale rilevato è stato assolutamente trascurabile e riferito alle normali attività antropiche delle aree circostanti. Anche il disturbo del vento è stato ritenuto 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 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 3 unità sismostratigrafiche valore di  $V_{s,eq}$  comprese tra 173 e 185 m/sec,

PROFILO MASW	$V_{s,eq}$	CATEGORIA SOTTOSUOLO
n.	m/sec	Tab. 3.2.II - D.M. 17 gennaio 2018
1	173	D
2	185	C
3	181	C

Tabella 1 – Valore della  $V_{s,eq}$  per i singoli stendimenti MASW

Pur evidenziando che 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  $V_{s,eq}$ , più che alla ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo, è stato possibile evidenziare una congruenza fra il modello ricavato dalle indagini MASW con quello determinato dall'indagine sismica a rifrazione.

Sulla base di valutazioni incrociate sull'attendibilità dei risultati ottenuti dalle ricostruzioni sismiche è possibile scegliere il modello ritenuto più conforme alla situazione litostratigrafica presente nell'area e di cui è sempre preferibile avere a disposizione informazioni dirette di tipo geologico, geotecnico e/o idrogeologico.

### 3.3.2 Elaborazione dell'indagine sismica a rifrazione

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.

### 3.4 INDAGINE GEOELETRICA

#### 3.4.1 Prospezione E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography)

I metodi di prospezione geoelettrica in corrente continua sono comunemente utilizzati per l'indagine del sottosuolo attraverso lo studio della resistività elettrica.

Il metodo si basa sul principio che la distribuzione di un campo di potenziale elettrico (U) sulla superficie del terreno dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche della sorgente, anche dalla distribuzione della resistività elettrica ( $\rho$ ) nel sottosuolo.

La resistività elettrica, inverso della conducibilità elettrica, è un parametro fisico intrinseco delle rocce ed indica la resistenza specifica che oppongono i vari litotipi a farsi attraversare dalla corrente elettrica quando questi sono sottoposti all'azione di una forza elettromotrice. Essa può variare notevolmente da punto a punto poiché sono molti i fattori che la influenzano, tra i quali la presenza di acqua, la porosità, la temperatura e la pressione. La tecnica della prospezione geoelettrica consiste nell'inviare corrente continua nel terreno attraverso un dipolo (dipolo di energizzazione) e registrare la differenza di potenziale del campo elettrico indotto attraverso altri distinti dipoli (dipolo di misura), posti in successione a distanze progressivamente maggiori lungo uno stendimento. Questi poli elettrici sono costituiti da elettrodi di ferro o acciaio, possibilmente impolarizzabili.

In un semispazio omogeneo e isotropo il campo elettrico si distribuisce attraverso linee di corrente radiali e superfici equipotenziali semisferiche aventi il loro centro nel punto sorgente in superficie (figura 5).

In un sottosuolo non omogeneo, la presenza di un corpo anomalo o di una struttura geologica conduttiva o resistiva determina la distorsione delle linee di corrente, in funzione delle caratteristiche elettriche del corpo attraversato, addensandole o diradandole a seconda che si tratti di corpi isolanti o conduttori.

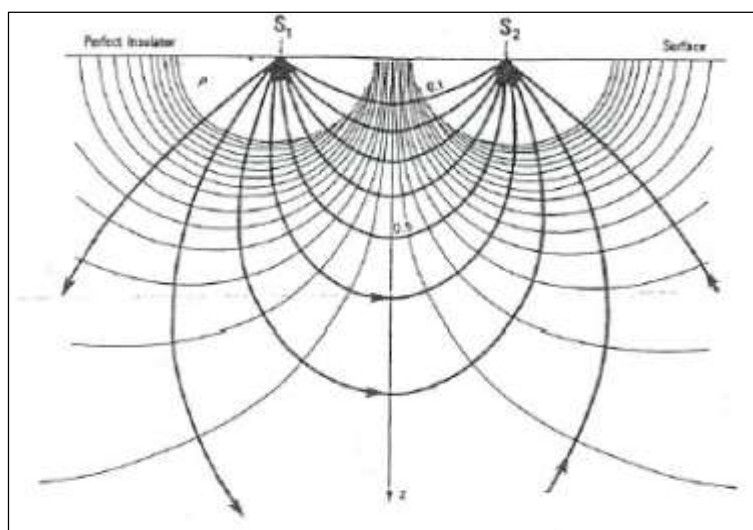


Figura 5 – Linee di corrente in un mezzo omogeneo (Carrara et alii

Per un semispazio omogeneo la resistività è determinata attraverso la relazione:

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I}$$

Dove:

I = corrente iniettata misurata in Ampere

$\Delta V$  = differenza di potenziale misurata in Volt

K = Fattore geometrico che varia a seconda del dispositivo utilizzato

$\rho$  è espresso in  $\Omega \cdot m$ .

La resistività ottenuta dalla precedente relazione rappresenta una resistività “apparente” del sottosuolo, ipotizzando un modello di sottosuolo omogeneo.

Una modellizzazione geofisica di un sottosuolo eterogeneo si ottiene attraverso un processo di “inversione” dei dati sperimentali. Invertire i dati sperimentali vuol dire ricostruire un modello significativo del sottosuolo a partire dai dati osservati.

Fra i dispositivi quadripolari collineari e simmetrici i più utilizzati sono: 1) Wenner ; 2) Schlumberger; 3) dipolo-dipolo; 4) Wenner-Schlumberger; 5) polo-dipolo; 6) polo-polo.

La scelta del dispositivo più idoneo per una prospezione geoelettrica dipende da diversi fattori, quali la profondità d’investigazione, risoluzione dei dati, sensibilità del dispositivo e il rapporto segnale/rumore.

La profondità d’investigazione è la massima profondità a cui può essere individuata una “struttura” presente nel sottosuolo ed è proporzionale alla lunghezza dello stendimento elettrico.

La risoluzione è la minima distanza a cui è possibile distinguere due oggetti o strutture poste nel sottosuolo ed è funzione della spaziatura fra gli elettrodi e del tipo di dispositivo elettrodoico utilizzato.

Il rapporto segnale/rumore costituisce una funzione molto importante nella scelta del dispositivo elettrodoico più efficace in quanto la presenza di sorgenti di disturbo, naturali o artificiali, costanti o variabili nel tempo, può inficiare il risultato interpretativo. Infatti, il riconoscimento delle fonti di disturbo è importante per evitare che esse siano interpretate erroneamente come anomalie generate dalle sorgenti che rappresentano l’oggetto della prospezione.

Un tipo di disturbo variabile nel tempo è dato da correnti telluriche naturali prodotte dalle variazioni del campo magnetico della terra o, ancor più, da fluidi sotterranei in movimento. Influiscono anche sorgenti artificiali generate da macchine elettriche con prese di terra attraverso le quali possono essere immesse correnti nel terreno.

Questo rapporto può essere incrementato aumentando l’intensità del segnale, che è inversamente proporzionale al fattore geometrico K, funzione del dispositivo elettrodoico.

Preliminarmente all’acquisizione dei dati geoelettrici, è stata condotta una fase operativa riguardante l’organizzazione e l’approntamento delle indagini in sito.

### 3.4.2 MODALITA’ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI: ATTIVITA’ DI CAMPO

Per il profilo E.R.T eseguito è stato utilizzato l’array elettrodoico Wenner-Schlumberger, previa infissione nel terreno di n. 32 elettrodi in acciaio impolarizzabile, utilizzando una spaziatura di 5 m per una lunghezza di ogni singola stesa pari a 155 m.

Il terreno è stato energizzato con l'impiego dell'energizzatore Pasi mod. P300T, avente le seguenti caratteristiche tecniche: 500 mA di corrente erogabile e 300 V di potenziale misurabile.

Brevemente viene descritta la caratteristica dell'array utilizzato.

Nel quadripolo Schlumberger, gli elettrodi di corrente AB rappresentano gli elettrodi esterni, mentre di elettrodi di potenziale MN quelli interni (figura 6).

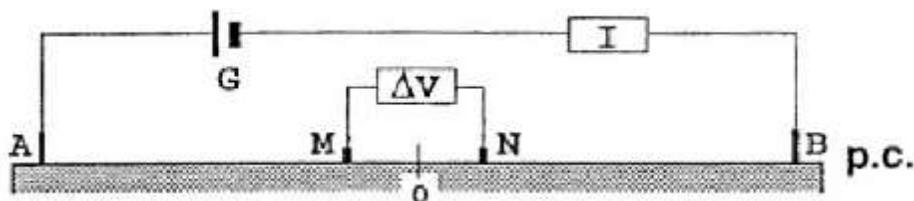


Figura 6 – Dispositivo di Schlumberger;  $MN = 1/5 AB$

Questo tipo di dispositivo è un ibrido tra il dispositivo Wenner e quello Schlumberger (Pazdirek e Blaha, 1996). Come evidenziato in precedenza, il classico dispositivo Schlumberger è utilizzato comunemente per realizzare dei sondaggi di resistività ma, con degli opportuni accorgimenti, è possibile utilizzare lo stesso dispositivo anche per effettuare delle tomografie disponendo un certo numero di elettrodi lungo uno stendimento.

La spaziatura tra gli elettrodi di potenziale rimane costante e pari ad "a" mentre la spaziatura tra gli elettrodi di corrente aumenta secondo multipli interi di "a" (figura 7). In questo modo si ottiene una maggiore copertura orizzontale e la possibilità di ottenere una distribuzione 2D della resistività elettrica nel sottosuolo. Per il dispositivo Schlumberger il fattore geometrico K è il seguente:

$$\text{con } K = \pi n (n+1) a$$

dove  $a = AM = NB$  e  $n =$

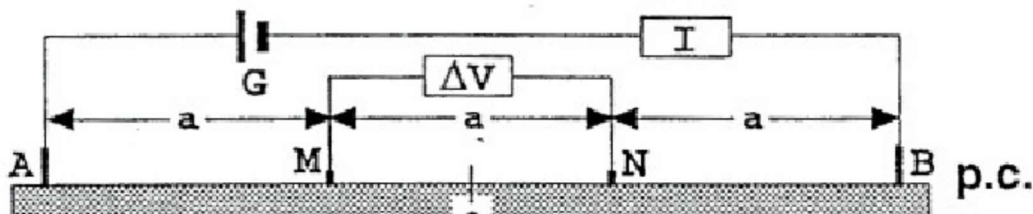


Figura 7

### 3.5 ANALISI INDAGINE GEOLETTRICA

La fase di elaborazione del profilo ERT è consistita nell'applicazione di un filtraggio dei dati, rimuovendo i valori acquisiti aventi letture di potenziale inferiori a 5 mV. Successivamente è stato generato un file di testo in modo da poter essere caricato sul software "RES2DINV", della Geotomo Software, utilizzato per ottenere il modello di inversione.

Il programma di inversione utilizza un modello 2D che consiste nel suddividere il profilo in blocchi rettangolari in cui all'interno è ipotizzato un valore di resistività costante. La disposizione dei blocchi è legata alla distribuzione dei dati nella pseudosezione (Sasaki Y., 1992).

La pseudosezione è una rappresentazione artificiosa dei dati sperimentali di resistività apparente, dalla quale non si possono ricavare direttamente forme e dimensioni dei corpi. Questo tipo di

rappresentazione fu introdotta da Hallof (1957) e modificata da Edwards (1977). L'indagine qualitativa si rende necessaria per poter impostare un modello iniziale su cui operare numericamente.

Nel processo d'inversione la distribuzione dei blocchi, la grandezza e la profondità possono essere scelte dall'operatore qualora si abbiano conoscenze a priori dei parametri geologici (profondità e dimensione degli strati).

Nel caso specifico, per ottenere un maggior dettaglio e migliore risoluzione, è stato adottato il criterio di modellizzare il sottosuolo utilizzando dei blocchi aventi dimensioni pari a metà della spaziatura elettroica.

Per ottimizzare la risposta della procedura di inversione viene adottato il metodo dei minimi quadrati con vincolo di omogeneità (modelli teorici d), basato anche sull'approssimazione quasi - newtoniana di ottimizzazione (Loke e Barker 1996, deGroot-Hedlin e Constable 1990, Sasaki 1992).

### 3.5.1 Interpretazione delle sezioni elettrostratigrafiche

Dall'analisi delle sezioni elettrostratigrafiche è stato possibile verificare la presenza di materiale eterogeneo, dal punto di vista elettrico, caratterizzato da variazioni sia verticali che orizzontali dei valori di resistività elettrica.

Il modello ricavato dai dall'esame dei profili eseguiti è sovrapponibile a quanto già determinato con l'indagine sismica e suggerisce la presenza di materiale eterogeneo con variazioni laterali e verticali di resistività. Dalla sezione allegata<sup>3</sup> è possibile verificare un modello costituito da elettrostrutture dalla forma lenticolare; ciò può essere ricondotto oltre che a variazioni litologiche anche ad un diverso grado di umidità al suolo. Infatti l'assenza di piogge e le interruzioni dell'irrigazione hanno provocato un accumulo di Sali negli strati superficiali del suolo, favorendo la cementazione delle litologie con conseguente aumento della resistività.

L'esito dell'indagine è sintetizzato in un modello a 2 unità:

- Elettrostrato conduttivo (C), con valori di resistività elettrica compresi tra 8,24 ÷ 13,50 Ω·m
- Elettrostrato mediamente conduttivo (MC), con valori di resistività elettrica compresi tra 13,51 ÷ 19,50 Ω·m.

STRATIGRAFIA ELETTRICA				
Quota [m. dal p.c.]		Litologia	Resistività Elettrica	
da	A			(ohm*m)
0.00	- 5.00	Sabbie fini	Conduttivo	8,24 ÷ 13,50
- 5,00	- 30,00	Sabbia limosa	Mediamente Conduttivo	13,51 ÷ 19,50

Tabella 2 – Stratigrafia elettrica nell'area di impostazione del campo fotovoltaico

In allegato si riportano la sezione elettrostratigrafica interpretativa<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Allegato V

<sup>4</sup> Allegato V



#### 4. 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  $\alpha$ );
- avanzamento (penetrazione);
- 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	$M \leq 10$	8 m.
Medio	DPM	$10 \leq M \leq 60$	20 ÷ 25 m.
Pesante	DPH	$40 \leq M \leq 60$	25 m.
Super Pesante	DPSH	$M \geq 60$	25 m.

Tabella 3 – 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 ( $\alpha = 60-90^\circ$ );
- diametro  $D = 35.7$  mm;
- area base cono  $A = 10$  cm<sup>2</sup>

**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  $N_{SPT}$  ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con  $N_{SPT}$ . 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.

UNITÀ LITOTECNICA	SPESSORE	PROFONDITÀ	RESISTENZA PUNTA	$N_{COLPI}$	COESIONE $C'$	ANGOLO DI ATTRITO
	(metri)	(metri)	[Kn/m <sup>3</sup> ]		[MPa]	(°)
Coltre superficiale	0,50	0,50	0,49	3	0,024	26 ÷ 28
Sabbia debil. limosa	2,60	3,10	1,47	10 ÷ 12	0,008	32 ÷ 34
Limo argilloso	5,80	8,90	2,84	8	0,11	24 ÷ 26
Argilla limosa	>1,10	10,00	4,21	21	0,18	22 ÷ 24

Tabella 4 – Correlazioni con prove penetrometriche.

## 5. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

Le esposizioni naturali e i tagli di origine antropica in corrispondenza dei canali di scolo, osservati in tutto il comprensorio, unitamente ai risultati della campagna di indagini eseguita nell'area di intervento hanno evidenziato la presenza di una sequenza sabbioso limosa, con argilla e con intercalate lenti di argillose e modesti episodi di minuto ghiaietto con abbondante sabbia. Queste lenti sono tendenzialmente non cementate.

L'analisi delle stratigrafie, ottenute da sondaggi sismici e penetrometrici eseguiti, consente di definire che i terreni in esame, nella loro variabilità granulometrica e nei rapporti geometrici verticali tra i vari strati, pur nella loro eterogeneità, 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 ghiaioso talora molto cementato. Infine al di sotto si ha un livello sabbioso a tratti molto cementato.

### 5.1 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, scarsa la presenza di sostanza organica. È considerato un suolo coesivo, poco consistente e scarsamente permeabile. Alla base dello strato aumenta la frazione sabbiosa.

Lo spessore è compreso tra 1,30 e 2,0 metri.

CARATTERISTICHE ELASTICHE E MECCANICHE DELL'UNITÀ LITOLOGICA "A"	
Spessore medio	$h = 3,1$
Peso volume medio	$\gamma_m = 16,69 \text{ KN/m}^3$
Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine)	$\varphi_m' = 26^\circ \div 28^\circ$
Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)	$c'_m = 0,024 \text{ Mpa}$
Modulo di Edometrico medio	$E_m = 11,97 \text{ MPa}$
Modulo di Poisson	$\nu = 0.43$
Modulo di Young dinamico	$E_{din} = 66,50 \text{ MPa}$
Modulo di Taglio dinamico	$G_d = 2,00 \text{ Mpa}$
Coefficiente di Winkler Verticale	$K_v = 23,94 \text{ N/cm}^3$
Coefficiente di Winkler orizzontale	$K_h = 11,97 \text{ N/cm}^3$

Tabella 5

### Unità Litotecnica "B"

È costituita da depositi sabbiosi debolmente limosi. È un suolo tendenzialmente incoerente, mediamente addensato e permeabile. Lo spessore medio è di circa 6 metri.

CARATTERISTICHE ELASTICHE E MECCANICHE DELL'UNITÀ LITOLOGICA "B"	
Spessore variabile	$h = 6,0 \text{ m}$
Peso volume medio	$\gamma_m = 17,23 \text{ KN/m}^3$
Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine)	$\varphi'_m = 32 \div 34^\circ$
Coazione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)	$c'_m = 0,008 \text{ kN/m}^2$
Modulo Edometrico medio	$E_m = 65,61 \text{ MPa}$
Modulo di Poisson	$\nu = 0.48$
Modulo di Young dinamico	$E_{din} = 86,50 \text{ MPa}$
Modulo di Taglio dinamico	$G_d = 3 \text{ Mpa}$
Coefficiente di Winkler Verticale	$K_v = 14,53 \text{ N/cm}^3$
Coefficiente di Winkler orizzontale	$K_h = 7,27 \text{ N/cm}^3$

Tabella 6

### Unità litotecnica "C"

Questa unità è formata prevalentemente da argille limose a comportamento coesivo, moderatamente consistenti, scarsamente permeabili.

CARATTERISTICHE ELASTICHE E MECCANICHE DELL'UNITÀ LITOLOGICA "C"	
Spessore variabile	$h = 18,80 \text{ m}$
Peso volume medio	$\gamma_m = 18,80 \text{ KN/m}^3$
Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine)	$\varphi'_m = 24^\circ \div 26^\circ$
Coazione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)	$c'_m = 0,11 \text{ kN/m}^2$
Modulo Edometrico medio	$E_m = 393,52 \text{ MPa}$
Modulo di Poisson	$\nu = 0.49$
Modulo di Young dinamico	$E_{din} = 281 \text{ MPa}$
Modulo di Taglio dinamico	$G_d = 9 \text{ Mpa}$
Coefficiente di Winkler Verticale	$K_v = 90,39 \text{ N/cm}^3$
Coefficiente di Winkler orizzontale	$K_h = 45,20 \text{ N/cm}^3$

Tabella 7

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

Come evidenziato in precedenza, la regione marchigiana è notoriamente un'area a intensa attività sismica, 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.

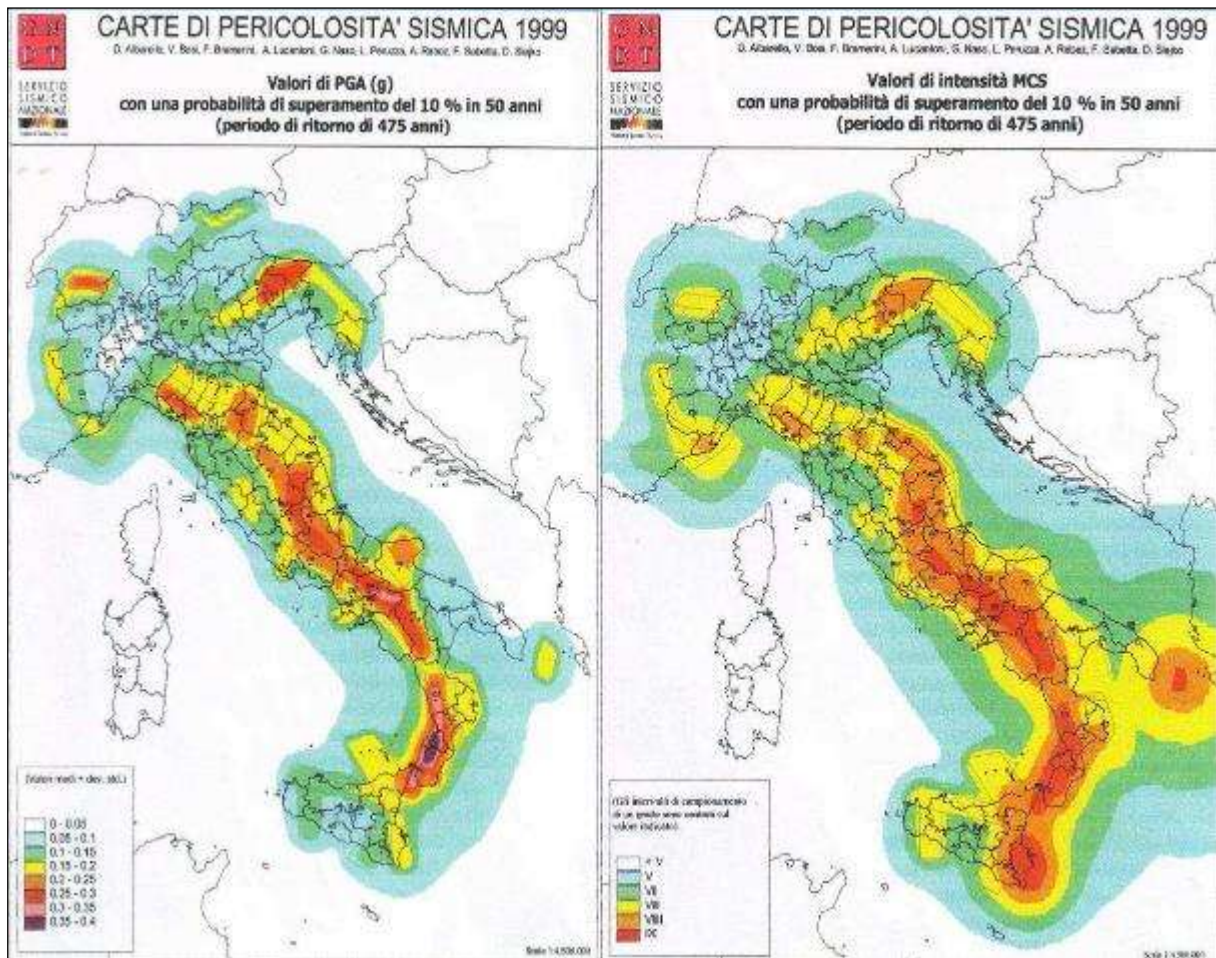


Figura 8 – Carta della pericolosità sismica (Servizio Sismico Nazionale)

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  $P_{VR}$  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 Emilia Romagna, Provincia di Ferrara, Comune di Ferrara;
- Ricerca per coordinate: Long. 11.658319; Lat. 44.714433;
- La velocità media di propagazione 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, è risultata inferiore a 180 m/sec. solo nella prova MASW 1 e nelle restanti due stendimenti le velocità non hanno superato i 185 m/sec;
- 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 "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.** (tab. 3.2.II NTC/18).

## 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	<b>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.</b>
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  $i < 15^\circ$  (max  $1^\circ$ ), sono riferibili alla categoria "T<sub>1</sub>", per cui il coefficiente di amplificazione topografica (S<sub>T</sub>) 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 <sub>T</sub>
T <sub>1</sub>	-	1,0
T <sub>2</sub>	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T <sub>3</sub>	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T <sub>4</sub>	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Tabella 9 – Tabella 3.2.III NTC 2018 – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S<sub>T</sub>

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<sub>U</sub>=1,0;

VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO C <sub>U</sub> .				
CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C <sub>U</sub>	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 10 – Tab. 2.4.II NTC 2018 – Valori del coefficiente d'uso C<sub>U</sub>.

- **Vita nominale dell'opera V<sub>N</sub>:** 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<sub>R</sub> come:

$$V_R = V_N * C_U \text{ (dove } C_U \text{ è il coefficiente d'uso);}$$

- **Probabilità di superamento nel periodo di riferimento P<sub>VR</sub>:** 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<sub>N</sub>:** 50 anni: costruzioni con livelli di prestazione ordinari.

**Coefficiente d'uso C<sub>U</sub>:** 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)	$a_g^5$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (sec)
SLE	SLO	81%	30	0,042	2,504	0,260
	SLD	63%	50	0,055	2,464	0,270
SLU	SLV	10%	475	0.155	2,590	0,270
	SLC	5%	975	0.207	2,529	0,280

Tabella 11

Nota:

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 rigidità nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.
- 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 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;
  - 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.

<sup>5</sup>  $a_g$  espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g



COEFFICIENTI SISMICI (PER STABILITÀ DI PENDII E FONDAZIONI)				
coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.0118	0.0160	0,0451	0.0603
kv	0,0059	0,0080	0,0225	0,0301
a <sub>max</sub> [m/s <sup>2</sup> ]	0,416	0,562	1,584	2,118
β	0,280	0,280	0,280	0,280

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

Dove:

β = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito = 0,2

a<sub>max</sub> = accelerazione orizzontale massima attesa al sito

a<sub>g</sub> = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido (a<sub>g</sub>/g)

g = accelerazione di gravità

S<sub>s</sub> = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,5 (SLO)-1,5 (SLD)-1,48 (SLV)-1,42 (SLC)

S<sub>t</sub> = coefficiente di amplificazione topografica = 1,0

## 7. SINTESI CONCLUSIVA

Il presente studio descrive le caratteristiche geotecniche delle litologie affioranti nell'area interessata progetto per la realizzazione di un impianto fotovoltaico a terra collegato alla RTN di potenza nominale 26,95 MWp, sito in località Marrara nel Comune di FERRARA all'interno di un'area in disponibilità della società di scopo TEP Renewables (Ferrara PV ) 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. 3 prospezioni sismiche superficiali con tecnica MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves);
- n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione;
- n. 1 prospezione E.R.T. (Electrical Resistivity Tomography);
- n. 5 Prove penetrometriche dinamiche.

La topografia della superficie del sito investigato è in ambito pianeggiante con quote medie comprese tra 4 e 5 metri sul livello del mare, con pendenze minime, mai superiori ad 1°. Qui affiorano depositi alluvionali che costituiscono una successione terrigena plio-pleistocenica.

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  $V_{s,eq} = > 245$  m/sec, spessore  $> 30$  metri.

La  $V_{s,eq}$  calcolata, per ciascun profilo di indagine MASW è risultata pari a:

- |                  |                      |               |
|------------------|----------------------|---------------|
| ➤ Profilo MASW 1 | $V_{s,eq} = 176$ m/s | Categoria "D" |
| ➤ Profilo MASW 2 | $V_{s,eq} = 185$ m/s | Categoria "C" |
| ➤ Profilo MASW 3 | $V_{s,eq} = 181$ m/s | Categoria "C" |

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  $i \leq 15^\circ$ ) con valori misurati mai superiori a 1° e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale si adotta un coefficiente topografico  $S_T = 1,0$ .

La falda freatica, rilevata direttamente nei fori dei sondaggi penetrometrici si attesta a quote prossime a -1,80 metri rispetto al piano di campagna, pertanto sarà da tenere in considerazione l'insorgenza di sovrappressioni neutre nel sistema terreno – fondazione.




febbraio 2022

dott. geol. Michele Pecorelli

# ALLEGATO I – UBICAZIONE SONDAGGI GEOFISICI



### Legenda

-  Area Totale\_43ha
-  CONNESSIONE 20,3 KM
-  Ubicazione Prove Penetrometriche



## ALLEGATO III

### PROSPEZIONI SISMICHE TIPO MASW

#### Prospezione MASW 1

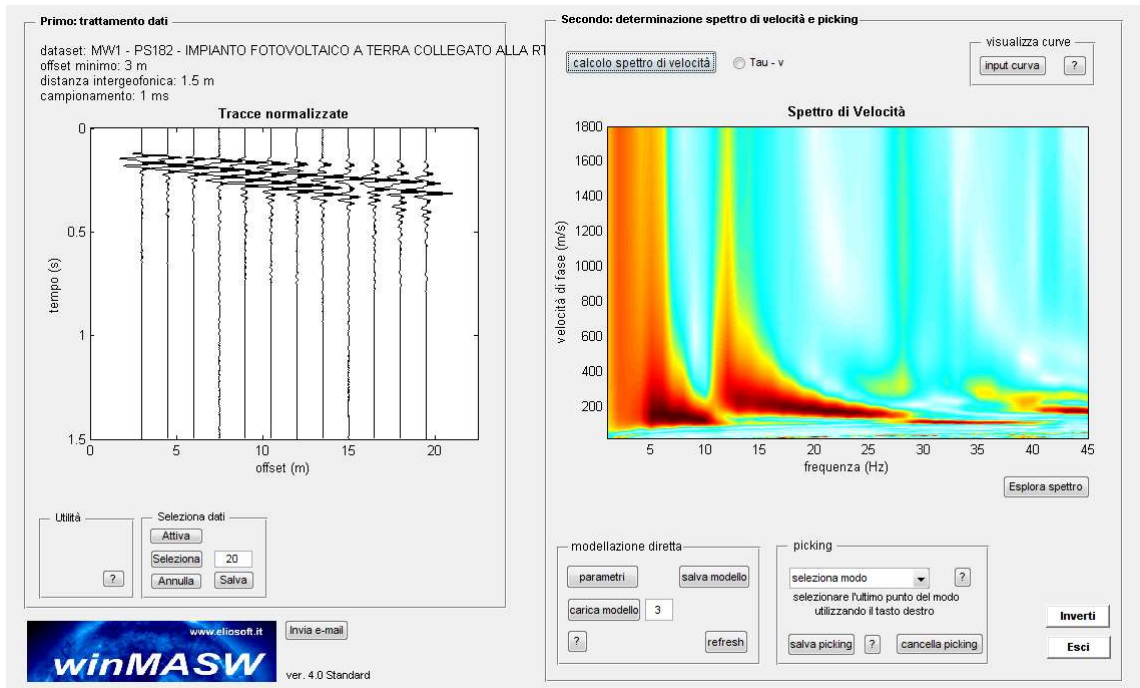
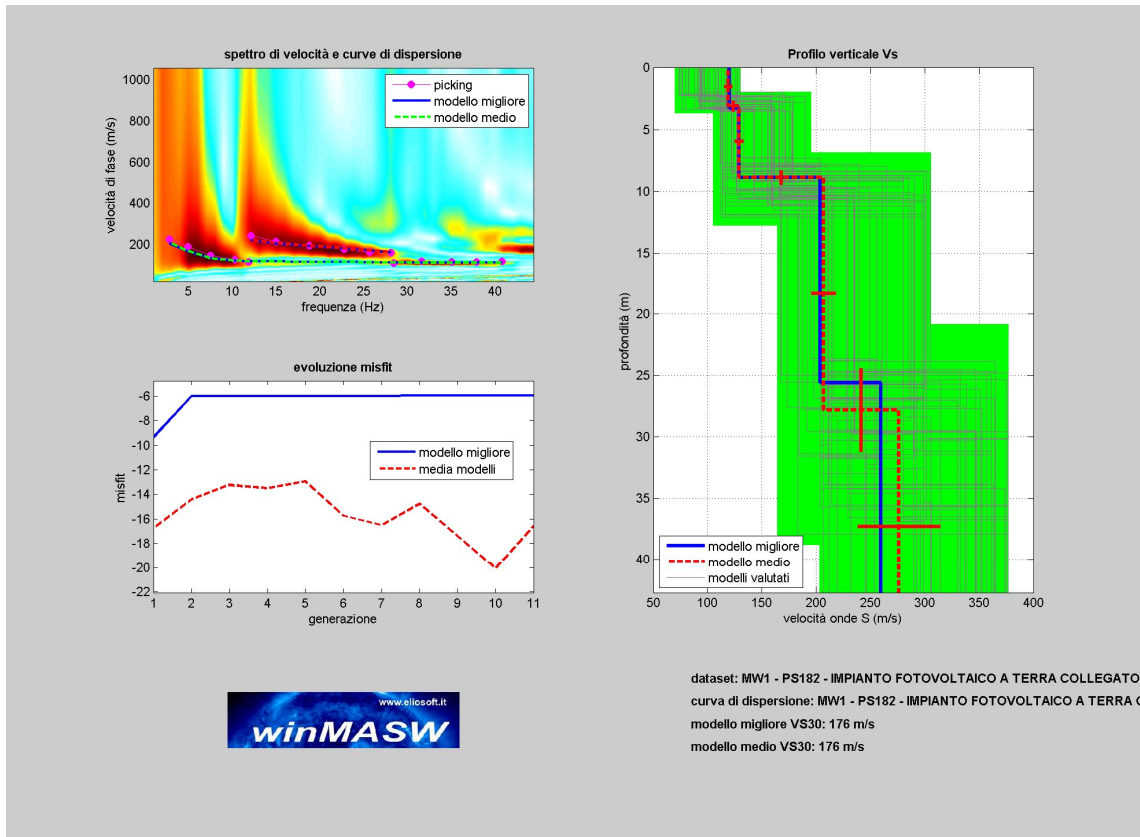
L'indagine MASW 1 ha restituito un valore di  $V_{s30} = 176$  m/s, coincidente col valore della  $V_{s,eq}$ , in quanto non è stato intercettato il bedrock (definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, con  $V_s > 800$  m/sec) ad una profondità  $H = 30.00$  m dal p.c..

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

MASW 1			
MASW	Velocità di taglio (m/sec)	Spessori (m)	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	119	3,10	0.00 – 3.10
SISMOSTRATO II	129	5.80	3.10 – 8.90
SISMOSTRATO III	207	18.90	8.90 – 27.80
SISMOSTRATO IV	276	<i>Semispazio</i>	<i>Semispazio</i>
<b><math>V_{s,eq} = 176</math> m/sec</b>			

La correlazione tra le unità sismostratigrafiche e litologie investigate è di seguito riassunta

MASW 1		
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale su sabbia limosa;	0.00 – 1.50
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;	1.50 – 6.30
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;	6.30 – 17.10
SISMOSTRATO IV	Argilla limosa con migliori proprietà tecniche;	<i>Semispazio</i>

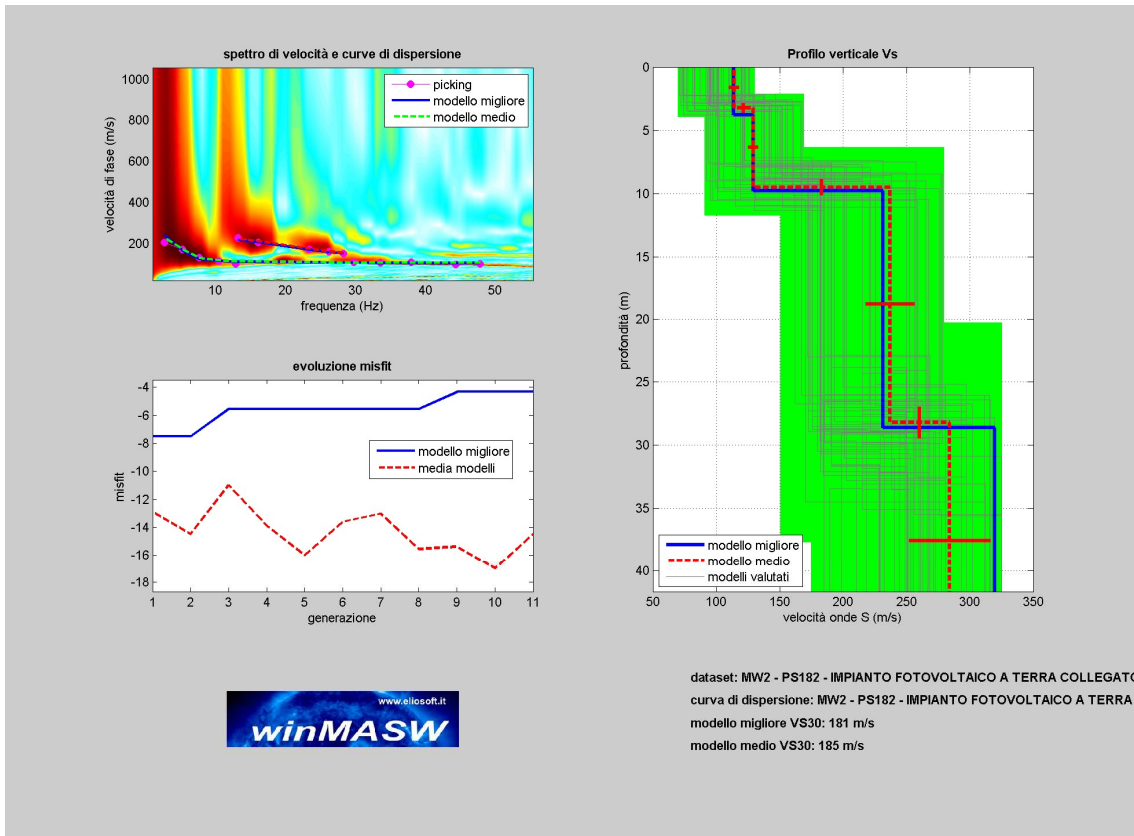


## Prospezione MASW 2

L'indagine MASW 2 ha restituito un valore di  $V_{s30} = V_{s,eq} = 185$  m/sec.

MASW 2			
MASW	Velocità di taglio (m/sec)	Spessori (m)	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	114	3.20	0.00 – 3.20
SISMOSTRATO II	129	6.30	3.20 – 9.50
SISMOSTRATO III	237	18.70	9.50 – 28.20
SISMOSTRATO IV	284	<i>Semispazio</i>	<i>Semispazio</i>
$V_{s30} = 185$ m/sec			

MASW 2		
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale su sabbia limosa;	0.00 – 3.20
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;	3.20 – 7.40
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;	7.40 – 21.80
SISMOSTRATO IV	Argilla limosa con migliori proprietà tecniche;	<i>Semispazio</i>



**Primo: trattamento dati**

dataset: MW2 - PS182 - IMPIANTO FOTOVOLTAICO A TERRA COLLEGATO ALLA RTN.dat  
 offset minimo: 3 m  
 distanza intergeofonica: 1.5 m  
 campionamento: 1 ms

**Tracce normalizzate**

tempo (s)

offset (m)

Utilità: ruota le tracce, movie, ?

Selezione dati: Attiva, Selezione (20), Annulla, Salva

Invia e-mail

**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 (3), refresh, ?

picking: secondo modo superiore, selezionare l'ultimo punto del modo utilizzando il tasto destro, salva picking, ? , cancella picking

Inverti, Esci

www.eliosoft.it  
**winMASW**  
 ver. 4.0 Standard

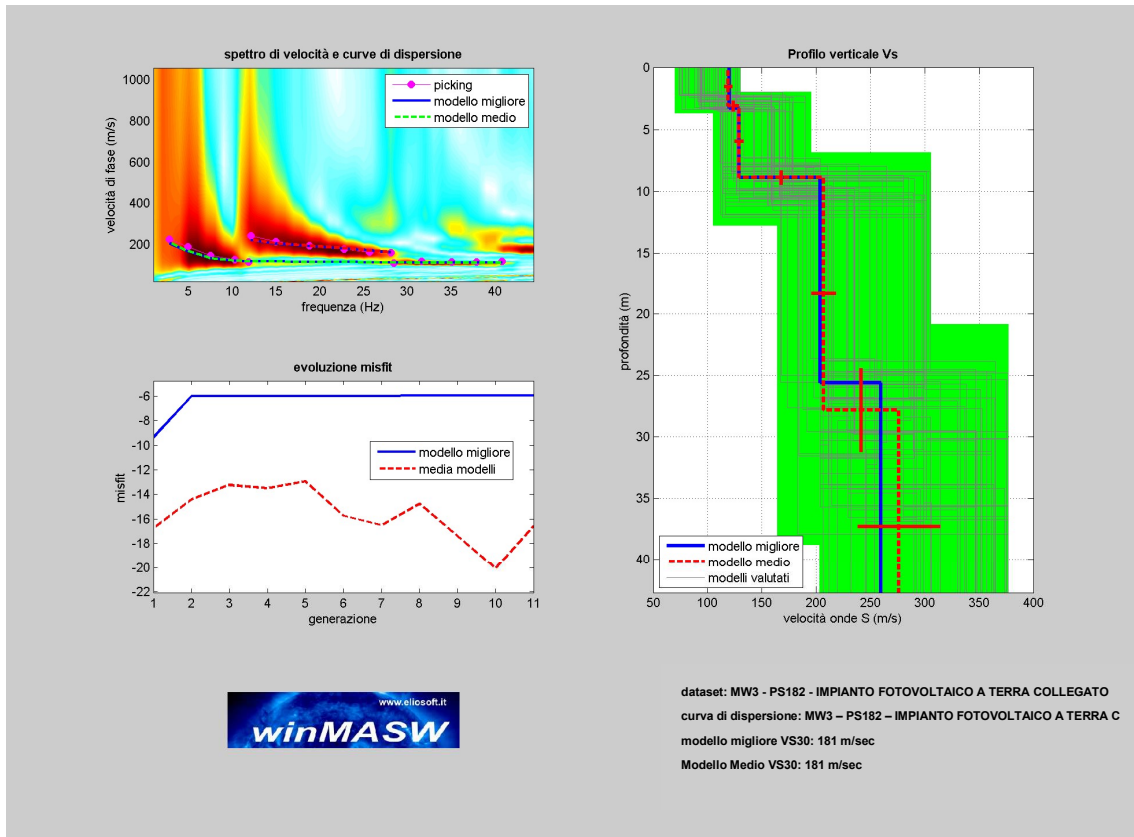


### Prospezione MASW 3

L'indagine MASW 3 ha restituito un valore di  $V_{s30} = V_{s,eq} = 181$  m/sec.

MASW 3			
MASW	Velocità di taglio (m/sec)	Spessori (m)	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	112	2.90	0.00 – 2.90
SISMOSTRATO II	126	6.20	2.90 – 9.10
SISMOSTRATO III	225	18.20	9.10 – 27.30
SISMOSTRATO IV	285	Semispazio	Semispazio
<b><math>V_{s30} = 181</math> m/sec</b>			

MASW 3		
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA	Profondità (m)
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale su sabbia limosa;	0.00 – 2.90
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;	2.90 – 9.10
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;	9.10 – 27.30
SISMOSTRATO IV	Argilla limosa con migliori proprietà tecniche;	Semispazio



**Primo: trattamento dati**

dataset: MW3 - PS182 - IMPIANTO FOTOVOLTAICO A TERRA COLLEGATO ALLA RTN.dat  
 offset minimo: 3 m  
 distanza intergeofonica: 1.5 m  
 campionamento: 1 ms

**Tracce normalizzate**

Utilità: ruota le tracce, movie, ?

Selezione dati: Attiva, Selezione (20), Annulla, Salva

**Secondo: determinazione spettro di velocità e picking**

calcolo spettro di velocità  Tau - v visualizza curve  
input curva ?

**Spettro di velocità**

Esplora spettro

modellazione diretta: parametri, salva modello, carica modello (3), refresh

picking: secondo modo superiore, selezionare l'ultimo punto del modo utilizzando il tasto destro, salva picking, cancella picking

Inverti, Esci

www.eliosoft.it

Invia e-mail

ver. 4.0 Standard

## ALLEGATO IV

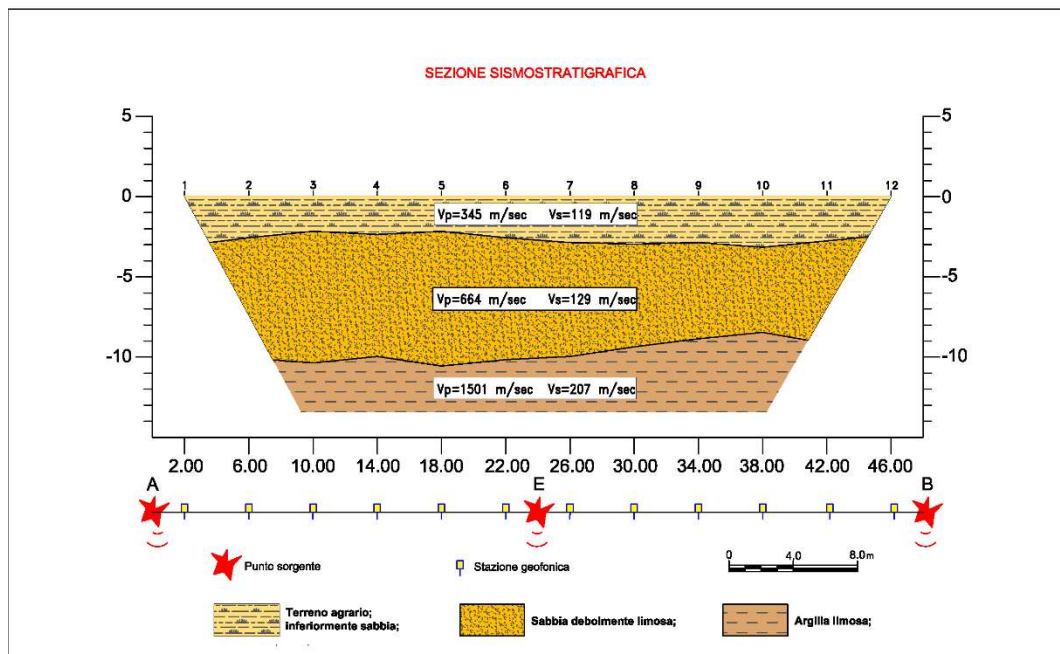
### PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

#### Prospezione Sismica 1

PROSPEZIONE SISMICA 1				
Sismica a Rifrazione	Velocità Onde P (m/sec)	Velocità Onde S (m/sec)	Profondità	
			Da (m)	a (m)
SISMOSTRATO I	345	119	0.00	2,20 - 3,20
SISMOSTRATO II	664	129	2,20 - 3,20	8,50 - 10,60
SISMOSTRATO III	1501	207	indefinito	

A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

PROSPEZIONE SISMICA 1	
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale; inferiormente sabbia;
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;



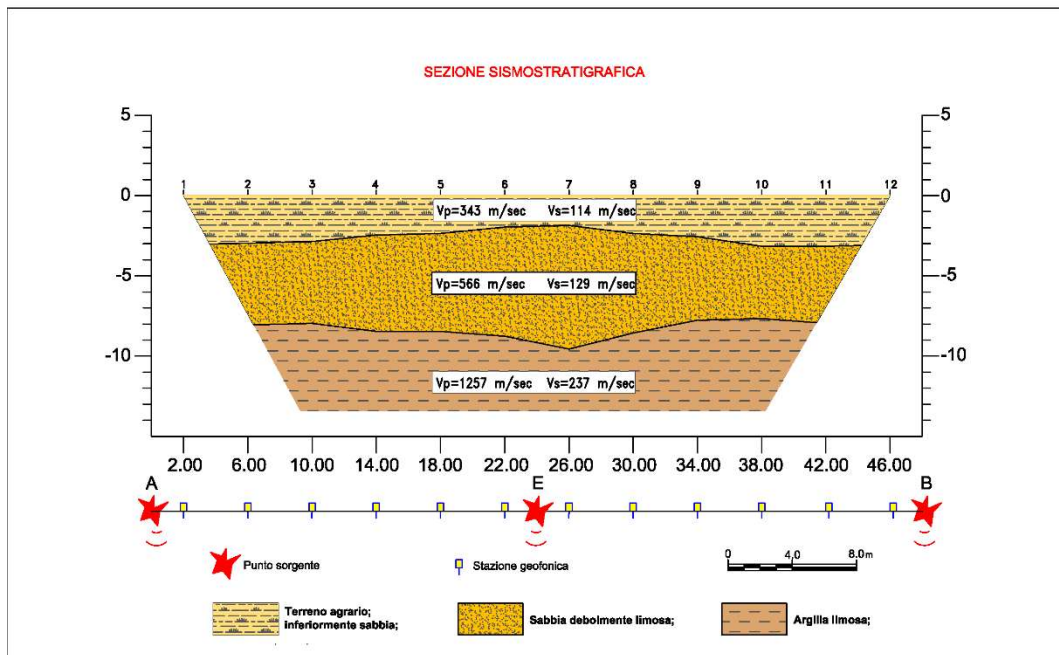
MODULI DINAMICI PROFILO 1			
	Strato 1	Strato 2	Strato 3
Velocità Onde P (m/s):	345	664	1501
Velocità Onde S (m/s):	119	129	207
Modulo di Poisson:	0.43	0.48	0.49
Peso di volume (KN/m <sup>3</sup> ):	16.69	17.33	19.00
SPESSORE MEDIO STRATO (m)	3.10	5.80	18.90
MODULO DI YOUNG DINAMICO E <sub>din</sub> (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	705	888	2525
MODULO DI TAGLIO DINAMICO G <sub>din</sub> (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	2	3	8
MODULO DI BULK (K) (Mpa o Nmm <sup>2</sup> ) (mod. di incompressibilità di volume)	171	740	4258
MODULO DI YOUNG STATICO E <sub>stat</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	85	107	304
POROSITÀ % (correlazione Rzheshvsky e Novik (1971) (%))	47.52	744.54	36.72
MODULO DI COMPRESSIONE EDOMETRICA (Kg/cm <sup>2</sup> )	203	779	4365
RIGIDITÀ SISMICA (m/sec · KN/m <sup>3</sup> )	1986	2235	3933
Frequenza dello strato	9.60	5.56	2.74
Periodo dello strato	0.10	0.180	0.365

## 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	343	114	0.00	1,90 - 3,20
SISMOSTRATO II	566	129	1,90 - 3,20	7,70 - 9,60
SISMOSTRATO III	1257	237	indefinito	

A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

PROSPEZIONE SISMICA 2	
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale su sabbia limosa;
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;



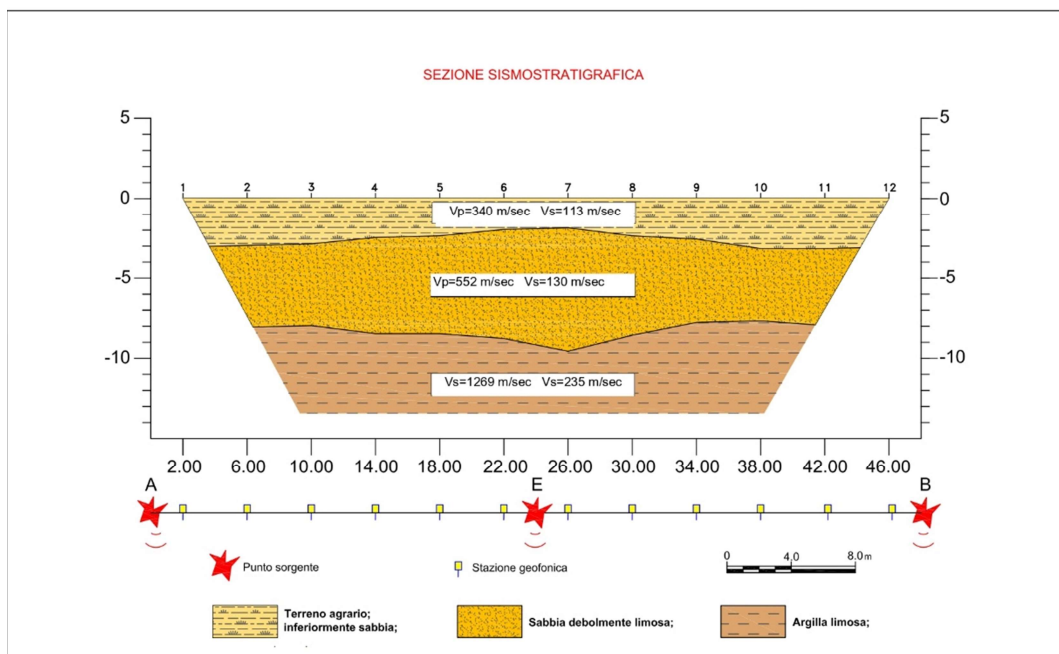
MODULI DINAMICI PROFILO 2			
	Strato 1	Strato 2	Strato 3
Velocità Onde P (m/s):	343	566	1257
Velocità Onde S (m/s):	4114	129	237
Modulo di Poisson:	0.44	0.47	0.48
Peso di volume (KN/m <sup>3</sup> ):	16.69	17.13	18.51
SPESSORE MEDIO STRATO (m)	3.20	6.30	18.70
MODULO DI YOUNG DINAMICO E <sub>din</sub> (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	64	86	314
MODULO DI TAGLIO DINAMICO G <sub>din</sub> (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	2	3	10
MODULO DI BULK (K) (Mpa o Nmm <sup>2</sup> ) (mod. di incompressibilità di volume)	171	521	2843
MODULO DI YOUNG STATICO E <sub>stat</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	78	105	386
POROSITÀ % (correlazione Rzheshvsky e Novik (1971) (%))	47.54	45.46	39.00
MODULO DI COMPRESSIONE EDOMETRICA (Kg/cm <sup>2</sup> )	200	560	2983
RIGIDITÀ SISMICA (m/sec · KN/m <sup>3</sup> )	1902	2210	4388
Frequenza dello strato	8.91	5.12	3.17
Periodo dello strato	0.11	0.195	0.316

### 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	340	113	0.00	1,80 - 3,10
SISMOSTRATO II	552	130	1,80 - 3,10	7,50 - 9,40
SISMOSTRATO III	1269	235	indefinito	

A queste si associano le unità litostratigrafiche di seguito riportate

PROSPEZIONE SISMICA 3	
SISMOSTRATI	LITOLOGIA INVESTIGATA
SISMOSTRATO I	Terreno vegetale su sabbia limosa;
SISMOSTRATO II	Sabbia debolmente limosa;
SISMOSTRATO III	Argilla limosa;



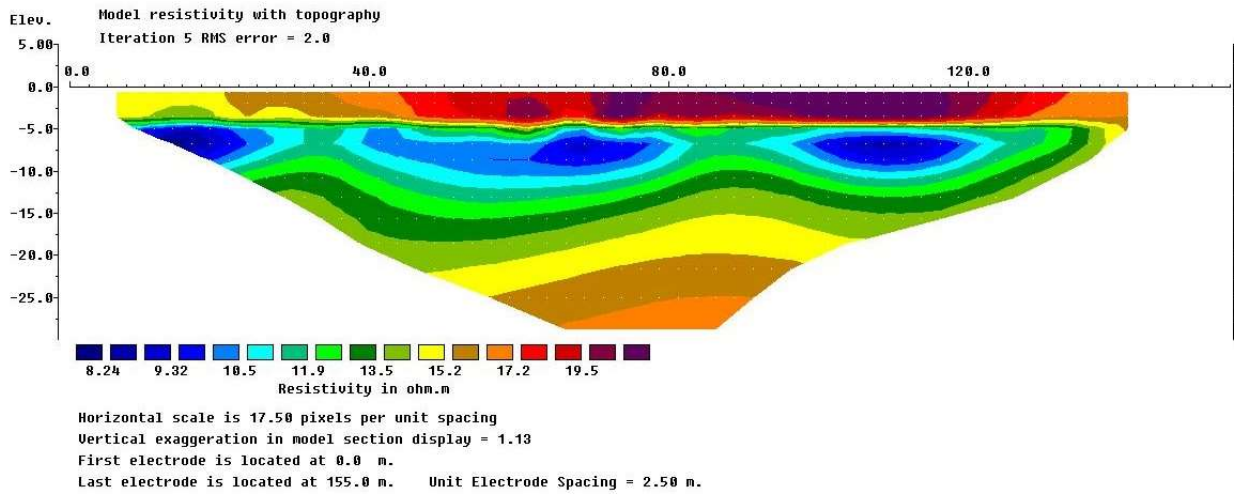
MODULI DINAMICI PROFILO 3			
	Strato 1	Strato 2	Strato 3
Velocità Onde P (m/s):	340	552	1269
Velocità Onde S (m/s):	113	130	235
Modulo di Poisson:	0.44	0.46	0.49
Peso di volume (KN/m <sup>3</sup> )	16.72	17.15	19.72
SPESSORE MEDIO STRATO (m)	1.80	3.20	20.00
MODULO DI YOUNG DINAMICO Edin (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	70	121	412
MODULO DI TAGLIO DINAMICO Gdin (Mpa o Nmm <sup>2</sup> )	2	5	14
MODULO DI BULK (K) (Mpa o Nmm <sup>2</sup> ) (mod. di incompressibilità di volume)	207	538	6410
MODULO DI YOUNG STATICO E <sub>stat</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	85	146	498
POROSITÀ % (correlazione Rzheshvsky e Novik (1971) (%))	47.59	44.31	33.20
MODULO DI COMPRESSIONE EDOMETRICA (Kg/cm <sup>2</sup> )	244	601	6724
RIGIDITÀ SISMICA (m/sec · KN/m <sup>3</sup> )	1979	2620	5102
Frequenza dello strato	20.88	11.09	3.52
Periodo dello strato	0.05	0.091	0.291





## ALLEGATO V SEZIONI ELETTROSTRATIGRAFICHE

### SEZIONE ELETTROSTRATIGRAFICA 1 (ERT1):



## ALLEGATO VI

### A. PROVE PENETROMETRICHE - VALUTAZIONI STATISTICHE E CORRELAZIONI

#### A.1 ELABORAZIONE STATISTICA

Permette l'elaborazione statistica dei dati numerici di Dynamic Probing, utilizzando nel calcolo dei valori rappresentativi dello strato considerato un valore inferiore o maggiore della media aritmetica dello strato (dato comunque maggiormente utilizzato); i valori possibili in immissione sono:

##### **Media**

Media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Media minima**

Valore statistico inferiore alla media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Massimo**

Valore massimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Minimo**

Valore minimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Scarto quadratico medio**

Valore statistico di scarto dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Media deviata**

Valore statistico di media deviata dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Media + s**

Media + scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

##### **Media - s**

Media - scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### A.2 PRESSIONE AMMISSIBILE

Pressione ammissibile specifica sull'interstrato (con effetto di riduzione per svergolamento o no) calcolata secondo le note elaborazioni proposte da Herminier, applicando un coefficiente di sicurezza (generalmente = 20-22) che corrisponde ad un coefficiente standard delle fondazioni pari a 4, con una geometria fondale standard di larghezza pari a 1 mt. ed immersione  $d = 1$  mt..

#### A.3 CORRELAZIONI GEOTECNICHE TERRENI INCOERENTI

##### **LIQUEFAZIONE**

Permette di calcolare utilizzando dati **Nspt** il potenziale di liquefazione dei suoli (prevalentemente sabbiosi).

Attraverso la relazione di SHI-MING (1982), applicabile a terreni sabbiosi, la liquefazione risulta possibile solamente se  $N_{spt}$  dello strato considerato risulta inferiore a  $N_{spt}$  critico calcolato con l'elaborazione di SHI-MING.

##### **CORREZIONE NSPT IN PRESENZA DI FALDA**

$N_{SPT}Corretto = 15 + 0.5 \times (N_{spt} - 15)$   $N_{spt}$  è il valore medio nello strato

La correzione viene applicata in presenza di falda solo se il numero di colpi è maggiore di 15 (la correzione viene eseguita se tutto lo strato è in falda).

##### **ANGOLO DI ATTRITO - GRADI**

- Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956 - Correlazione valida per terreni non molli a prof. < 5 mt.; correlazione valida per sabbie e ghiaie rappresenta valori medi. - Correlazione storica molto usata, valevole per prof. < 5 mt. per terreni sopra falda e < 8 mt. per terreni in falda (tensioni < 8-10 t/mq);

- Meyerhof 1956 - Correlazione utilizzata per terreni coesivi in genere, argillosi ed argillosi marnosi fessurati, terreni di riporto sciolti, terreno vegetale, coltri detritiche e terreni flyschoidi (da modifica sperimentale di dati).
- Sowers 1961)- Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. < 4 mt. sopra falda e < 7 mt. per terreni in falda)  $s > 5$  t/mq.
- De Mello - Correlazione valida per terreni prevalentemente sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (da modifica sperimentale di dati) con angolo di attrito < 38° .
- Malcev 1964 - Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. > 2 mt. e per valori di angolo di attrito < 38° ).
- Schmertmann 1977- Angolo di attrito (gradi) per vari tipi litologici (valori massimi). N.B. valori spesso troppo ottimistici poiché desunti da correlazioni indirette da Dr %.
- Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION) Angolo di attrito in gradi valido per sabbie - sabbie fini o limose e limi siltosi (cond. ottimali per prof. di prova > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $s > 15$  t/mq.
- Shioi-Fukuni 1982 (JAPANESE NATIONALE RAILWAY) Angolo di attrito valido per sabbie medie e grossolane fino a ghiaiose.
- Angolo di attrito in gradi (Owasaki & Iwasaki) valido per sabbie - sabbie medie e grossolane-ghiaiose (cond. ottimali per prof. > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $s > 15$  t/mq.
- Meyerhof 1965 - Correlazione valida per terreni per sabbie con % di limo < 5% a profondità < 5 mt. e con % di limo > 5% a profondità < 3 mt.
- Mitchell e Katti (1965) - Correlazione valida per sabbie e ghiaie.

#### DENSITÀ RELATIVA %

- Gibbs & Holtz (1957) correlazione valida per qualunque pressione efficace, per ghiaie Dr viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Skempton (1986) elaborazione valida per limi e sabbie e sabbie da fini a grossolane NC a qualunque pressione efficace, per ghiaie il valore di Dr % viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Meyerhof (1957).
- Schultze & Menzenbach (1961) metodo valido per qualunque valore di pressione efficace in depositi NC, per sabbie fini e ghiaiose NC ; per ghiaie il valore di Dr % viene sovrastimato, per limi sottostimato.

#### MODULO DI YOUNG E (Kg/cmq)

- Terzaghi - elaborazione valida per sabbia pulita e sabbia con ghiaia senza considerare la pressione efficace.
- Schmertmann (1978), correlazione valida per vari tipi litologici .
- Schultze-Menzenbach , correlazione valida per vari tipi litologici.
- D'Appollonia ed altri (1970) , correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia
- Bowles (1982), correlazione valida per sabbia argillosa, sabbia limosa, limo sabbioso, sabbia media, sabbia e ghiaia.

#### MODULO EDOMETRICO (Kg/cmq)

- Begemann (1974) elaborazione desunta da esperienze in Grecia, correlazione valida per limo con sabbia, sabbia e ghiaia.
- Buismann-Sanglerat, correlazione valida per sabbia e sabbia argillosa.
- Farrent (1963) valida per sabbie, talora anche per sabbie con ghiaia (da modifica sperimentale di dati).
- Menzenbach e Malcev valida per sabbia fine, sabbia ghiaiosa e sabbia e ghiaia.

#### GRADO DI ADDENSAMENTO

- Classificazione AG.I. 1977

#### PESO DI VOLUME GAMMA (t/mc)

- Meyerhof ed altri, valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

#### PESO DI VOLUME SATURO (t/mc)

- Bowles 1982, Terzaghi-Peck 1948-1967. Correlazione valida per peso specifico del materiale pari a circa  $G=2,65$  t/mc) e per peso di volume secco variabile da 1,33 (Nspt=0) a 1,99 (Nspt=95)

#### MODULO DI POISSON (MU)

- Classificazione A.G.I.

#### VELOCITÀ ONDE DI TAGLIO Vs (m/sec)

- Ohta e Goto (1978); correlazione valida per terreni limosi, sabbie e sabbie e ghiaia.

#### MODULO DI DEFORMAZIONE DI TAGLIO G (kg/cm<sup>2</sup>)

- Ohsaki & Iwasaki - G (kg/cm<sup>2</sup>) elaborazione valida per sabbie con fine plastico e sabbie pulite.
- Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982) elaborazione valida soprattutto per sabbie e per tensioni litostatiche comprese tra 0,5 - 4,0 kg/cm<sup>2</sup>.

#### MODULO DI REAZIONE DEL SOTTOFONDO Ko (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Navfac 1971-1982 - elaborazione valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

#### RESISTENZA ALLA PUNTA DEL PENETROMETRO STATICO – Qc (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Robertson 1983 Qc (Kg/cm<sup>2</sup>).

#### A.4 CORRELAZIONI GEOTECNICHE TERRENI COESIVI

##### COESIONE NON DRENATA Cu (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Benassi & Vannelli- correlazioni scaturite da esperienze ditta costruttrice Penetrometri SUNDA 1983.
- Terzaghi-Peck (1948-1967), correlazione valida per argille sabbiose-siltose NC con Nspt <8, argille limose-siltose mediamente plastiche, argille marnose alterate-fessurate.
- Terzaghi-Peck (1948). Cu min-max.
- Sanglerat , da dati Penetr. Statico per terreni coesivi saturi, tale correlazione non è valida per argille sensitive con sensitività > 5, per argille sovraconsolidate fessurate e per i limi a bassa plasticità.
- Sanglerat , (per argille limose-sabbiose poco coerenti), valori validi per resistenze penetrometriche < 10 colpi, per resistenze penetrometriche > 10 l'elaborazione valida è comunque quella delle "argille plastiche " di Sanglerat.
- (U.S.D.M.S.M.) U.S. Design Manual Soil Mechanics Coesione non drenata per argille limose e argille di bassa media ed alta plasticità, (Cu-Nspt-grado di plasticità).
- Schmertmann 1975 Cu (Kg/cm<sup>2</sup>) (valori medi), valida per argille e limi argillosi con Nc=20 e Qc/Nspt=2.
- Schmertmann 1975 Cu (Kg/cm<sup>2</sup>) (valori minimi), valida per argille NC.
- Fletcher 1965 - (Argilla di Chicago). Coesione non drenata Cu (Kg/cm<sup>2</sup>), colonna valori validi per argille a mediobassa plasticità.
- Houston (1960) - argilla di media-alta plasticità.
- Shioi-Fukuni 1982, valida per suoli poco coerenti e plastici, argilla di media-alta plasticità.
- Begemann.
- De Beer.

#### RESISTENZA ALLA PUNTA DEL PENETROMETRO STATICO - QC (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Robertson 1983 Qc (Kg/cm<sup>2</sup>).

#### MODULO EDOMETRICO-CONFINATO Mo (Eed) (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Stroud e Butler (1975) - Mo (Eed) (Kg/cm<sup>2</sup>)- per litotipi a media plasticità, valida per litotipi argillosi a medio-medio-alta plasticità - da esperienze su argille glaciali.
- Stroud e Butler (1975), per litotipi a medio-bassa plasticità (IP < 20), valida per litotipi argillosi a medio-bassa plasticità (IP < 20) - da esperienze su argille glaciali.
- Vesic (1970) correlazione valida per argille molli (valori minimi e massimi).
- Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner Modulo Confinato -Mo (Eed) (Kg/cm<sup>2</sup>) - valida per litotipi argillosi e limosi-argillosi (rapporto Qc/Nspt=1.5-2.0).
- Buisman- Sanglerat, valida per argille compatte (Nspt < 30) medie e molli (Nspt < 4) e argille sabbiose (Nspt=6-12).

#### MODULO DI YOUNG E (Kg/cm<sup>2</sup>)

- Schultze-Menzenbach - Ey (Kg/cm<sup>2</sup>) (Min. e Max.), correlazione valida per limi coerenti e limi argillosi con I.P. > 15
- D'Appollonia ed altri (1983) - E Young (Kg/cm<sup>2</sup>) correlazione valida per argille sature - argille fessurate.

#### STATO DI CONSISTENZA

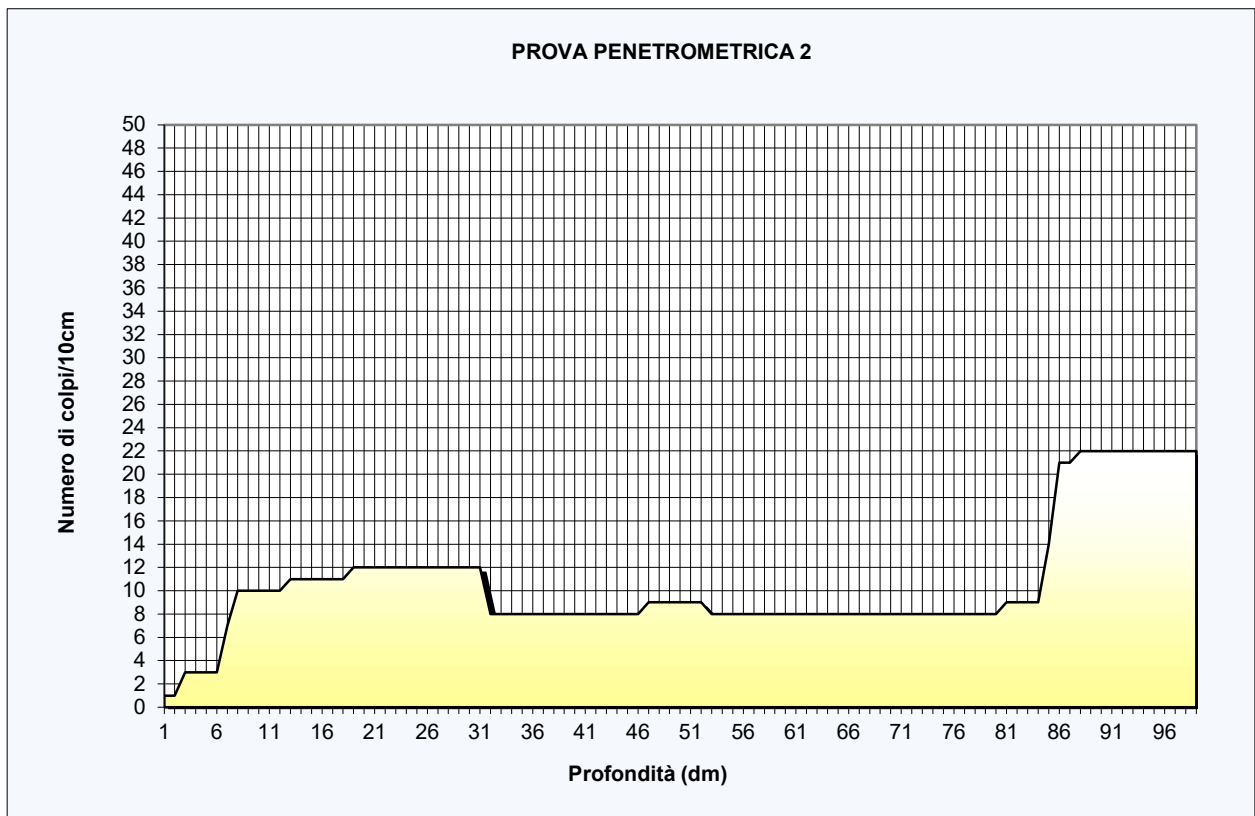
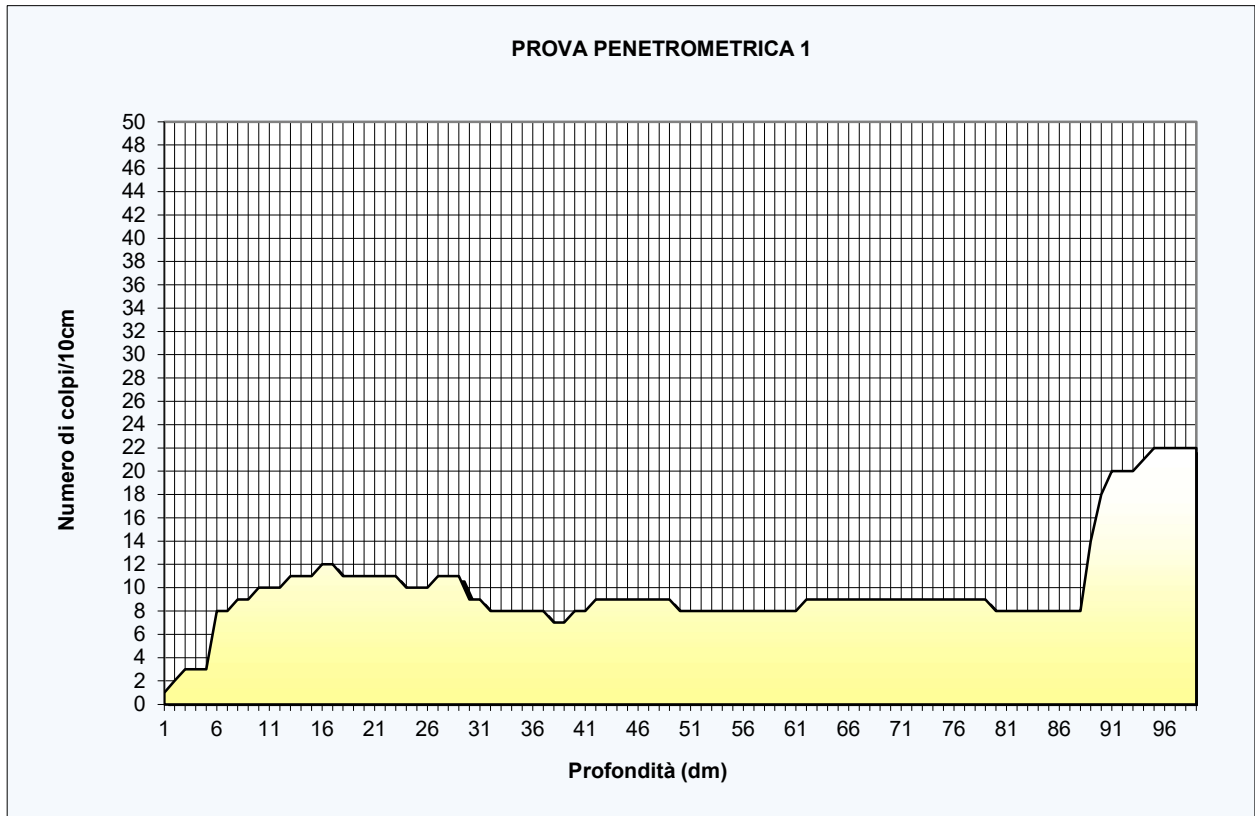
- Classificazione A.G.I. 1977

#### PESO DI VOLUME GAMMA (t/mc)

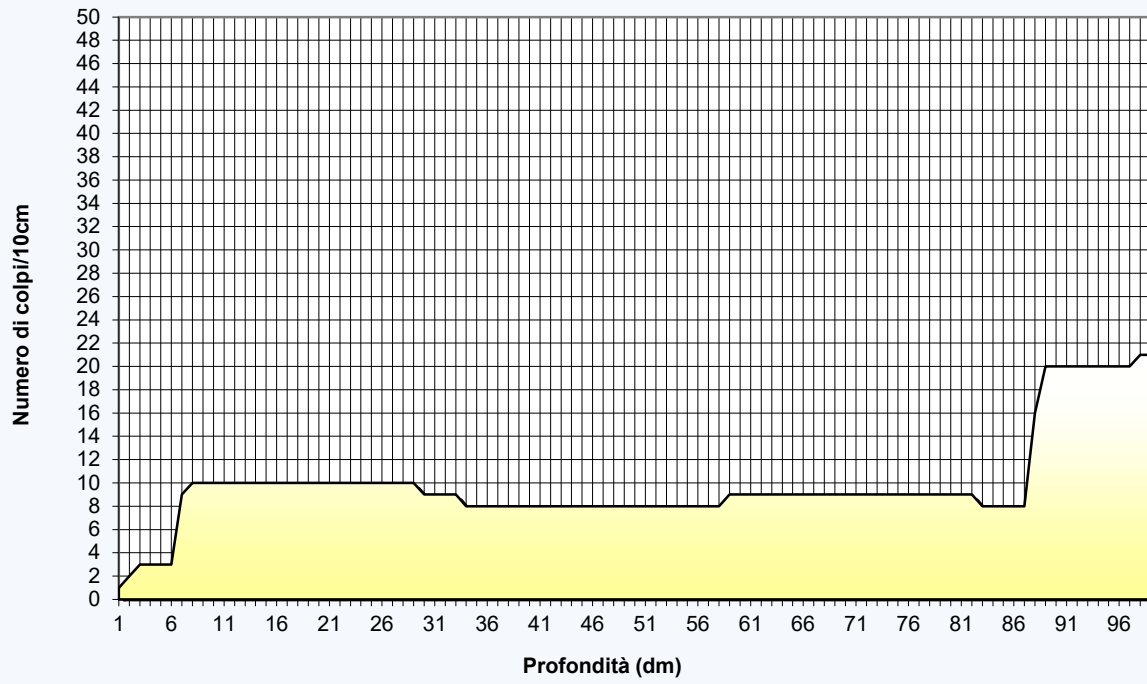
- Meyerhof ed altri, valida per argille, argille sabbiose e limose prevalentemente coerenti.

#### PESO DI VOLUME SATURO (t/mc)-

- Correlazione Bowles (1982), Terzaghi-Peck (1948-1967), valida per condizioni specifiche:  
peso specifico del materiale pari a circa  $G=2,70$  (t/mc) e per indici dei vuoti variabili da 1,833 (Nspt=0) a 0,545 (Nspt=28)



### PROVA PENETROMETRICA 3



### PROVA PENETROMETRICA 4

