



SETTEMBRE 2021

## TE GREEN DEV 2

IMPIANTO INTEGRATO AGRIVOLTAICO  
COLLEGATO ALLA RTN  
POTENZA NOMINALE 57,44 MW

COMUNE DI STORNARA (FG)

Montagna

## PROGETTO DEFINITIVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO

Relazione geologica

**Progettisti (o coordinamento)**

Geol. Piero Simone n. ordine Geol. Lombardia 1030

**Codice elaborato**

*2748\_4469\_ST\_PD\_R04\_Rev0\_Relazione geotecnica*



### Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2748_4469_ST_PD_R04_Rev0_Relazione geotecnica	09/2021	Prima emissione	G.d.L	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	Tecnico competente in acustica ambientale n. 71
Daniele Crespi	Coordinamento SIA	
Marco Corrà	Architetto	
Francesca Jaspardo	Esperto Ambientale	
Massimo Busnelli	Geologo	
Mauro Aires	Ingegnere strutturista	Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9583J
Elena Comi	Biologo	Ordine Nazionale dei Biologi n. 60746
Fabio Lassini	Ingegnere	Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano n. 29719
Piero Simone	Geologo	Ordine dei Geologi della Lombardia n. 1030

**Montana S.p.A.**

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano  
 C. F. e P. IVA 10414270156 - Cap. Soc. 600.000,00 €  
 Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

[www.montanambiente.com](http://www.montanambiente.com)





Sergio Alifano	Architetto	
Marianna Denora	Architetto	Ordine degli Architetti della Provincia di Bari, Sez. A n. 2521
Andrea Fronteddu	Ingegnere Elettrico	Ordine degli Ingegneri di Cagliari n. 8788
Matteo Lana	Ingegnere	
Vincenzo Gionti	Ingegnere	
Nazzario D'Errico	Agronomo	Ordine professionale Degli Agronomi di Foggia n. 382
Lorenzo Griso	Geologo	
Giovanni Saraceno	3E Ingegneria Srl	Ordine degli Ingegneri della Provincia di Reggio Calabria al n. 1629
Antonio Bruscella	Archeologo	Elenco dei professionisti abilitati alla redazione del documento di valutazione archeologica n. 4124

### Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano  
C. F. e P. IVA 10414270156 - Cap. Soc. 600.000,00 €  
Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

[www.montanambiente.com](http://www.montanambiente.com)





**INDICE**

1. GENERALITÀ .....	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
1.1 LOCALIZZAZIONE IMPIANTO .....	5
2. PREMessa .....	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
3. MEZZI DI INDAGINE.....	8
4. INDAGINI GEOGNOSTICHE .....	9
4.1 STRATIGRAFIA DEL SOTTOSUOLO .....	12
4.2 PARAMETRI MECCANICI DEL TERRENO.....	13
4.3 CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO.....	14
5. INDAGINE GEOFISICA .....	15
6. CONCLUSIONI .....	31



## 1. PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la determinazione delle caratteristiche geomeccaniche e sismiche dell'area interessata dal progetto per la realizzazione di un Impianto fotovoltaico collegato alla RTN – Potenza nominale 57,44 MWp. L'ubicazione dell'intervento è localizzata in località La Contessa nell'agro di Stornara (FG), mentre la linea di connessione alla stazione elettrica si sviluppa nel territorio a N-E del comune di Stornara stessa.

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 che ha previsto l'esecuzione di:

- n. 1 stendimenti sismici a rifrazione;
- n. 1 prospezioni sismiche superficiali con tecnica MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves);
- n. 1 prove penetrometriche dinamiche.

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 LOCALIZZAZIONE IMPIANTO

Il progetto in esame è ubicato nel territorio comunale di Stornara, Provincia di Foggia, a circa 2,5 km a Est rispetto al centro abitato. L'area è compresa tra la Strada Provinciale 881 a nord, la Strada Provinciale (SP) 84 a est, il Trattarello Regio Ponte di Bovino a sud ed il centro abitato di Stornara a ovest.

L'area di intervento risulta essere pari a circa 72.5 ha, di cui circa 67 ha recintati per l'installazione dell'impianto. Il parco sarà diviso in due sezioni, sezione A e sezione B: la prima corrispondente ad un'area cintata di circa 23.4 ha e la seconda corrispondente ad un'area cintata di circa 43.5 ha. Le due aree sono separate da una strada vicinale che serve a collegare alcuni edifici che rimangono anch'esse esterne alla recinzione.

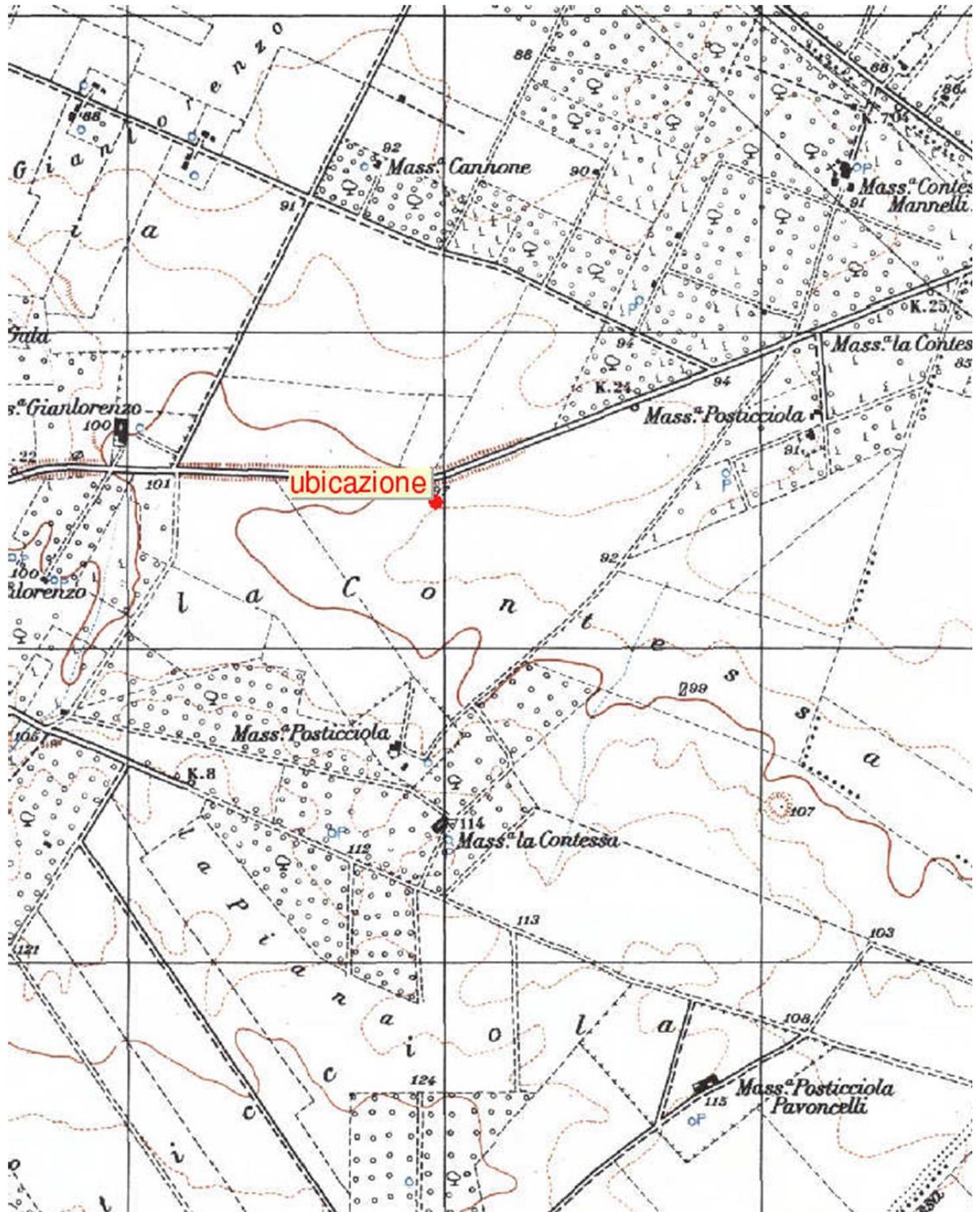
Tali aree, nel vigente strumento urbanistico, sono destinate attualmente a zone di uso agricolo (zone E) come da Certificato di Destinazione Urbanistico.



La connessione dell'impianto è costituita tramite cavo interrato in AT, che sarà steso dalla cabina di trasformazione interna al parco fino sottostazione elettrica della RTN 150 kV è ubicato a circa 2 km a NNE di Stornara. Il percorso del cavidotto avrà una lunghezza di circa 6 km e sarà posizionato ai margini della viabilità pubblica esistente (S.P.88, strada comunale Contessa e strada vicinale Schiavone).



Figura 1.1: Localizzazione intervento (rosso=area parco; ciano=cavidotto; magenta SSE)





---

## **2. MEZZI DI INDAGINE**

La metodologia usata per la buona riuscita dello studio, si è articolata in più fasi:

1. acquisizione dati dalla letteratura a disposizione;
2. approfondimento mediante un dettagliato rilevamento geomorfologico di superficie;
3. prove dirette effettuate tramite l'esecuzione di prova penetrometrica dinamica;
4. prova geosismica in sito;
5. analisi ed elaborazione dei dati ottenuti.



### 3. INDAGINI GEOGNOSTICHE

La zona oggetto di studio è ubicata a pochi chilometri dall'area urbana di Stornara in un'area caratterizzata da una morfologia leggermente degradante, con quote variabili da circa 99,00 a circa 95,00 metri sul livello del mare.

L'area di studio e le zone limitrofe non sono interessate da fenomeni di subsidenza per estrazione di liquidi dal sottosuolo.

Pertanto allo stato attuale non vi sono, neanche nelle immediate vicinanze scarpate naturali, né tagli artificiali e tutta la zona risulta completamente libera da segni di dissesto in atto.

Un attento rilevamento dell'intera area di interesse non ha evidenziato in superficie segni che lasciano presagire movimenti in atto, la realizzazione dell'opera non influirà sull'ottimo equilibrio del modesto versante.

Attualmente l'area di intervento, ad eccezione di modesti fabbricati presenti, risulta completamente libera da strutture di qualsiasi tipo. I fabbricati presenti nell'area da diversi anni non presentano nessun segno o lesione motivata da un movimento del terreno in atto.

Non sono state ritrovate faglie né altre discontinuità superficiali.

Le indagini in sito non hanno evidenziato anomalie che potrebbero interrompere l'equilibrio statico del versante, ossia non si sono riscontrati piani di scorrimento, in quanto il sottosuolo, fino a profondità significative, come si evince dalla prova sismica

In sito, risulta decisamente omogeneo, né sono state rinvenute falde freatiche continue e superficiali, ma solo falde sospese decisamente delimitate arealmente, che con una loro eventuale risalita di quota rispetto al piano campagna avrebbero compromesso il buon equilibrio del versante. Pertanto l'assenza di piani di scorrimento superficiali, spesso dovuti a passaggio brusco tra due unità litologiche con caratteristiche meccaniche molto diverse e l'assenza di falde freatiche superficiali di tipo continuo, contribuiscono al buon equilibrio del pur modestissimo ed impercettibile versante.

Le opere in progetto non prevedono sbancamenti significativi, in quanto le opere da realizzare non prevedono fondazioni di grosse dimensioni, né la necessità di rimodellare la morfologia attuale.

Considerato i modesti manufatti da realizzare, la natura dei litotipi interessati dalle loro fondazioni, si è proceduto a caratterizzare gli stessi dal punto di vista litologico e geomeccanico, avvalendoci di prova diretta effettuata in sito, tramite l'esecuzione di n° 1 penetrometrica dinamica.

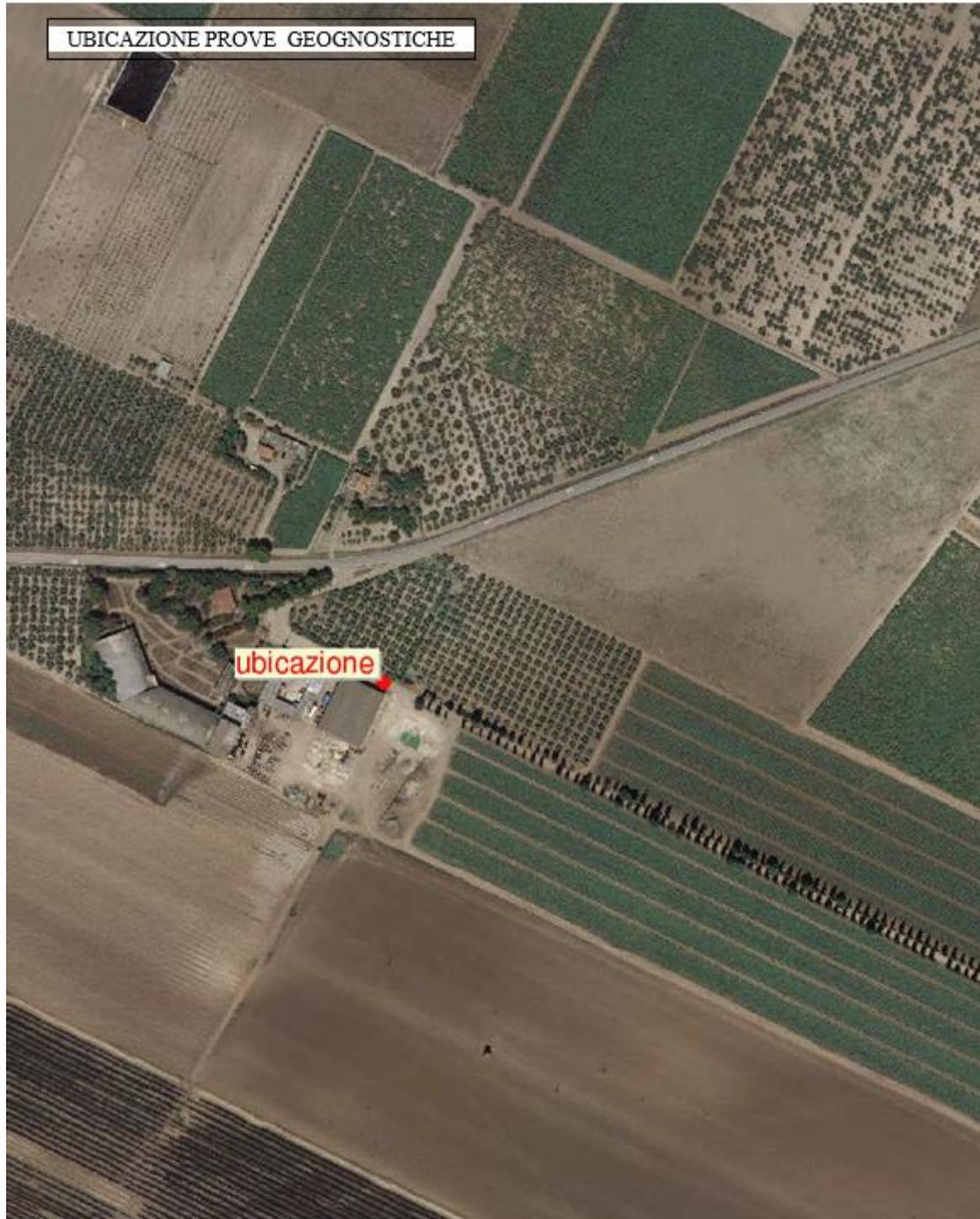
I risultati che scaturiscono da tali tipi di prova vengono generalmente diagrammate prendendo in considerazione il numero di colpi di maglio del peso di 20 chilogrammi necessari all'infissione di dieci centimetri di asta.

Le prove dinamiche, diversamente dalle S.P.T., sono continue e quindi forniscono una visione più completa della consistenza dei materiali dal piano campagna fino alla profondità di investigazione.

Le numerose esperienze condotte con il penetrometro dinamico e le prove S.P.T. evidenziano specifiche correlazioni, per cui è possibile utilizzare tali prove utilizzando la vasta bibliografia esistente sulle S.P.T.

Le prove sono state spinte fino alla profondità di circa 10,00 metri dal piano campagna.

La prova penetrometrica e l'indagine sismica in sito ha evidenziato un sottosuolo decisamente omogeneo sia dal punto di vista litologico sia dal punto di vista meccanico. La falda di tipo freatico, risulta costituita da tante falde sospese, del tipo a cucchiaio, non collegate tra loro. Tali caratteristiche dimostrano che la stabilità dell'area è e resterà di livello elevato anche dopo il modesto intervento previsto.



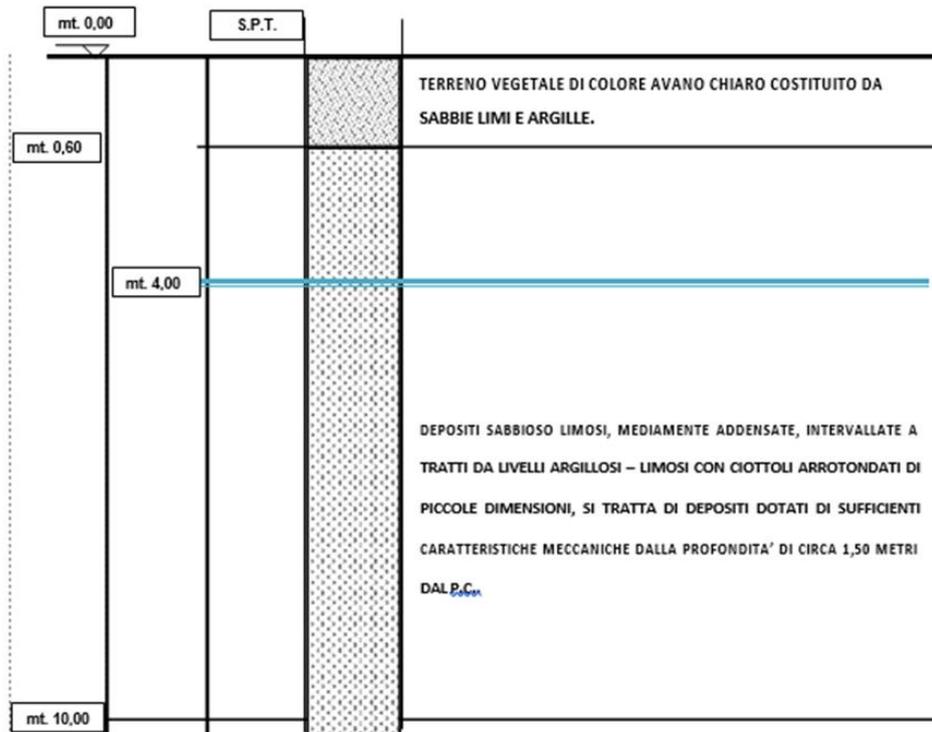




### 3.1 STRATIGRAFIA DEL SOTTOSUOLO

PROFONDITÀ (m)	DESCRIZIONE FORMAZIONE
0,00 – 0,60	TERRENO VEGETALE DI COLORE AVANO CHIARO COSTITUITO DA SABBIE LIMI E ARGILLE.
0,60 – 20,00	DEPOSITI SABBIOSO LIMOSI, MEDIAMENTE ADDENSATI, INTERVALLATE A TRATTI DA LIVELLI ARGILLOSI – LIMOSI CON CIOTTOLI ARROTONDATI DI PICCOLE DIMENSIONI, SI TRATTA DI DEPOSITI DOTATI DI SUFFICIENTI CARATTERISTICHE MECCANICHE DALLA PROFONDITA' DI CIRCA 1,00 METRO DAL P.C..
20,00 – 30,00	CLASTI ARROTONDATI IMMERSI IN MATRICE SABBIOSA DI COLORE GIALLASTRO. LA STRATIFICAZIONE, POCO EVIDENTE, RISULTA DI TIPO PIANO PARALLELA.
30,00 – OLTRE	ARGILLE DI COLORE GRIGIO AZZURRE COMPLETAMENTE IMPERMEABILI, DOTATE DI BUONE CARATTERISTICHE MECCANICHE.

### Schema Stratigrafico





### 3.2 PARAMETRI MECCANICI DEL TERRENO

Dall'analisi della prova penetrometrica dinamica eseguita sono stati individuati attraverso correlazioni e diagrammi presenti in bibliografia i parametri geotecnici da prendere a base per il calcolo della capacità portante.

I principali parametri meccanici medi dello strato di terreno posto tra 0,60 e 1,00 metri dal piano campagna sono così definiti:

$\gamma$	<b>1,75 t/mc</b>	<b>Peso di volume</b>
$\varnothing$	<b>20°</b>	<b>Angolo di attrito</b>
<b>Cu</b>	<b>20,00 KPa</b>	<b>Coesione non drenata</b>
<i>Kz</i>	<b>2,50 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<i>Kx</i>	<b>1,00 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<i>Ky</i>	<b>1,00 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<b>C</b>	<b>5,00 KPa</b>	<b>Coesione</b>
<i>E</i>	<b>3 N/mm<sup>2</sup></b>	<i>Modulo edometrico</i>

I principali parametri meccanici medi dello strato di terreno posto tra 1,00 e 10,00 metri dal piano campagna sono così definiti:

$\gamma$	<b>1,85 t/mc</b>	<b>Peso di volume</b>
$\varnothing$	<b>25°</b>	<b>Angolo di attrito</b>
<b>Cu</b>	<b>20,00 KPa</b>	<b>Coesione non drenata</b>
<b>KZ</b>	<b>4,00 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<i>Kx</i>	<b>1,00 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<i>Ky</i>	<b>1,00 kg/cmc</b>	<b>Coefficiente di sottofondo</b>
<b>Falda</b>	<i>Oltre 4,00 mt. p.c.</i>	<i>Profondità falda</i>
<i>E</i>	<b>5 N/mm<sup>2</sup></b>	<i>Modulo edometrico</i>
<b>C</b>	<b>5,00 KPa</b>	<b>Coesione</b>



### 3.3 CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

I depositi interessati dalle fondazioni, mostrano globalmente, nonostante la presenza di una piccola frazione limo-argillosa, prevalenti caratteristiche granulari, perciò ad essi può essere associato un comportamento semifrizonale, tale comunque da far ritenere i cedimenti sotto carico di tipo immediato e quindi estinguibili in gran parte entro i tempi di realizzazione dell'opera.

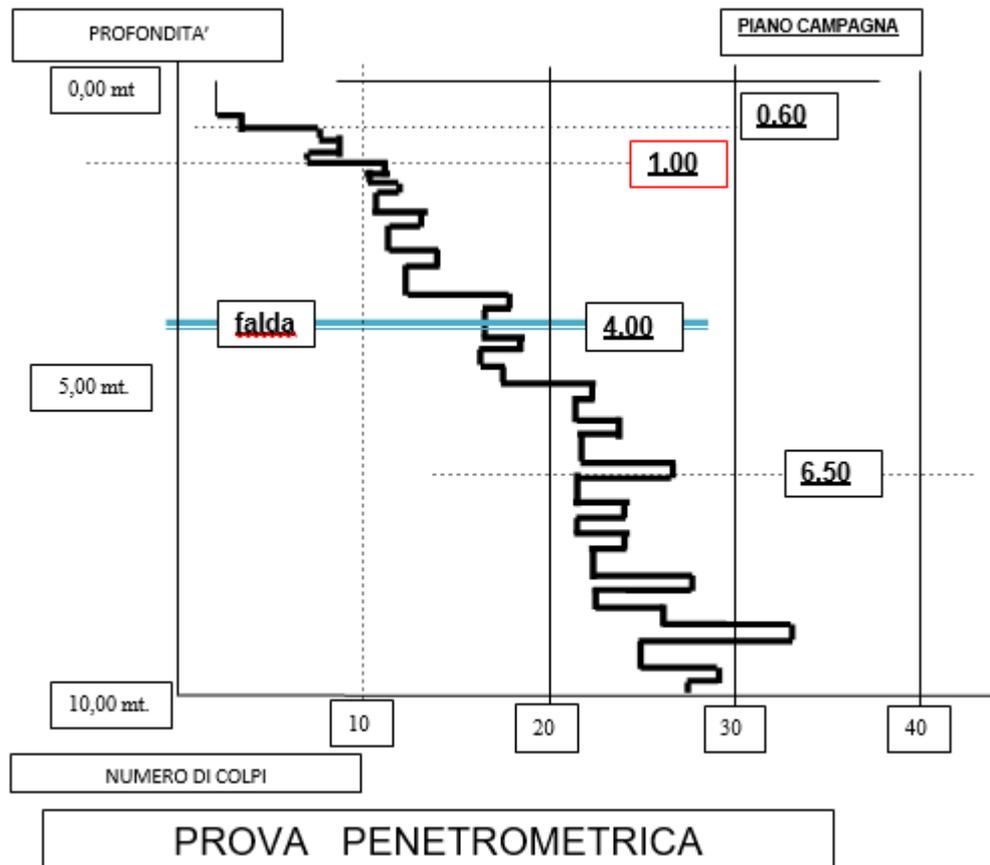
Il terreno di fondazione non dovrà subire, dopo l'avvenuta operazione di scavo, movimenti o rimaneggiamenti.

La presenza di eventuali ristagni di acqua dovuta a precipitazioni nell'intervallo tra lo scavo e la posa in opera delle fondazioni, dovrà immediatamente essere eliminata.

La possibile presenza di sacche di materiali sciolti, dovuti a irregolarità della superficie di fondazione, dovrà essere immediatamente asportata e sostituita con getto di magrone, eliminando così aree costituite da materiali più compressibili, causa di possibili cedimenti differenziati.

Se per caso durante i lavori, data la scarsa omogeneità litologica e meccanica in direzione orizzontale, si incontrassero situazioni diverse (litologie, proprietà

meccaniche e posizione falda) da quelle prese in considerazione per il calcolo della portanza, il progettista stesso deve riconsiderare i valori che determinano il carico ammissibile del terreno e rielaborarli in modo che soddisfino le condizioni reali di interazione struttura terreno.



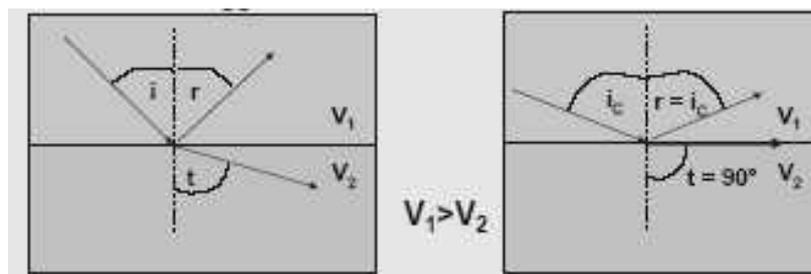
## 4. INDAGINE GEOFISICA

L'indagine consiste in uno stendimento di sismica a rifrazione di lunghezza pari a 23,0 m (Base 1) lungo il quale sono stati disposti e collegati in serie 24 geofoni monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali, prodotte da una specifica sorgente. La distanza intergeofonica è stata fissata a 1,0 m (Base 1) per un totale di 24 geofoni collegati in serie attraverso un cavo in grado di convertire il segnale elettrico proveniente dai geofoni in segnale digitale già dal primo metro: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing. Sono stati utilizzati 2 punti di energizzazione disposti lungo lo stendimento:

- • 2 estreme a 1 m dai geofoni 1° e 24°

L'attrezzatura utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra metallica posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni a componente verticale di frequenza propria pari rispettivamente a 4,5 Hz;
- sistema di acquisizione dati: sismografo digitale AMBROGEO ECHO 12-24 2002, ad incremento di segnale;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.



### Cenni teorici del metodo

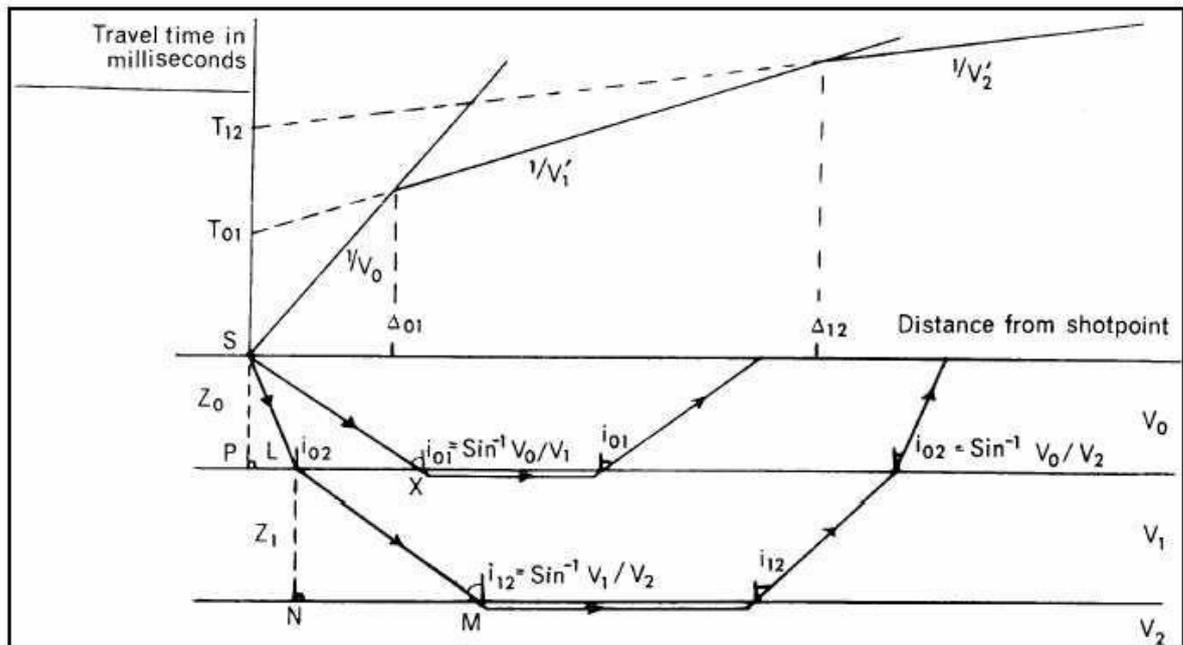
Le indagini indirette ed in particolare la metodologia a rifrazione permette la ricostruzione areale delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, la profondità del substrato (entro i limiti di penetrazione del metodo), la verifica di eventuali discontinuità laterali nonché di determinare le caratteristiche fisico – meccaniche dei materiali attraverso la determinazione dei moduli elastici dinamici.

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o birifratte (head wave):



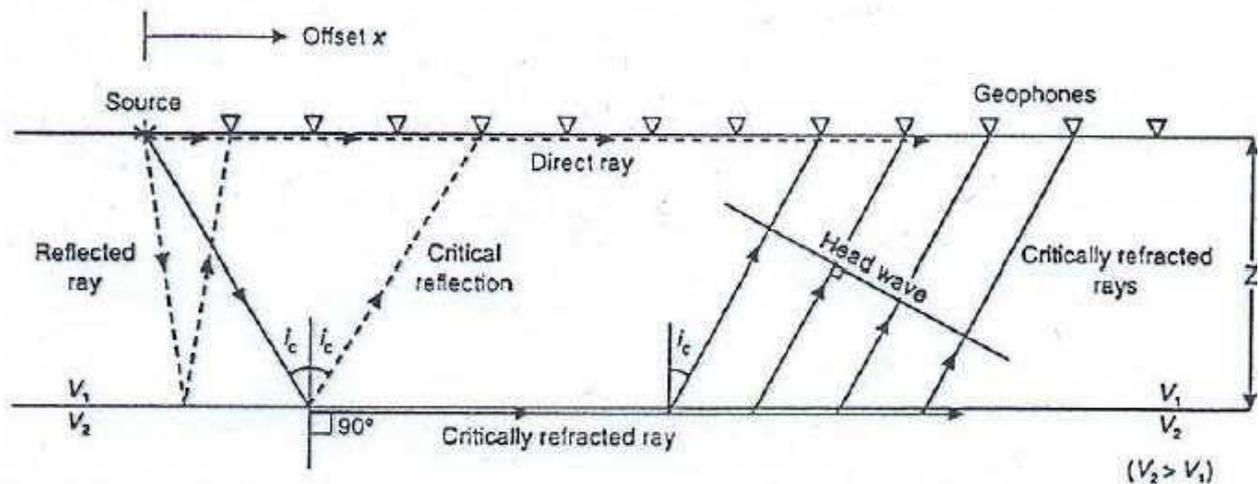
le onde analizzate sono quelle birifratte cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

Disponendo una serie di ricevitori lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme l'onda riflessa arriverà sempre dopo le altre, mentre fino ad una certa distanza dalla sorgente arriverà prima l'onda diretta poi, quando l'onda bi-rifratta avrà percorso sufficiente distanza alla velocità  $V_2$ , essa arriverà prima della diretta (come riportato nella figura seguente).



Se riportiamo in un semplice grafico x-y per ogni distanza di ciascun ricevitore il tempo di arrivo del primo impulso letto sui sismogrammi i punti si dispongono in una serie di allineamenti, di cui il primo passante per l'origine: ciascuna linea è detta dromocrona ed è rappresentativa della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo posto al di sopra di un rifratte (una superficie di separazione più o meno netta tra due materiali a comportamento elastico diverso).

Di seguito a titolo esemplificativo si riportano le dromocrone relative ad un modello tristrato del sottosuolo: il coefficiente angolare della dromocrona passante per l'origine rappresenta l'inverso della velocità di propagazione delle onde elastiche nel primo strato ( $V_0$ ), i coefficienti angolari delle altre 2 dromocrone rappresentano l'inverso delle velocità dei due strati sottostanti ( $V_1$  e  $V_2$ ); un modello tristrato è caratterizzato da 2 rifrattori che separano 3 materiali caratterizzati da un diverso comportamento meccanico rappresentato da un modello di tipo elastico omogeneo, continuo ed isotropo.



L'intersezione tra due dromocrone è detto punto di ginocchio e rappresenta il punto in cui arrivano contemporaneamente le onde rifratte da due rifrattori adiacenti o, se consideriamo le prime due dromocrone, le onde dirette e le onde rifratte dal primo rifratte: in un'indagine di sismica a rifrazione sarà possibile individuare un numero di punti di ginocchio pari al numero di rifrattori investigati.

Pertanto più è profondo il rifratte più è distante dalla sorgente il rispettivo punto di ginocchio: da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una certa distanza proporzionale alla profondità del rifratte e che quindi la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

Tramite semplici relazioni trigonometriche è possibile, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nei diversi strati omogenei del sottosuolo, conoscere gli spessori di ciascuno di essi: ciascun metodo presenta, in funzione delle ipotesi iniziali fissate, un diverso campo di applicabilità, ove è possibile considerare i risultati con un accettabile grado di affidabilità.

I principali limiti della tecnica di sismica a rifrazione risiedono nella impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l'energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta: tale situazione è nota come "orizzonte muto" e porta, oltre all'inconveniente di non considerare la presenza di uno strato a comportamento diverso nel sottosuolo, alla sovrastima dello spessore dello strato sovrastante l'inversione di velocità.

Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile.

È noto infatti che per essere visto uno strato deve poter essere campionato da almeno 2 geofoni e, se questo non avviene, lo strato è come se non esistesse e non se ne può valutare né velocità né spessore: tale fenomeno è noto come "orizzonte nascosto". Altra limitazione, in parte risolvibile, è quella del cambio di pendenza di una dromocrona dovuta non alla presenza di una nuova interfaccia di separazione tra due strati ma alle variazioni di inclinazione della stessa interfaccia.

Le prime due limitazioni rappresentano situazioni stratigrafiche che mal si prestano ad essere investigate col metodo di sismica a rifrazione in quanto portano a sovrastimare o sottostimare lo spessore delle coperture.

La terza limitazione rappresenta una delle situazioni stratigrafiche molto ricorrente in quanto è molto difficile in realtà trovare situazioni perfettamente piano parallele: è possibile tramite metodi di



interpretazione particolari (delay-time o plus minus ed altri), che richiedono specifiche configurazioni degli stendimenti rispetto ai punti di energizzazione, ricostruire situazioni litostratigrafiche caratterizzate da interfacce di separazione anche molto articolate.

Se gli strati sono poco potenti con velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva.

Sebbene nei casi reali si abbia a che fare con depositi stratificati, spesso fittamente e in maniera poco definita, con un'alternanza di strati caratterizzati da rigidzze anche molto differenti (con inevitabili problemi di riflessione e rifrazione delle onde in corrispondenza delle superfici di discontinuità e/o di fratture), si assume che l'effetto delle onde dirette, in termini di ampiezza delle vibrazioni, sia predominante rispetto a quello delle onde indirette, tanto da potere trascurare queste ultime e considerare il mezzo, limitatamente all'area comprendente la sorgente e il ricevitore, come mezzo omogeneo, isotropo e non confinato, pur ben conoscendo i limiti di tale approssimazione. La velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ( $S_r = 100\%$ ) dipende talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione; invece le velocità delle onde S e delle onde di superficie, sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidzza del terreno sono quelle di taglio e, subordinatamente le onde di superficie.

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$E_v = \rho \cdot \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

$$G = \rho \cdot V_s^2; \nu = \frac{0.5 \cdot \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right) - 1}$$

$$E = 2\rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu)$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0.862 + 1.14 \cdot \nu}{1 + \nu}$$

#### Parametri elastici

Le indagini sismiche con tecnica a rifrazione sono finalizzate alla determinazione diretta e continua lungo la verticale d'esplorazione della velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di volume di compressione (onde P) e alla determinazione indiretta, per mezzo di tali valori di velocità, di alcune proprietà meccaniche del materiale in questione. Si assume che il terreno esplorato abbia un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare (ipotesi peraltro giustificata dall'esperienza in base alla quale le deformazioni tangenziali prodotte dalle onde sismiche sono spesso inferiori a 10-3% e quindi al di sotto della soglia di linearità). Pertanto in base alla teoria della elasticità sussistono specifiche relazioni tra i valori di velocità di propagazione delle onde P ( $V_p$ ), delle onde S ( $V_s$ ) e delle onde di Rayleigh ( $V_R$ ) ed alcune delle proprietà meccaniche del mezzo attraversato, quali il modulo di compressibilità volumetrica  $E_v$  o  $K$ , il modulo di Young  $E$ , il coefficiente di Poisson  $\nu$  e il modulo di deformazione a taglio  $G$ .



$\gamma = \rho \cdot g$  il peso di volume

dove  $\rho$  rappresenta la densità del mezzo

$g$  rappresenta l'accelerazione di gravità.

Il rapporto tra  $V_p$  e  $V_s$  può fornire utili informazioni sullo stato di consolidazione e sulla presenza di gas nei porous-media. Alcuni Autori (Gardner & Harris, 1968) affermano che rapporti maggiori di 2 si riscontrano in presenza di sabbie saturate non consolidate; alti rapporti risultano altresì per terreni incoerenti argillo-limosi ad alto grado di saturazione.

Valori inferiori a 2 si registrano in presenza di rocce compatte o sedimenti gas saturati. In rocce saturate tale rapporto risulta dipendente dalla litologia, dalla quantità e geometria dei pori e dalle microfrazioni e potrebbe, nota la litologia, fornire indicazioni su questi ultimi due parametri.

Il Coefficiente di Poisson  $\nu$  è l'unico che non necessita della conoscenza della densità per la sua determinazione. Sebbene in teoria sia considerato stress indipendente ed i suoi valori risultino compresi tra 0.25 e 0.33, nei porous-media esso risulta stress dipendente, e presenta un campo di variabilità più esteso e può addirittura arrivare secondo GREGORY (1976) a valori negativi. I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati, in alcuni sedimenti incoerenti e saturi i valori possono risultare uguali o superiori a 0.49; nelle sospensioni assume il valore di 0.5.

Il Modulo di taglio  $G$  è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua. Il campo di variabilità nei porous media è molto esteso.

Il Modulo di Young  $E$  dipende dalla porosità, dalla pressione litostatica e dagli altri moduli elastici. Aumenta in misura considerevole quando al campione "dry" a bassa porosità vengono aggiunte piccole quantità di acqua, diminuisce quando un campione ad alta porosità viene sottoposto allo stesso trattamento. I minimi valori del modulo si registrano in litotipi ad alta porosità saturi in gas, mentre i valori massimi si hanno per litotipi sotto pressione saturati in acqua ed a bassa porosità. Il campo di variabilità è considerevole.

### Metodologia

Lo scopo della prova consiste nel caratterizzare dinamicamente, tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di compressione ( $V_p$ ), le unità litologiche presenti nell'area di indagine.

La tecnica di esplorazione trova il suo miglior campo di applicazione con profondità delle coperture da esplorare inferiore ai 20-30 m. Si rende necessaria soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione discrete e quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno.

La lunghezza dello stendimento di geofoni di 115 m rappresenta un valore limite per il sistema di energizzazione utilizzato, in quanto i segnali ricevuti risultano sensibilmente disturbati soprattutto in corrispondenza dei geofoni più lontani dal punto di energizzazione. L'entità del disturbo è molto variabile in funzione delle caratteristiche litologiche e meccaniche del sottosuolo. L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde  $P$  è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione del primo arrivo in  $P$  attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro;



- Ricostruzione delle dromocrone in P e scelta del modello di sottosuolo utilizzato nell'interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone e calcolo delle velocità di propagazione delle onde elastiche analizzate e dei relativi tempi di intercetta;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo del tempo di intercetta applicabile a ciascun punto di scoppio (metodo a griglia shot-point); questo metodo è applicabile in situazioni litostratigrafiche approssimabili a modelli stratificati a strati piani orizzontali e/o inclinati.

Per le analisi interpretative sono stati utilizzati i software:

- • InterSism versione 2.1 - Seismic Refraction Processing Software della Geo&Soft;
- • WinMASW 4.0 Standard – Multichannel Analysis of Surface Waves – per la determinazione dei profili verticali Vs della Elisoft.

Non si è ritenuto necessario, date le finalità dell'indagine, applicare metodi interpretativi più complessi che peraltro necessitano di maggior onere economico nell'acquisizione dei dati (minimo 7 shots) e rendono più difficile l'individuazione di aree adatte all'indagine.

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.

In funzione del modello scelto viene individuato l'insieme di situazioni monodimensionali in grado di rappresentare l'area di studio e si propone un possibile gradiente di variazione delle proprietà meccaniche dei materiali con la profondità.

Tali modelli sono utilizzabili ai fini di valutazioni semiquantitative della risposta sismica locale, ricordando che gli andamenti dei rifrattori individuati possono non essere coincidenti con quelli reali in quanto valutati tramite un solo stendimento; al fine di individuare le reali geometrie dei sismostrati sarebbe necessario eseguire più stendimenti disposti tra loro ortogonalmente.

### Interpretazione e risultati

L'indagine geosismica è consistita nell'esecuzione di una Base Sismica di superficie, siglata BASE 1, in P.

Per quanto riguarda la geometria adottata nella BASE sismica 1, i 24 geofoni sono stati disposti sul terreno con una spaziatura di 1,0 m; sono stati utilizzati 2 punti di energizzazione estreme (a 1 m dai geofoni 1° e 24°), quindi l'intero stendimento BASE\_1 risulta di 23,0 m.

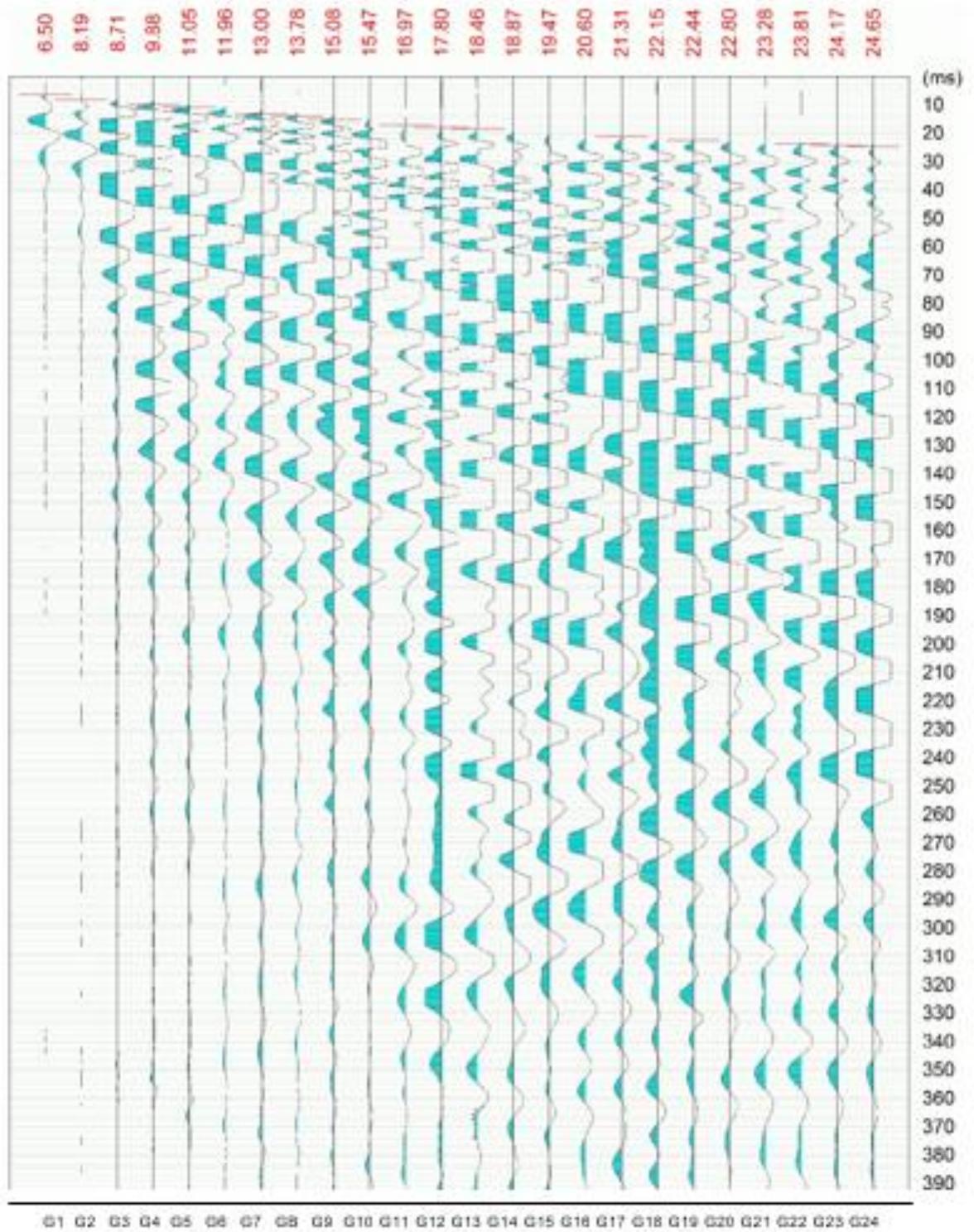
La topografia della superficie è del tutto pianeggiante sul tratto investigato ed è stata pertanto assegnata allo stendimento la quota relativa 0 m.

### Registrazione Onde P

Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 400 microsecondi, senza utilizzo di filtro hardware. Di seguito si riportano i sismogrammi multishot acquisiti:



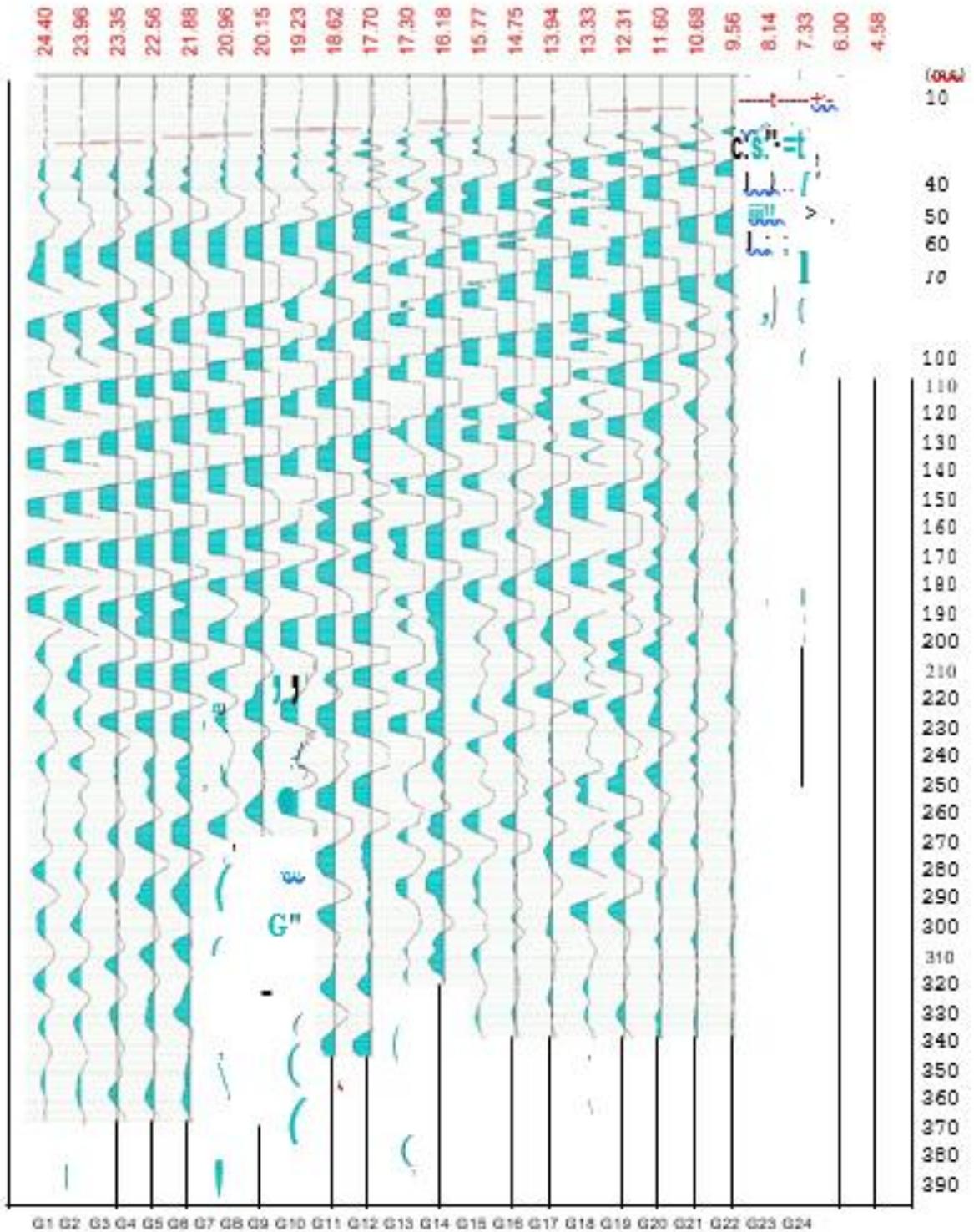
Comune di Stomara  
loc.



www.geotek.com



Comune di Stornara  
loc.



www.geosoft.com



### Prova sismica multicanale MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Il metodo MASW è una tecnica di indagine non invasiva che consente la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che si trasmettono con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione, cioè sono onde la cui velocità dipende dalla frequenza.

La strumentazione utilizzata è la stessa della sismica a rifrazione, utilizzando 24 geofoni, la distanza intergeofonica di 1,0 metro, l'intero stendimento è di 23,0 m; le registrazioni per ciascun punto di scoppio (1 m; 3 m; 5 m) sono state campionate con un intervallo di 1 secondo, senza utilizzo di filtri hardware.

L'elaborazione dati nell'analisi MASW può essere ricondotta in due fasi:

- • Determinazione della Curva di Dispersione (valutazione dello spettro di velocità)
- • Inversione della Curva di Dispersione

### Modello geofisico e geologico interpretativo

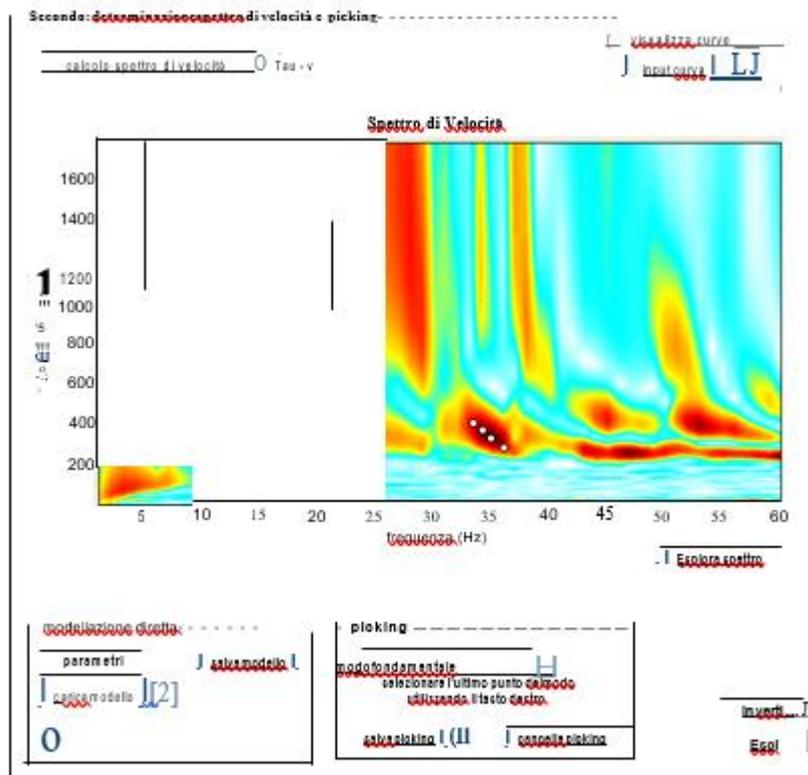
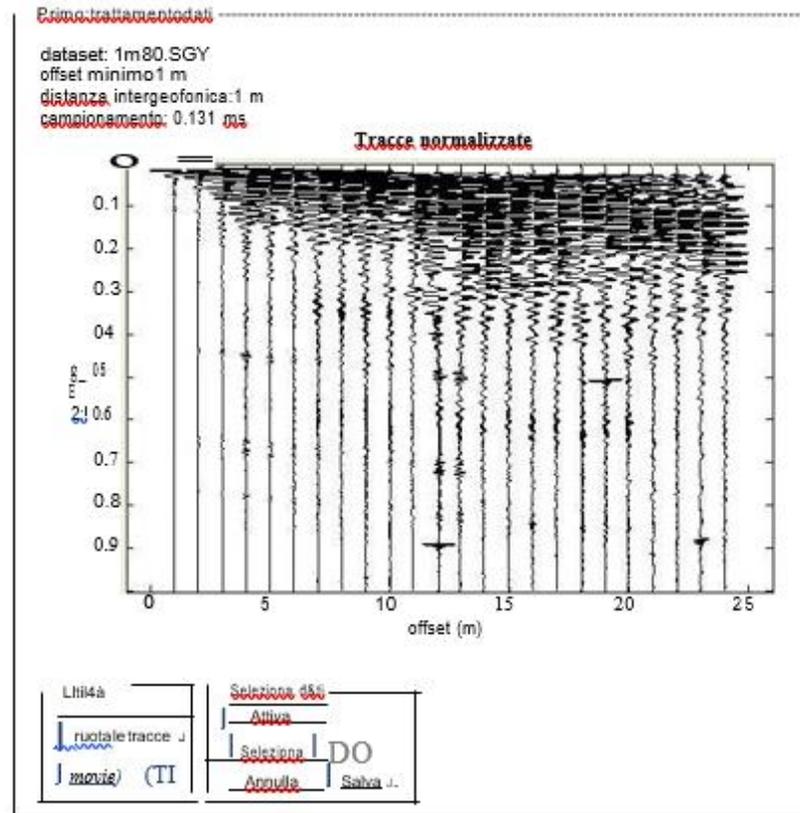
Le sezioni sismiche ottenute dall'interpretazione dei segnali acquisiti permettono di individuare le principali unità geofisiche costituenti il modello geofisico dell'area d'indagine.

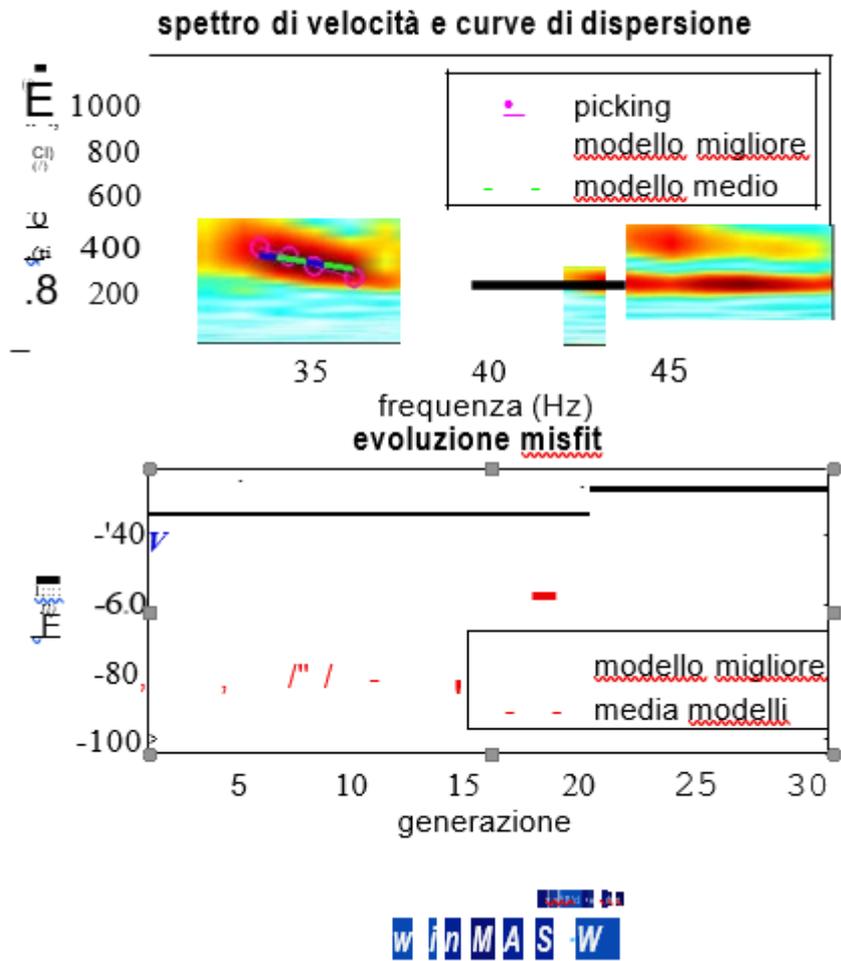
Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione adottata e di problematiche incontrate durante l'indagine e che solo l'operatore è in grado di quantificare in modo ottimale: nel caso in esame la risoluzione del metodo non permette precisioni in termini di spessore inferiori al metro e i valori di velocità  $V_p$  e  $V_s$  sono da intendere come velocità medie all'interno di ciascuna unità geofisica individuata. Pertanto si è proceduto all'interpretazione geofisico – geologica individuando preliminarmente le unità geofisiche omogenee dal punto di vista delle onde P ( $V_p$ ); - sovrapponendo i limiti individuati dalle prove MASW.

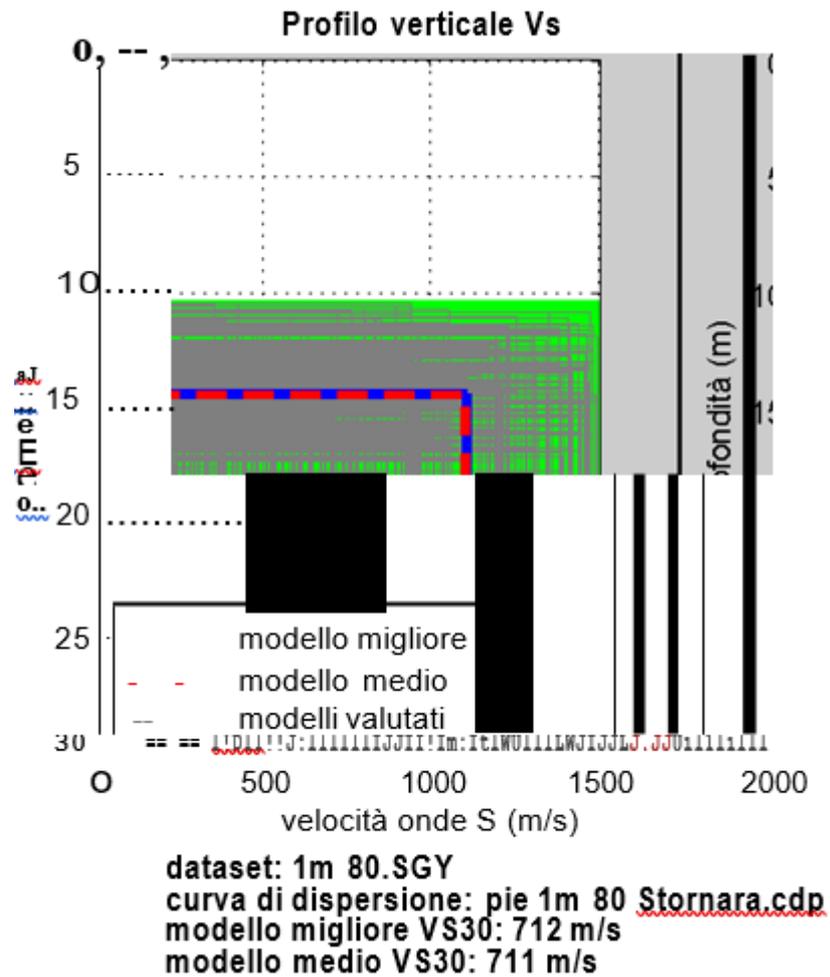
Ciascuna unità geofisica così individuata è da intendersi costituita da materiale continuo, omogeneo ed elastico, le cui proprietà elastiche variano verticalmente in modo lineare da un valore minimo ad un valore massimo definito dall'intervallo di valori ad essa associati: a ciascuna unità è possibile assegnare un unico valore di  $V_p$  e  $V_s$  pari al valore medio dell'intervallo assegnato, mentre a tutto il modello è possibile associare uno o più gradienti di  $V_p$  e  $V_s$  con la profondità, in funzione delle variabilità laterali.

In allegato si riporta l'interpretazione della sezione sismica e le foto effettuate durante l'indagine, per l'area indagata.

Di seguito si riportano i risultati della prova MASW (Base 1)







**Modello medio**

VS (m/s): 221, 569, 1600

Deviazioni Standard (m/s): 0, 0, 0

Spessori (m): 2.6, 11.8

Deviazioni Standard (m): 0.0, 0.0

Tipo di analisi: onde di Rayleigh

Stima approssimativa di densità e moduli elastici Densità (gr/cm3): 1.86, 2.10, 2.35

Modulo di Poisson: 0.33, 0.36, 0.36

Modulo di taglio (MPa): 91, 681, 6019

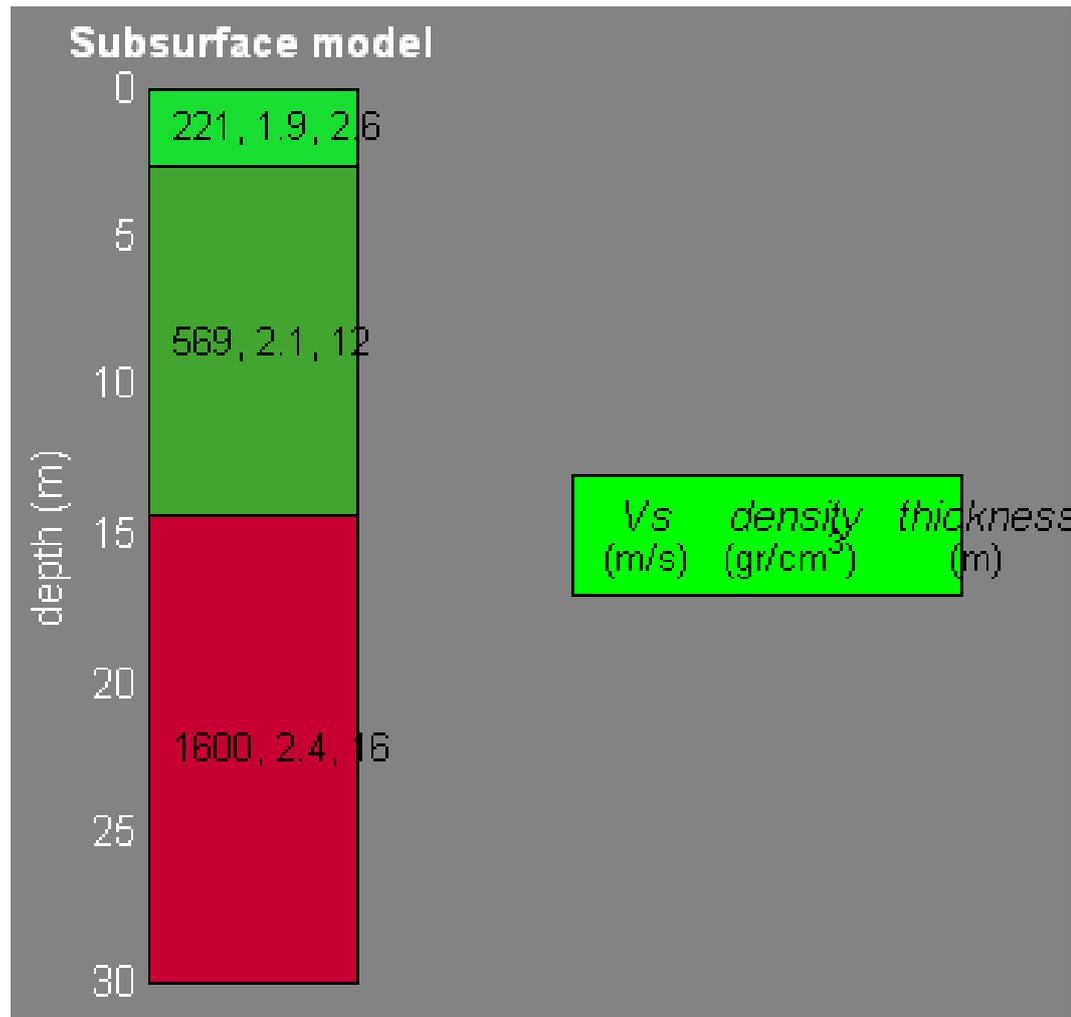
Modulo di compressione (MPa): 240, 2286, 18914

Modulo di Young (MPa): 242, 1859, 16324

Modulo di Lamé (MPa): 180, 1832, 14901

VS30 (m/s): 711

Tipo di Suolo: B



Dalla normativa (modifiche del D.M. 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. Infrastrutture del 14/01/2008, pubblicato su Gazzetta Ufficiale Supplemento ordinario n° 29 del 04/02/2008):

*B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).*

Dal modello geofisico sopra riportato è possibile definire la situazione monodimensionale più sfavorevole dal punto di vista dei fenomeni di amplificazione sismica litologica, assegnando valori medi di Vs e valori massimi dello spessore di ciascuna unità e calcolando un opportuno gradiente fino a 30 m per definire il parametro Vs30 da normativa nazionale e fino al bedrock geofisico per definire il parametro T (periodo proprio del sottosuolo).

## CONCLUSIONI

L'interpretazione dei dati sismici ha permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- Le linee sismiche evidenziano principalmente 3 sismostrati:

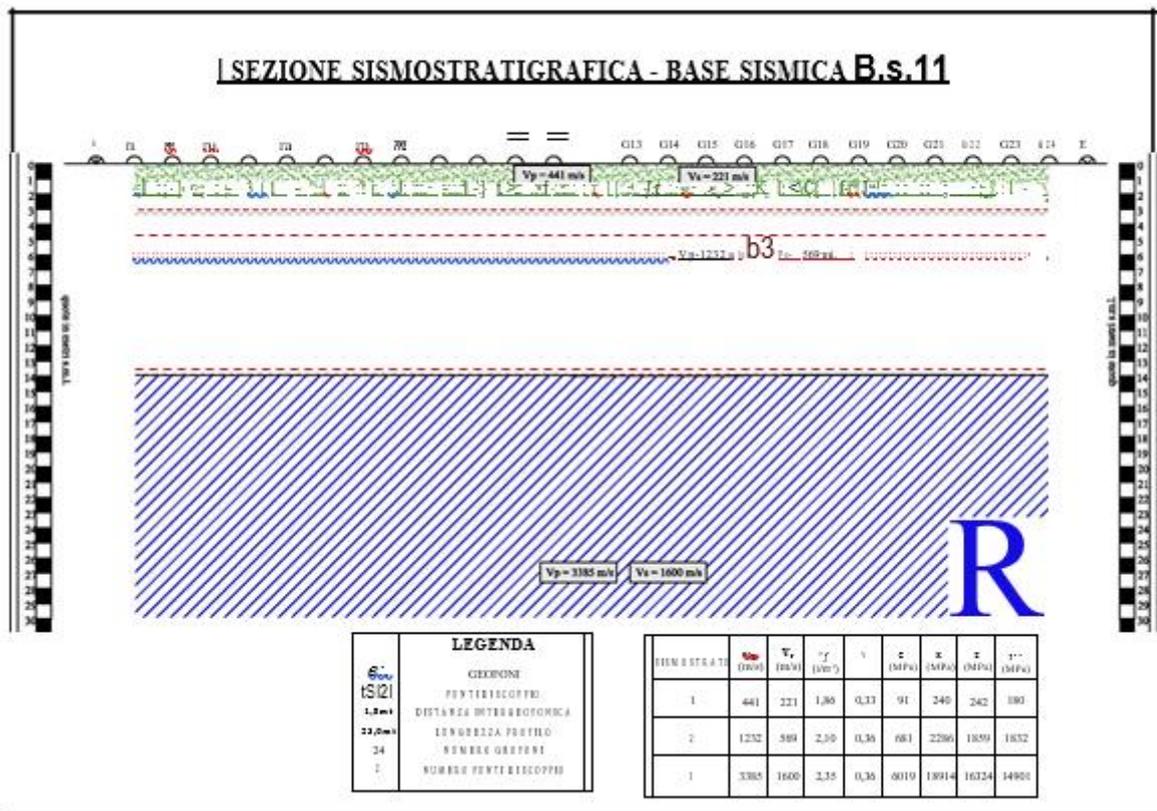


- ▶ Sismostrato superficiale, coltre superficiale con  $V_p \approx 441$  m/s e  $V_s \approx 221$  m/s, di spessore di circa 2,5 m;
- ▶ Sismostrato intermedio, substrato semilitoide con  $V_p \approx 1232$  m/s e  $V_s \approx 569$  m/s;
- ▶ Sismostrato di fondo, substrato semilitoide con  $V_p \approx 3385$  m/s e  $V_s \approx 1600$  m/s, rinvenuto ad una profondità di  $\approx 14,0$  m.

- Il sito indagato è compreso, con Ordinanza P.C.M. n° 3274 del 20/03/2003, nella **zona 2** della classificazione sismica del territorio nazionale, con  $a_g = 0,25$ .
- Alla luce dei dati emersi dall'indagine sismica, si riporta una tabella riassuntiva in cui sono indicati i principali moduli per i diversi sismostrati.

Sismostrati	Velocità onde P $V_p$ (m/s)	Velocità onde S $V_s$ (m/s)	Densità $\gamma$ ( $gr/cm^3$ )	Modulo di Poissonv	Modulo di Taglio $G$ (MPa)	Modulo di Compressione $K$ (MPa)	Modulo di Young $E$ (MPa)	Modulo di Lamé $\mu$ (MPa)
Superficiale	441	221	1,86	0,33	91	240	242	180
Intermedio	1232	569	2,10	0,36	681	2286	1859	1832
Fondo	3385	1600	2,35	0,36	6019	18914	16324	14901

- La velocità media di propagazione entro i 30 m di profondità delle onde di taglio è  $V_{s30} = 711$  m/s; alla luce di tale valore e delle caratteristiche stratigrafiche dei terreni, i terreni in esame appartengono alla **Categoria di suolo di fondazione B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero  $NSPT_{30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).**



**DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**





## 5. CONCLUSIONI

L'area di intervento ricade parzialmente tra le aree a pericolosità geomorfologica media e moderata (PG1)

Da quanto si è accertato, si possono trarre le seguenti considerazioni conclusive:

- il sito dal punto di vista morfologico presenta buone caratteristiche di stabilità;
- sotto il profilo geolitologico ed idrogeologico non è interessato da anomalie che possono interrompere il quadro statico globale;
- si assevera che l'area di studio risulta fuori da aree a rischio idraulico;
- l'area non è soggetta a fenomeni di allagamento;
- Le opere in progetto non prevedono sbancamenti significativi, in quanto le opere da realizzare non prevedono fondazioni di grosse dimensioni, né la necessità di rimodellare la morfologia attuale;
- la zona non presenta segni di frane in atto o in preparazione;
- il sottosuolo interessato dalle fondazioni è costituito da depositi sabbiosi con intercalazioni di livelli argillosi-limosi, inoltre sono presenti depositi ghiaiosi costituiti da ciottoli di piccole e medie dimensioni ben arrotondati, dotate di sufficiente capacità portante;
- il piano di posa delle fondazioni risulti essere posto, a discrezione del progettista ea seconda dei carichi a profondità comprese tra 0,60 e 3,50 metri dal p.c.;
- la falda, di tipo freatico, è ubicata a profondità superiori ai 4,00 metri dal piano campagna;

La velocità media di propagazione entro i 30 m di profondità delle onde di taglio è  $V_{s30} = 711,00$  m/s, tali terreni appartengono alla **Categoria di suolo di fondazione B**. L'assenza di piani di scorrimento superficiali e l'assenza di falde freatiche superficiali di tipo continuo, contribuiscono al buon equilibrio del pur modestissimo ed impercettibile versante.

Le osservazioni effettuate, unitamente alle conoscenze dirette della geologia della zona ed al comportamento meccanico dei litotipi presenti, consentono di definire sufficientemente idoneo il sito interessato dall'opera.