



Comune di Pieve Fosciana
Provincia di Lucca

Variante urbanistica per modifica del tracciato della strada di accesso agli impianti sportivi di Pieve Fosciana capoluogo

art. 34 L.R. 65/14 - art. 19 D.P.R. 327/01

sindaco

Francesco Angelini

**responsabile
del procedimento**

geom. Marcello Bernardini

progettista

arch. Matteo Casanovi

geologo

geol. Riccardo Biagioni

marzo 2020

Elaborato geologico

INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

elaborato

U04.3

COMUNE DI PIEVE FOSCIANA
PROVINCIA DI LUCCA

INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE
ESEGUITE IN PIEVE FOSCIANA CAPOLUOGO
LOCALITÀ "LA CUSTIA"

- RELAZIONE TECNICA -

Committente:
Dott. Geol. RICCARDO BIAGIONI

PRO.GEO. s.r.l.
Dott. Geol. AMERINO PIERONI

PRO.GEO. s.r.l.
Via Valmaira, 14
55032 CASTELNUOVO GARFAGNANA (LU)
Part. IVA: 01998560468



FEBBRAIO 2020

Rif. PG07_2020

INDICE

1. PREMESSA	2
2. PROVA PENETROMETRICA DINAMICA	3
3. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P	4
3.1. La metodologia di indagine	4
3.2. Sistema di acquisizione	5
3.3. Elaborazione dei dati	7
3.4. Schema di acquisizione	7
3.5. Risultati della prospezione sismica	8
4. ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI (MASW).....	9
4.1. Le onde di superficie per lo studio del sottosuolo.....	9
4.2. Indagine MASW – proprietà delle onde di superficie.....	11
4.3. Descrizione generale della procedura MASW	12
4.4. Acquisizione delle onde di Rayleigh (componente ZVF) - Strumentazione.....	14
4.5. Analisi MASW in onde di Rayleigh (componente ZVF).....	15
4.6. Tecnica e schema di acquisizione	17
4.7. Risultati della prova sismica MASW	17

Allegati

- all. 1: Inquadramento topografico dell'area (scala 1:10.000)
- all. 2: Planimetria di ubicazione delle indagini geognostiche e geofisiche (scala 1:500)
- all. 3: Tabulati e grafici della prova penetrometrica dinamica DPSH
- all. 4: Prospezione sismica a rifrazione con onde P (sezione sismica ST1)
- all. 5: Prova sismica MASW (sezione sismica M1)
- all. 6: Documentazione fotografica

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica riguarda le indagini geognostiche e geofisiche eseguite, per conto del Dott. Geol. RICCARDO BIAGIONI, in località “La Custia”, in Pieve Fosciana capoluogo (LU) (*all. 1*), allo scopo di ricostruire la successione stratigrafica ⁽¹⁾ e valutare i parametri fisici e geotecnici dei terreni presenti.

Tali indagini sono state effettuate il giorno 27.01.2020, secondo il seguente programma:

- esecuzione di n. 1 **prova penetrometrica dinamica** superpesante (DPSH) spinta fino alla profondità di 2,4 m dal p.c. (*all. 3*);
- esecuzione di n. 1 **prospezione sismica a rifrazione** con onde P, tramite stendimento di lunghezza pari a 34,5 metri (24 canali; interasse: 1,5 m) (*all. 4*);
- esecuzione di n. 1 **prova MASW** ⁽²⁾ (sorgente: forza verticale ZVF, *cfr. § 4.1*; acquisizione: componente verticale delle onde di Rayleigh), tramite stendimento di lunghezza pari a 34,5 metri (24 canali; interasse: 1,5 m) (*all. 5*); quest’ultima allo scopo di ottenere la stratigrafia di velocità delle onde trasversali (V_s), dalla quale ricavare il parametro V_{seq} (velocità equivalente nei primi trenta metri sotto la superficie del terreno) (*cfr. § 4.7*).

I risultati delle suddette indagini, in particolare quelli derivati dalle prospezioni sismiche, sono stati confrontati con quanto ricavato dalle indagini effettuate in siti limitrofi, sia nell’ambito del Progetto VEL e del Programma di Microzonazione Sismica della Regione Toscana, sia nell’ambito degli studi di supporto al Regolamento Urbanistico comunale.

⁽¹⁾ Si ricorda che le classificazioni geologiche dei vari livelli individuati (ove proposte) sono puramente indicative. Le prove eseguite mirano infatti, unicamente, alla caratterizzazione geotecnica dei materiali attraversati.

⁽²⁾ Multichannel Analysis of Surface Waves = Analisi Multicanale delle Onde Superficiali.

2. PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Classificazione ISSMFE (1988) dei penetrometri dinamici

<i>Tipo</i>	<i>Sigla di riferimento</i>	<i>Peso massa battente M (Kg)</i>
Leggero	DPL (Light)	$M < 10$
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$
Pesante	DPH (Heavy)	$40 < M < 60$
Super pesante	DPSH (Super Heavy)	$M > 60$

Per l'esecuzione della prova penetrometrica è stato utilizzato un penetrometro dinamico superpesante (DPSH) (PAGANI mod. TG 63-200) le cui caratteristiche tecniche sono di seguito riportate:

Rif. Norme:	DIN 4094
Peso massa battente (maglio):	63,5 Kg
Altezza di caduta libera (volata):	0,75 m
Peso sistema di battuta (massa passiva):	0,63 Kg
Diametro punta conica:	51 mm
Area base punta conica:	20,43 cm ²
Angolo apertura punta:	90°
Lunghezza singola asta:	1,0 m
Peso singola asta:	6,31 Kg
Profondità giunzione 1 ^a asta:	0,40 m
Avanzamento punta:	0,20 m
Numero di colpi punta:	N(20) (relativo all'avanzamento)
Rivestimento/Fanghi:	No
Coefficiente di correlazione:	1,472

La prova penetrometrica dinamica, i cui risultati sono esposti in dettaglio nei tabulati in *allegato 3*, ha attraversato terreni prevalentemente incoerenti, appartenenti ai depositi alluvionali terrazzati a “ciottoli di Macigno” ⁽³⁾, fino alla profondità di 2,40 m dal p.c., dove si è verificato il rifiuto, in corrispondenza di un probabile trovante; tali depositi sono costituiti in prevalenza da sabbie limose sciolte o poco addensate, nei livelli più superficiali e da ghiaie e ciottoli embricati, più in profondità.

Durante la realizzazione della prova, infine, non è stata rilevata la presenza di falda acquifera nell'intero spessore di terreno indagato.

Di seguito viene riassunta la successione stratigrafica:

⁽³⁾ Per la caratterizzazione litostratigrafica si è fatto riferimento alla cartografia geologica disponibile per l'area d'interesse, in particolare alla *Carta geologica e carta della franosità del bacino del Fiume Serchio* - AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME SERCHIO (agg. Luglio 2012).

Prova P1

prof. dal p.c. (m):

litotipo:

0,00 – 1,80:

Sabbie limose con rari inclusi litoidi (depositi di copertura superficiali sciolti).

1,80 – 2,20:

Ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa limose (depositi alluvionali terrazzati moderatamente addensati).

2,20 – 2,40:

Trovante - rifiuto.

Falda acquifera non rilevata.

Nei tabulati e nei grafici allegati alla presente relazione, infine, vengono riportati nel dettaglio i risultati ottenuti dalla prova penetrometrica, elaborata attraverso il programma **Dynamic Probing** della *Geostru software* (all. 3).

3. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P

3.1. La metodologia di indagine

Nella prospezione sismica a rifrazione con onde P, si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (P) per determinare lo spessore e l'andamento dei diversi strati del terreno.

La prospezione consiste nel generare nel terreno un'onda sismica di compressione, attraverso una determinata sorgente di energia (colpo di mazza o di maglio, esplosivo, ecc.) e nel misurare il tempo impiegato da questa a compiere il percorso nel sottosuolo, dal punto di energizzazione fino agli apparecchi di ricezione (*geofoni*), seguendo le leggi di rifrazione (Legge di Snell), cioè considerando le rifrazioni che l'onda stessa subisce in corrispondenza delle superfici di separazione tra due strati sovrapposti aventi densità (ovvero moduli di elasticità) crescenti con la profondità.

L'apparecchiatura necessaria per le prospezioni è costituita da una serie di ricevitori (*geofoni*) che vengono spazati lungo un determinato allineamento (*base sismica*) e da un cronografo che registra l'istante di inizio della perturbazione elastica ed i tempi di primo arrivo delle onde a ciascun geofono. Così, osservando i primi arrivi su punti posti a distanze diverse dalla sorgente energizzante, è possibile costruire una curva tempo-distanza (*dromocrona*) rappresentante la variazione del minimo percorso in funzione del tempo.

Attraverso metodi analitici si ricavano quindi le velocità delle onde elastiche longitudinali (V_p), risalendo allo spessore dei terreni attraversati.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo dipende da diversi fattori; in uno stesso tipo di roccia, ad esempio, la velocità può diminuire od aumentare con la profondità in funzione del grado di alterazione e/o fratturazione.

Sensibili variazioni, inoltre, si possono avere nei terreni incoerenti saturi; la velocità delle onde P, infatti, è fortemente influenzata dalla presenza della falda e dal grado di saturazione.

Questo comporta che litotipi differenti possono avere uguali velocità delle onde P, per cui non necessariamente l'interpretazione sismostratigrafica corrisponderà con la reale situazione geologico-stratigrafica.

Per il metodo sismico a rifrazione, inoltre, valgono le seguenti considerazioni:

- un livello a velocità intermedia, interposto fra uno strato superiore caratterizzato da velocità minore ed uno inferiore caratterizzato da velocità assai più elevata, può risultare non rilevabile, poiché mascherato dagli "arrivi" dello strato sottostante (effetto dello strato nascosto e/o "zona oscura");

- un determinato orizzonte può non essere individuato se la velocità di trasmissione delle onde P al suo interno risulterà inferiore a quella dei livelli sovrastanti (effetto della inversione della velocità);

- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni può non essere rilevabile;

- aumentando la spaziatura dei geofoni (e quindi la lunghezza della linea sismica), aumenta la profondità di investigazione, ma può ridursi la precisione nella determinazione della profondità e dello spessore dei vari orizzonti.

Il dato sismico può raggiungere una maggiore precisione ed una significatività più elevata se si dispone di sondaggi di taratura.

3.2. Sistema di acquisizione

L'acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- sismografo;
- sorgente energizzante (mazza su piastra metallica di battuta);
- trigger;
- apparecchiatura di ricezione (24 geofoni verticali per onde P).

Sismografo

Lo strumento utilizzato per la presente indagine è un sismografo GEOMETRICS GEODE a 24 canali, le cui caratteristiche tecniche sono di seguito riportate:

Registrazione:	Configurabile da 3 a 24 canali
Risoluzione:	24 bit
Larghezza di banda di ingresso:	1,75 Hz – 20.000 Hz
Intervalli di campionamento:	Selezionabili da 0,02 msec a 16 msec
Range dinamico di sistema:	144 dB (110 dB misurato a 2 msec)
Distorsione:	0,0005%
Accuratezza del trigger:	1/32 del passo di campionamento
Alimentazione:	Batterie esterne a 12 volt
Unità centrale di controllo:	Collegamento con PC notebook



Sismografo GEOMETRICS GEODE

Sorgente energizzante

Per la generazione delle onde P (longitudinali) è stata utilizzata una mazza di massa pari a 6 kg, in battuta su piastra metallica, quest'ultima resa bene solidale al suolo.

Trigger

Il trigger utilizzato consiste in un circuito elettrico che viene chiuso mediante un apparecchio starter (geofono starter) nell'istante in cui il sistema energizzante genera la perturbazione sismica, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso della durata di qualche secondo, che viene inviato al sensore collegato al sistema di acquisizione dati.

Apparecchiatura di ricezione

Per la ricezione delle onde P sono stati utilizzati 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz.

Le quote dei geofoni sono state rilevate mediante apposita livellazione.

3.3. Elaborazione dei dati

Il metodo della tomografia sismica permette di individuare anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un elevato potere risolutivo, offrendo la possibilità di ricostruire stratigraficamente situazioni complesse, non risolvibili con differenti tecniche di indagine. L'analisi del gradiente di velocità effettuata sulla sezione tomografica, permette di evidenziare i principali passaggi stratigrafici e/o di consistenza.

Questa tecnica fornisce l'immagine della distribuzione delle onde sismiche sotto la superficie, basata sui tempi di primo arrivo e sulla geometria di acquisizione, come nella normale sismica a rifrazione.

Partendo da un modello di velocità iniziale, questo viene migliorato attraverso successive iterazioni: la fase di calcolo si conclude quando si ha la migliore sovrapposizione, ovvero il minimo scarto, fra le dromocrone calcolate e quelle osservate.

L'elaborazione dei dati si sviluppa attraverso le seguenti fasi:

1. determinazione dei primi arrivi ("picking") attraverso il software interno del sismografo "Geode" e/o con il modulo "Pickwin" del programma *SeisImager/2D*, operata prima in automatico e successivamente con aggiustamenti manuali, con particolare attenzione alle fasi d'onda ed alla loro evoluzione.

2. inserimento dei dati ed interpretazione ("processing") attraverso il modulo "Plotrefa" del programma *SeisImager/2D*; questo esegue l'inversione tomografica dei dati, che permette il calcolo delle traiettorie d'onda (*raypath*) e genera il modello di velocità (*sezione tomografica*).

3. "output" dei tabulati:

- dati di scoppio (ascissa e quota dei geofoni, ascissa e quota dei punti di energizzazione, tempi di primo arrivo);
- velocità calcolate alle diverse profondità.

4. "output" grafico dei sismogrammi registrati, delle dromocrone sismiche (misurate e calcolate), del percorso dei raggi sismici, del modello tomografico di velocità sismiche dei terreni (sezione sismica tomografica) e della sezione sismostratigrafica interpretativa.

3.4. Schema di acquisizione

Per la prospezione sismica in questione, è stato effettuato un unico stendimento, denominato ST1, ubicato nell'area d'interesse, così come riportato in planimetria allegata (*all. 2*); per lo stendimento è stato scelto un interasse tra i geofoni pari a 1,5 m, per una lunghezza complessiva di 34,5 metri (analogo a quello della prova MASW).

Sono state effettuate 5 registrazioni in onde P, con 5 punti di energizzazione posizionati secondo il seguente schema:

- due tiri esterni, ubicati rispettivamente alla distanza di $-7,5$ m dal geofono G1 e $+7,5$ m dal geofono G24;
- due tiri in corrispondenza dei geofoni estremi G1 e G24;
- un tiro interno, ubicato a metà dello stendimento.

La qualità delle registrazioni ottenute è stata generalmente buona e tale da consentire la sicura individuazione dei primi arrivi sui sismogrammi (*all. 4*).

3.5. Risultati della prospezione sismica

Nel dettaglio, con riferimento al *modello tomografico 2D* ricavato per le velocità sismiche dei terreni e alla *sezione sismostratigrafica* (*all. 4*), la successione stratigrafica dei terreni ed i diversi intervalli di velocità delle onde P registrate (V_p) possono essere correlati, anche sulla base della prova penetrometrica eseguita, secondo lo schema seguente:

- **strato 1**: dalla superficie fino a profondità variabili da **1,8÷2,0** m dal p.c. verso l'estremo G24 della stesa a massimi di circa **4,0** m dal p.c. andando verso l'opposto G1, è presente uno strato caratterizzato da velocità (V_p) comprese tra 330 e 600 m/sec, corrispondente all'orizzonte più superficiale di *depositi alluvionali terrazzati sciolti/poco addensati* costituiti in prevalenza da *sabbie limose con ghiaie e ciottoli diffusi*.

Tale orizzonte è stato attraversato localmente con la prova penetrometrica P_1 , eseguita presso i geofoni G17-G18, fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. (*all. 3*);

- **strato 2**: caratterizzato da velocità (V_p) comprese tra 600 e 1.400 m/sec, correlabili con la presenza di *depositi alluvionali terrazzati prevalentemente grossolani da poco a moderatamente addensati*, costituiti da *ghiaie e ciottoli eterometrici in matrice sabbioso-limosa*; tale orizzonte, le cui caratteristiche migliorano gradualmente con la profondità, si rinviene, per spessore indefinito, a profondità superiori a **1,8÷2,0** m dal p.c. verso il geofono estremo G24 e a circa **4,0** m dal p.c. verso l'opposto G1.

La massima profondità indagata con la prospezione sismica in questione è stata di circa 7÷8 metri.

4. ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI (MASW)

4.1. Le onde di superficie per lo studio del sottosuolo

Le onde di superficie che interessano chi si occupa di studi su terra ferma sono due: le onde di Rayleigh e quelle di Love, dai nomi di coloro i quali, per primi, ne hanno previsto e descritto il carattere.

Tra le varie caratteristiche delle onde superficiali, per brevità e snellezza, in questa sede basterà ricordare che:

- la loro ampiezza decrementa in modo esponenziale con la profondità e la loro propagazione interessa quindi un limitato spessore di terreno rispetto alle onde di corpo (longitudinali P e trasversali S);

- rispetto alle stesse onde di corpo la loro ampiezza è notevolmente maggiore e per questo motivo dominano tipicamente qualsiasi *dataset sismico* e spesso vengono indicate con l'espressione *ground roll*;

- le onde di Rayleigh si muovono su un piano radiale secondo un moto detto *retrogrado* ed hanno pertanto sia una componente verticale, sia una componente radiale, quest'ultima parallela alla direzione di propagazione dell'onda stessa;

- le onde di Love, viceversa, si muovono solamente su un piano orizzontale, con un'oscillazione la cui direzione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

Da quanto sopra detto, ne consegue che le onde di Love possono essere acquisite utilizzando solamente geofoni orizzontali disposti perpendicolarmente allo stendimento sismico, mentre le onde di Rayleigh possono essere acquisite sia con geofoni verticali (in questo modo si registra chiaramente la componente verticale), sia con geofoni orizzontali disposti parallelamente allo stendimento sismico (in maniera tale da registrare la componente radiale delle stesse).

Per quanto riguarda la generazione delle onde di superficie, va da sé che il tipo di sorgente dovrà essere differente, se per acquisire le onde di Love sarà necessaria una sorgente di taglio (ad esempio una traversina di legno colpita da una mazzata), nel caso delle onde di Rayleigh potrà essere utilizzata sia una forza verticale (la classica mazzata verticale), sia una sorgente esplosiva (es. cannoncino sismico).

In Figura 1 è riportato uno schema che illustra il modo di gestire i geofoni e le sorgenti a seconda del tipo di componente delle onde superficiali che si vuole acquisire (*fonte: Dal Moro G., 2012* ⁽⁴⁾); la successiva Tabella 4.1, infine, sintetizza quanto sopra descritto introducendo un acronimo, secondo la convenzione adottata da Herrmann (2003) ⁽⁵⁾, molto utile sia

⁽⁴⁾ Dal Moro G. (2012) – *Onde di superficie in geofisica applicata – acquisizione ed analisi secondo le tecniche MASW e HVSR*. Dario Flaccovio editore.

⁽⁵⁾ Herrmann R.B. (2003) – *Computer programs in seismology*. Open file (<http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/CPS330.html>).

nell'identificazione delle componenti di un sismogramma sintetico, sia per la denominazione dei file di acquisizione di campagna (*dataset*).

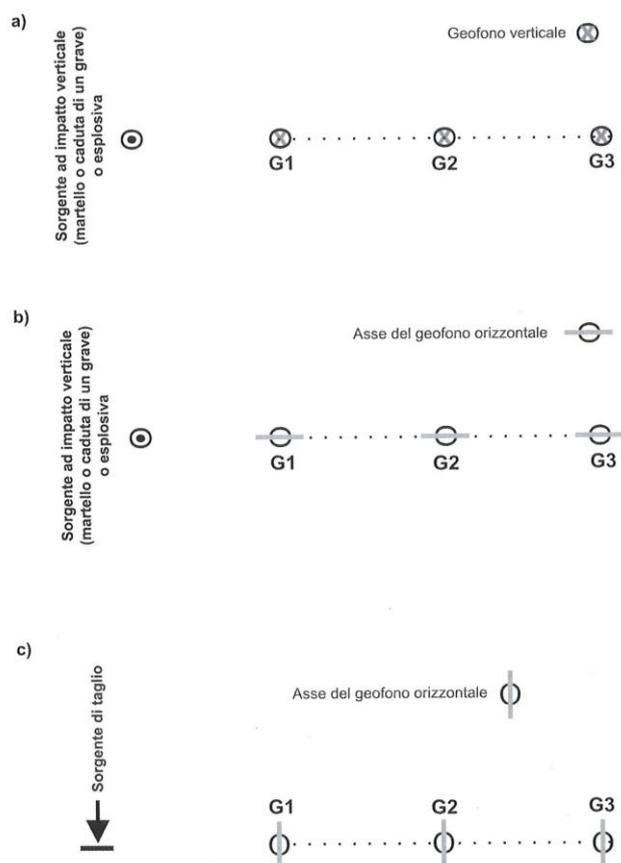


Fig. 1. Acquisizione dei dati per analisi MASW (visione dall'alto): a) geofoni verticali e sorgente verticale o esplosiva (componenti ZVF e ZEX – onde di Rayleigh); b) geofoni orizzontali in assetto radiale e sorgente verticale o esplosiva (componenti RVF e REX – onde di Rayleigh); c) geofoni orizzontali in assetto trasversale e sorgente di taglio (componente THF – onde di Love). Si veda anche la Tabella 4.1.

Acronimo	Sorgente	Geofono	Utilità
ZVF	Forza Verticale (Vertical Force): mazzata o caduta di grave	Verticale (Z) (Fig. 1a)	Acquisizione componente verticale onde di Rayleigh
ZEX	Sorgente esplosiva (EXplosive)	Verticale (Z) (Fig. 1a)	Acquisizione componente verticale onde di Rayleigh
RVF	Forza Verticale (Vertical Force): mazzata o caduta di grave	Orizzontale in assetto Radiale (R) (Fig. 1b) asse parallelo allo stendimento	Acquisizione componente radiale onde di Rayleigh
REX	Sorgente esplosiva (EXplosive)	Orizzontale in assetto Radiale (R) (Fig. 1b) asse parallelo allo stendimento	Acquisizione componente radiale onde di Rayleigh
THF	Sorgente Trasversale (o di taglio) (Horizontal Force)	Orizzontale in assetto Trasversale (T) (Fig. 1c) asse perpendicolare allo stendimento	Acquisizione onde di Love

Tabella 4.1. Cinque possibili acquisizioni utili per analisi MASW: la prima lettera dell'acronimo indica il tipo e l'assetto del geofono, la seconda e la terza il tipo di sorgente (Herrmann, 2003)

4.2. Indagine MASW – proprietà delle onde di superficie

L'acronimo MASW sta per *Multichannel Analysis of Surface Waves* (Analisi Multicanale delle Onde Superficiali); occorre quindi tenere presente che sia le onde di Rayleigh, sia le onde di Love sono onde di superficie ed è quindi importante non identificare l'indagine MASW con l'analisi delle sole onde di Rayleigh, ma sapere che la stessa MASW può essere eseguita utilizzando anche le onde di Love (si veda: *Dal Moro G., 2012; § 4.1*).

Nella procedura MASW, quindi, si analizza la propagazione delle onde di superficie; più specificatamente si analizza la dispersione delle onde di superficie, ovvero il fatto che frequenze diverse (e quindi lunghezze d'onda diverse) viaggiano a velocità diverse.

Il principio di base è piuttosto semplice: ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga.

Questa proprietà si chiama dispersione.

In particolare le lunghezze d'onda più ampie (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda del sottosuolo, in altri termini “sentono” gli strati più profondi; le piccole lunghezze d'onda (frequenze più alte), viceversa, dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale del terreno.

In altre parole, potremmo dire che le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale.

L'illustrazione di Fig. 2 mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie.

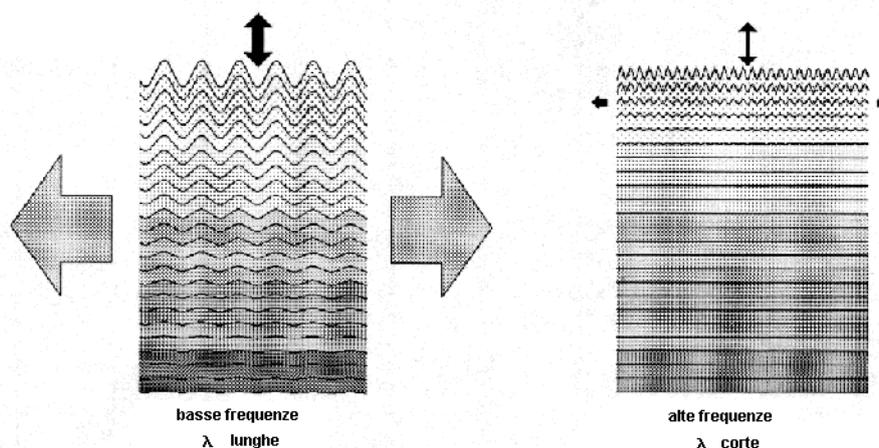


Fig. 2. Proprietà di dispersione delle onde superficiali

Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità.

Dal momento che generalmente la velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità (salvo i casi di inversione di velocità), ciò si riflette nel fatto che le frequenze più basse viaggino solitamente ad una velocità maggiore rispetto alle frequenze più alte.

La velocità delle onde S (V_s) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

4.3. Descrizione generale della procedura MASW

Sebbene le onde di superficie siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), attraverso l'analisi delle proprietà dispersive delle onde superficiali, specialmente nella procedura MASW classica/standard più utilizzata (acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh; ZVF, *cfr.* § 4.1) è ormai una delle pratiche più comuni in geofisica applicata.

L'intero processo di analisi della dispersione delle onde di superficie (di qualsiasi tipo, *cfr.* § 4.1) si sviluppa essenzialmente attraverso tre passi successivi (*si veda: Dal Moro G., 2012*):

1. acquisizione dei dati di campagna (registrazione dei *dataset*);
2. determinazione dello *spettro di velocità* dal quale vengono estratte le *curve di dispersione* delle onde superficiali (ovvero i grafici della velocità di fase rispetto alla frequenza);
3. inversione delle curve di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s (profilo 1D che descrive la variazione di V_s con la profondità).

In *Figura 3* vengono illustrati e riassunti i passaggi sopra descritti.

I dati (segnali sismici), come noto, sono acquisiti nel dominio del tempo (*offset-tempo*, $x-t$); tuttavia, per diverse operazioni, tra cui l'analisi della dispersione, sono molto più gestibili e comprensibili se portati e rappresentati nel dominio *frequenza-velocità* ($f-v$).

In tale dominio, infatti, è possibile determinare con precisione la velocità di ciascuna componente ed attraverso la determinazione dello spettro di velocità, è chiaramente più immediato e naturale comprendere le proprietà dispersive del segnale registrato.

La frequenza (f) e la velocità di fase (v) sono le due variabili, il cui legame costituisce la curva di dispersione.

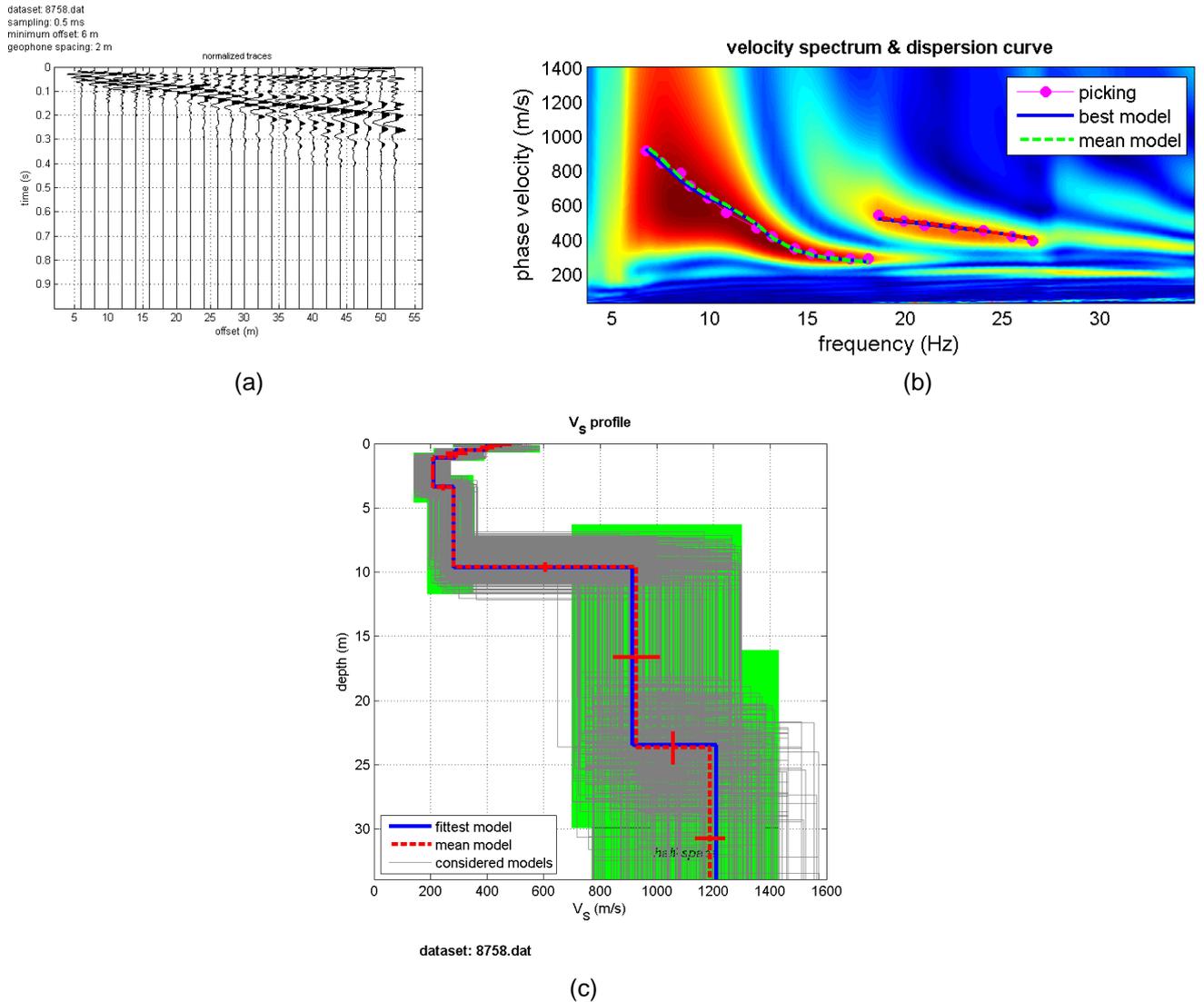


Fig. 3. Esempio di procedimento per analisi MASW (componente verticale ZVF onde di Rayleigh): a) acquisizione dei dati di campagna – sismogramma registrato; b) determinazione dello spetto di velocità ed estrazione delle curve di dispersione; c) inversione delle curve di dispersione – profilo verticale della V_s .

Il processo di inversione è quello che consente di passare dalla curva di dispersione al profilo verticale delle velocità delle onde di taglio (V_s); quest'operazione in realtà nasconde due rilevanti problemi che vanno a determinare la qualità e la correttezza del profilo delle V_s ottenuto:

- nell'approccio classico, il dato che si va ad invertire non è un dato oggettivo (quale è ad esempio lo spetto di velocità), bensì un dato interpretato (la curva di dispersione); un errore interpretativo (ad esempio un'interpretazione non corretta dei modi di propagazione delle onde) porta necessariamente ad un errore nel profilo delle V_s ricostruito;

- qualsiasi metodo di indagine non distruttivo contiene in sé una certa ambiguità; la non univocità o equivalenza dei modelli.

Tutto ciò impone che il processo di inversione sia trattato in maniera non superficiale e sommaria.

Una buona tecnica per ridurre la possibilità di errori di interpretazione, per esempio, è quella di procedere ad un'analisi congiunta delle onde di Rayleigh e delle onde di Love, magari utilizzando i soli geofoni orizzontali per acquisire sia la componente radiale delle onde di Rayleigh (RVF), sia la componente THF (onde di Love) (si veda: Dal Moro G., 2012, cfr. § 4.1).

4.4. Acquisizione delle onde di Rayleigh (componente ZVF) - Strumentazione

Le onde di Rayleigh sono facilmente generate da una sorgente ad impatto verticale (classica mazzata o caduta di un grave) o da un cannoncino sismico e vengono registrate tramite comuni geofoni a componente verticale ed a bassa frequenza (4,5 Hz), disposti secondo un classico stendimento sismico lineare (Fig. 4).

La distanza tra la sorgente e ciascun geofono è detta *offset*; ogni traccia registrata ha quindi un suo offset. La distanza tra la sorgente ed il geofono più vicino è detta offset minimo (*minimum offset*).

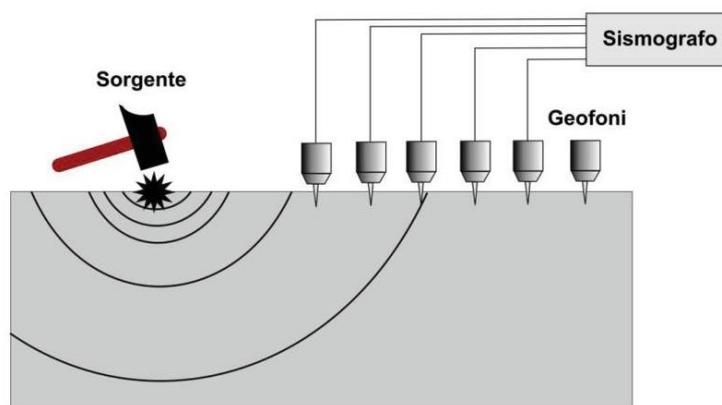


Fig. 4. Stendimento sismico: generazione di onde di Rayleigh tramite sorgente ad impatto verticale e registrazione della componente verticale ZVF per mezzo di geofoni verticali.

Nel caso in oggetto, l'acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- sismografo GEOMETRICS GEODE a 24 canali, le cui caratteristiche tecniche sono riportate al paragrafo 3.2;
- sorgente energizzante (mazza di massa pari a 6 kg su piastra metallica di battuta);
- trigger;
- apparecchiatura di ricezione (24 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz).

4.5. Analisi MASW in onde di Rayleigh (componente ZVF)

Nell'approccio classico/standard più utilizzato (acquisizione ed analisi della componente verticale delle onde di Rayleigh; ZVF, *cfr.* § 4.1), l'inversione della curva di dispersione viene generalmente realizzata attraverso una modellazione diretta, il cui scopo è quello di ricostruire un modello di andamento di velocità Vs con la profondità (profilo 1D di Vs) il più possibile rispondente allo spettro di velocità osservato.

Naturalmente, se l'accordo tra il modello identificato in fase di modellazione diretta e lo spettro è già ottimale, non servirà fare alcuna inversione e ci fermeremo al modello identificato; questo è un modo di procedere utilissimo, per esempio, nel caso di situazioni geologiche particolari o complesse (cioè dati sismici di ardua interpretazione).

È possibile altresì utilizzare il modello testato, le cui curve di dispersione calcolate risultano, nella nostra interpretazione, in ragionevole accordo con lo spettro di velocità osservato, come punto di partenza per l'inversione vera e propria.

Se si adotta tale approccio, infatti, tale modello è preso come modello di riferimento ed attraverso la ricerca di successive soluzioni in un intervallo di Vs e spessori attorno al modello iniziale, si procede ad una ottimizzazione del modello stesso.

Sulla base del modello ottenuto, è possibile quindi procedere al *picking* della curva di dispersione (cioè alla selezione dei punti che, nella nostra interpretazione, appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale); fare il *picking* di una curva di dispersione significa dare un senso allo spettro di velocità estraendo quindi informazioni sulle proprietà dispersive del mezzo.

Per procedere con il *picking* della curva di dispersione è necessario:

- identificare correttamente i modi di propagazione delle onde superficiali (modo fondamentale ed eventuali modi superiori);
- selezionare i punti che riteniamo appartenere correttamente ad una curva di dispersione associata ad un determinato modo di propagazione; tale operazione può essere più semplice se partiamo da un modello già definito, attraverso la procedura della modellazione diretta.

In *Figura 5* viene riportato un esempio di modellazione diretta e *picking* delle curve di dispersione, riferito al caso reale illustrato in *Figura 3* (*cfr.* § 4.3), caratterizzato dalla presenza di un modo fondamentale ed un primo modo superiore.

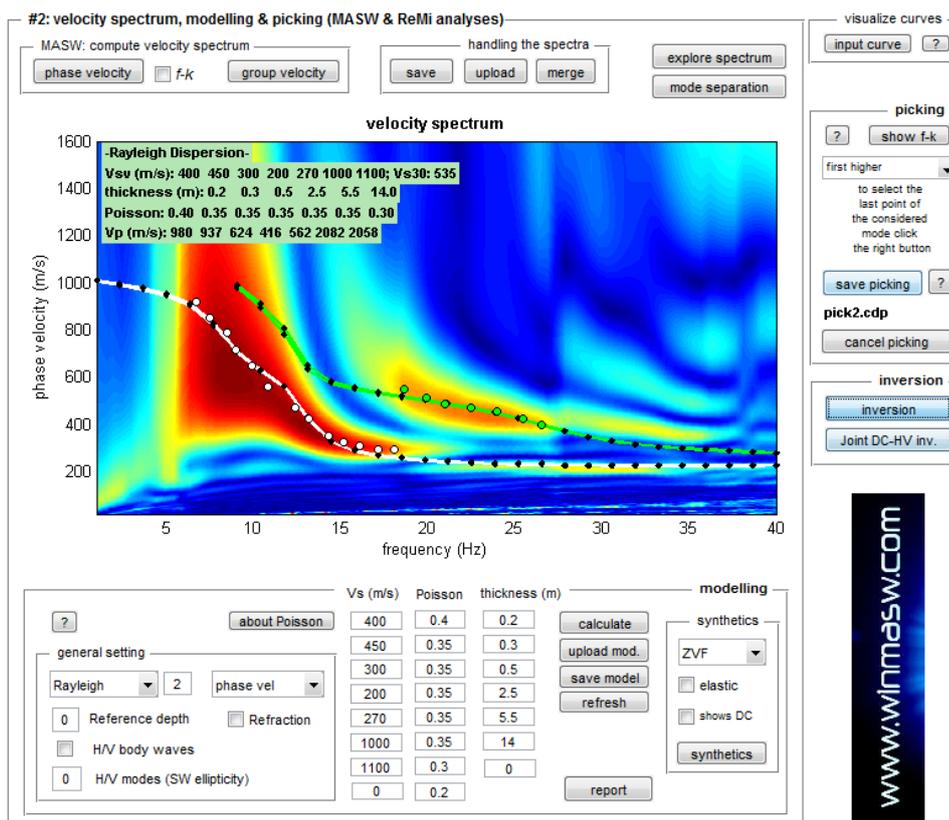


Fig. 5. Esempio di modellazione diretta e picking delle curve di dispersione (componente verticale ZVF onde di Rayleigh): nella parte bassa della schermata sono presenti i parametri da modificare per impostare ed ottimizzare il modello; nella parte superiore è mostrato lo spettro di velocità sul quale sono riportate le curve di dispersione calcolate in base al modello creato ed il picking delle stesse curve eseguito manualmente.

Uno dei rischi maggiori nell'analisi di *dataset* della sola componente verticale delle onde di Rayleigh (ZVF), nel caso di assenza del modo fondamentale nello spettro di velocità, è quello di confondere un qualsiasi modo superiore per il fondamentale; altri errori di interpretazione possono essere generati quando, per esempio, nello spettro più modi si uniscono a formare quello che può essere erroneamente considerato un unico modo.

L'identificazione e il *picking* della curva di dispersione sono chiaramente operazioni d'importanza cruciale per il risultato finale.

L'utente deve avere già sviluppato una buona esperienza per poter effettuare con sicurezza tali operazioni; un'erronea interpretazione del profilo della curva e/o un'attribuzione sbagliata del modo possono portare a risultati approssimativi o addirittura assolutamente inconsistenti.

Una volta eseguito il *picking*, il passo successivo per ottenere il profilo verticale della V_s è quello dell'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata", anche se l'approccio consigliato è comunque quello della modellazione diretta (*si veda: Dal Moro G., 2012, cfr. § 4.1*).

L'intero processo di elaborazione (determinazione dello spettro di velocità, modellazione diretta, *picking* della curva di dispersione ed inversione) viene eseguito attraverso il software **WinMASW** della *Eliosoft* (cfr. § 4.7); in particolare l'inversione viene effettuata grazie all'utilizzo di una solida tecnica di ottimizzazione (algoritmi genetici), che richiede un notevole impegno delle risorse di calcolo del computer.

4.6. Tecnica e schema di acquisizione

Per la prova MASW in questione è stato effettuato uno stendimento (M1), ubicato nella zona d'interesse, come riportato in planimetria allegata (*all. 2*); per tale stendimento è stato scelto un interasse tra i geofoni pari a 1,5 m, per una lunghezza complessiva di 34,5 metri, analogo a quello eseguito per la rifrazione con onde P.

L'acquisizione dei dati sismici è stata eseguita utilizzando la tecnica definita di *stacking* (sommatoria) verticale, ovvero sommando più acquisizioni pertinenti allo stesso stendimento sismico; in pratica si tratta di eseguire, su ciascun punto di energizzazione, un numero *n* di battute che saranno sommate in un unico *dataset* di acquisizione.

In questa maniera si ottengono diversi *dataset* acquisiti con diversi *offset* (distanza sorgente-geofoni; cfr. § 4.4) e diversi *stacking* (numero di battute); ciò permetterà, nella successiva fase di elaborazione dei dati, di poter scegliere il dataset più adatto per la migliore restituzione dello spettro di velocità.

Nel caso specifico sono state effettuate 8 registrazioni, con *stacking* variabili (da 1 a 5 numero di battute), in 4 punti di energizzazione posizionati secondo il seguente schema:

- due tiri esterni ubicati rispettivamente alla distanza di - 4,5 m e - 7,5 m dal geofono G1;
- due tiri esterni ubicati rispettivamente alla distanza di + 4,5 m e + 7,5 m dal geofono G24;
- *offset* minimo = 4,5 m

La qualità delle registrazioni ottenute è stata generalmente buona.

4.7. Risultati della prova sismica MASW

In *allegato 5* sono riportati i risultati della prova MASW elaborata attraverso il programma **WinMASW** della *Eliosoft*.

In particolare in *figura 1* viene riportato il sismogramma acquisito durante la prova di campagna (*dataset*), con indicazione della distanza intergeofonica, dell'*offset* minimo e dell'intervallo di campionamento (*sampling*) utilizzati; in *figura 2* viene mostrato lo spettro di velocità e le curve di dispersione (relative al "picking", al "modello migliore" e al "modello medio").

Per quanto riguarda il modello di sottosuolo ricavato, in *figura 3* sono riportati, in colonna stratigrafica, per ogni orizzonte definito, i valori di velocità delle onde trasversali (V_s) e lo spessore dell'orizzonte stesso, mentre le successive *figure 4* e *5* mostrano i profili verticali (andamento con la profondità) delle velocità V_s , della densità stimata dei terreni e del modulo di taglio stimato.

Si potrà notare come in *figura 4* siano due i modelli presentati come soluzione: il modello "migliore" (in termini di minor *misfit*, cioè discrepanza tra curva osservata e calcolata) e un modello medio calcolato secondo un'operazione statistica nota come MPPD (Marginal Posterior Probability Density; *Dal Moro G. et al., 2006* ⁽⁶⁾); quest'ultimo è quello preso in considerazione come risultato finale (ad ogni modo i due modelli solitamente non differiscono in modo significativo).

Nella tabella riassuntiva di fondo pagina, infine, vengono riportati, per ogni singolo orizzonte sismico definito, i valori relativi a:

- quote di testa e di base;
- spessore;
- velocità V_s ricavata;
- velocità V_{s_x} calcolata alle diverse profondità (x);
- Densità stimata dei materiali;
- Modulo di taglio stimato.

Riguardo ai valori stimati per la Densità ed il Modulo di taglio, occorre tener presente che la dispersione delle onde di superficie dipende essenzialmente dalla V_s e dagli spessori degli strati (cioè dalla geometria); per tale motivo, dall'analisi delle onde di superficie non si possono avere solide informazioni sui valori di densità dei materiali e delle velocità V_p (e i conseguenti moduli elastici); i valori di densità forniti devono essere pertanto considerati solamente come stime largamente approssimative.

Tra i moduli elastici dei terreni, infine, l'unico che possiamo considerare come una buona stima del valore reale è il modulo di taglio (che non dipende dalla V_p).

Il valore del parametro V_{s_x} , calcolato alle diverse profondità (x), è ricavato utilizzando la stratigrafia di V_s e la seguente formula:

⁽⁶⁾ Dal Moro G. et al. (2006) – *Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Evaluation*.

$$V_{Sx} = \frac{x}{\sum_{i=1, N} h_i / V_i}$$

dove h_i e V_i indicano rispettivamente lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (m/s) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti.

Il valore di V_{Sx} calcolato per $x = H$ (profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/sec) corrisponde alla velocità equivalente (V_{Seq}) così come definita dal **D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” (capitolo 3 – comma 3.2.2)**.

Per terreni con profondità del substrato (H) superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro V_{S30} , ottenuto ponendo $H = 30$ m nella precedente espressione.

Sulla base delle specifiche indagini geofisiche eseguite (prova MASW) è stato possibile definire la categoria di sottosuolo propria del sito di intervento, in ottemperanza a quanto riportato dallo stesso **D.M. 17 gennaio 2018** e di seguito sintetizzato nella **Tabella 3.2.II** delle suddette norme:

Tab. 3.2.II - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

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 fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

C - Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

D - Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.

E - Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Lo stendimento sismico MASW ha permesso di individuare, in buona corrispondenza con i risultati della sismica a rifrazione in onde P, orizzonti sismici sovrapposti, caratterizzati, nell'ambito di circa 34 metri sotto il piano campagna, dalla seguente successione:

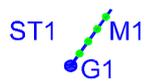
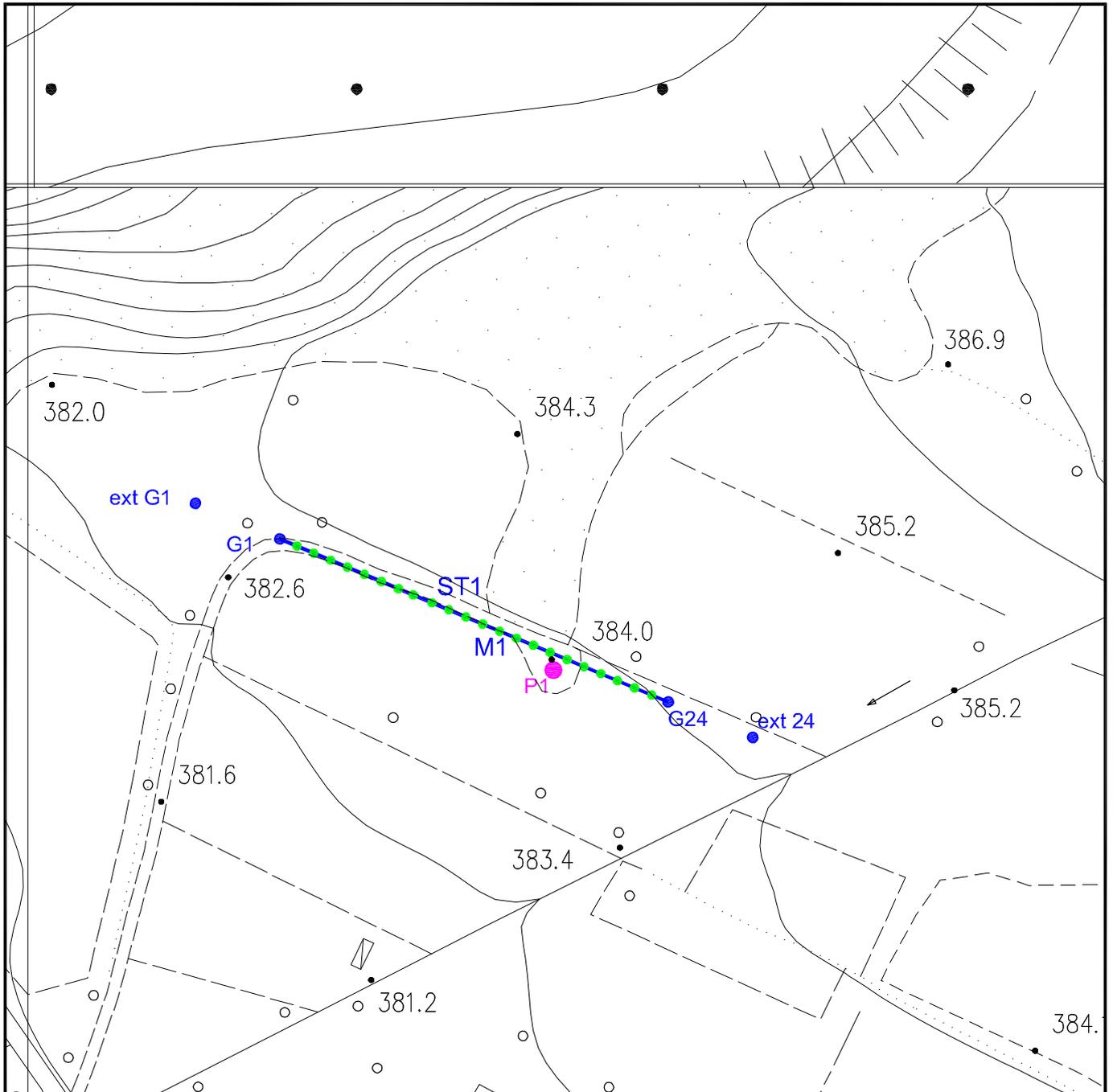
spessore orizzonte	velocità onde S	profondità progressiva dal piano di campagna
1,1 m	→ $V_s = 146$ m/sec	1,1 m
1,7 m	→ $V_s = 268$ m/sec	2,8 m
4,7 m	→ $V_s = 330$ m/sec	7,5 m
5,2 m	→ $V_s = 323$ m/sec	12,7 m
6,3 m	→ $V_s = 309$ m/sec	19,0 m
1,7 m	→ $V_s = 411$ m/sec	20,7 m
13,3 m	→ $V_s = 545$ m/sec	34,0 m
Profondità substrato > 30 m		$V_{s_{eq(30)}} = 350$ m/sec

Nel caso in esame non è stato individuato un substrato sismico di riferimento, caratterizzato da velocità (V_s) > **800** m/s, nei primi 30 metri di profondità ed il valore di V_{s30} è pari a **350** m/sec; sulla base di tali considerazioni, secondo quanto definito nelle NTC (*D.M. 17 gennaio 2018*), si assegna al sito d'interesse una **categoria di sottosuolo** di tipo **C**, corrispondente a: *depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Castelnuovo di Garfagnana, Febbraio 2020

PRO.GEO. s.r.l.
Dott. Geol. AMERINO PIERONI
PRO.GEO. s.r.l.
Via Valmaira, 14
55032 CASTELNUOVO GARFAGNANA (LU)
Part. IVA: 01998560468


Allegato 2: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE in scala 1:500



Stendimento sismico a rifrazione (onde P) - prova MASW



Prova penetrometrica dinamica superpesante (DPSH)

Allegato 3: PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente: Dott. Geol. Riccardo Biagioni
Cantiere: Variante urbanistica per adeguamento viabilità
Località: La Custia (Pieve Fosciana)

Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH TG 63-200 PAGANI

Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente	63,5 Kg
Altezza di caduta libera	0,75 m
Peso sistema di battuta	0,63 Kg
Diametro punta conica	51,00 mm
Area di base punta	20,43 cm ²
Lunghezza delle aste	1 m
Peso aste a metro	6,31 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0,40 m
Avanzamento punta	0,20 m
Numero colpi per punta	N(20)
Coeff. Correlazione	1,47
Rivestimento/fanghi	No
Angolo di apertura punta	90 °

PROVA P1

Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI
 Prova eseguita in data 27/01/2020
 Profondità prova 2,40 m
 Falda non rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm ²)	Res. dinamica (Kg/cm ²)	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm ²)	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm ²)
0,20	2	0,855	17,96	21,01	0,90	1,05
0,40	3	0,851	26,82	31,52	1,34	1,58
0,60	2	0,847	16,34	19,29	0,82	0,96
0,80	2	0,843	16,27	19,29	0,81	0,96
1,00	2	0,840	16,20	19,29	0,81	0,96
1,20	2	0,836	16,13	19,29	0,81	0,96
1,40	4	0,833	32,13	38,57	1,61	1,93
1,60	2	0,830	14,78	17,82	0,74	0,89
1,80	5	0,826	36,82	44,55	1,84	2,23
2,00	14	0,773	96,46	124,75	4,82	6,24
2,20	25	0,720	160,42	222,77	8,02	11,14
2,40	35	0,667	208,07	311,88	10,40	15,59

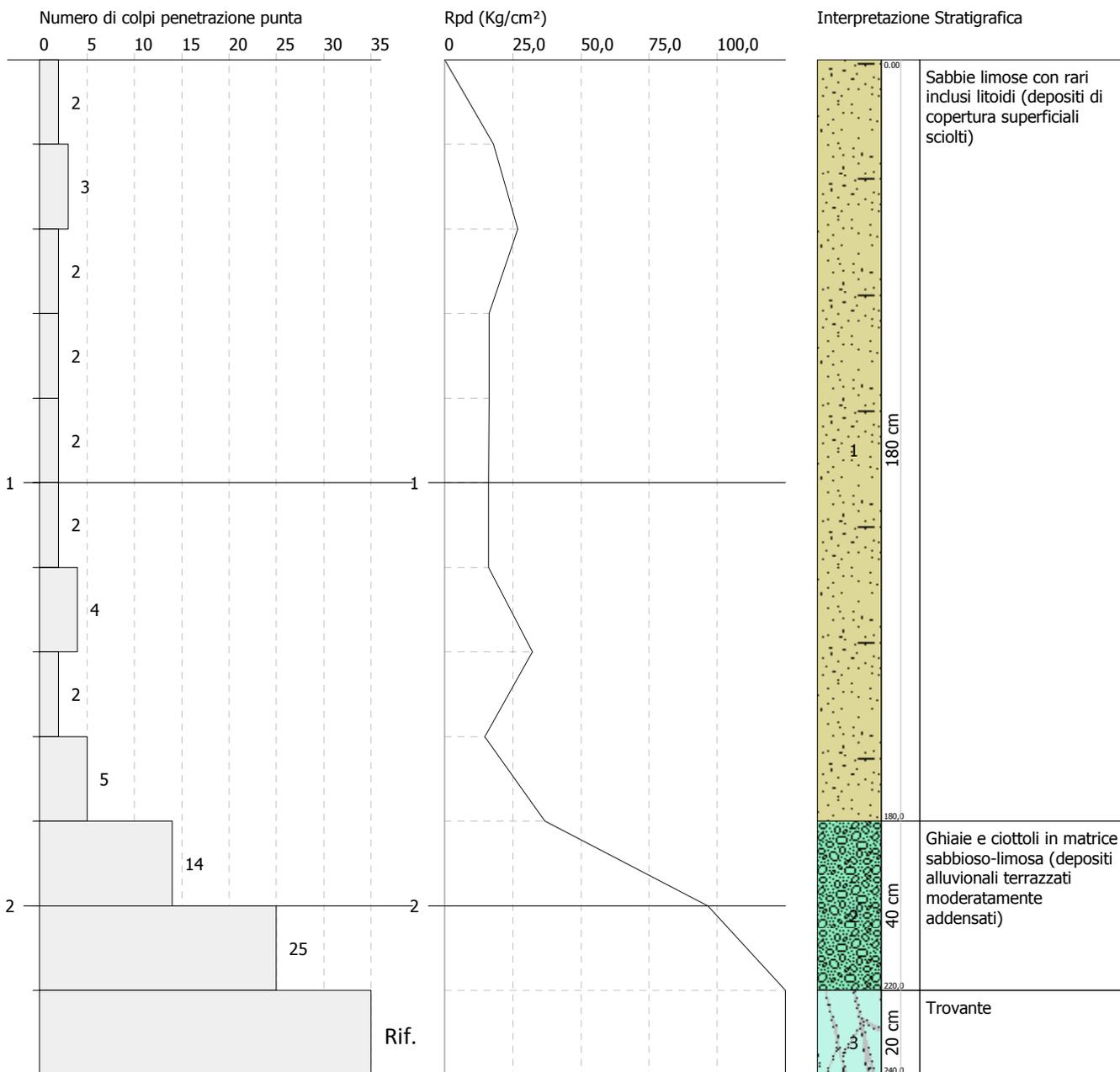
Prof. Strato (m)	NPDM	Rd (Kg/cm ²)	Tipo	Clay Fraction (%)	Peso unità di volume (t/m ³)	Peso unità di volume saturo (t/m ³)	Tensione efficace (Kg/cm ²)	Coeff. di correlaz. con Nspt	Nspt	Strato
1,8	2,67	25,63	Incoerente	0	1,49	1,88	0,13	1,47	3,92	1
2,2	19,5	173,76	Incoerente - coesivo	0	2,15	2,33	0,31	1,47	28,67	2
2,4	35	311,88	Incoerente - coesivo	0	2,5	2,5	0,38	1,47	51,45	3 - Trovante

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA P1
Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI

Committente: Dott. Geol. Riccardo Biagioni
 Cantiere: Variante urbanistica per adeguamento viabilità
 Località: La Custia (Pieve Fosciana)

Data: 27/01/2020

Scala 1:15



STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA P1

TERRENI COESIVI

Coesione non drenata

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Cu (Kg/cm ²)
Strato (2) Ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso- limosa (depositi alluvionali terrazzati moderatamente addensati)	28,67	1,80-2,20	Terzaghi-Peck	1,94
Strato (3) Trovante	51,45	2,20-2,40	Terzaghi-Peck	3,47

Qc (Resistenza punta Penetrometro Statico)

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Qc (Kg/cm ²)
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	Robertson (1983)	57,34
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	Robertson (1983)	102,90

Modulo Edometrico

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Eed (Kg/cm ²)
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	Stroud e Butler (1975)	131,54
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	Stroud e Butler (1975)	236,05

Modulo di Young

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Ey (Kg/cm ²)
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	Apollonia	286,70
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	Apollonia	514,50

Classificazione AGI

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	A.G.I. (1977)	ESTREM. CONSISTENTE

Peso unità di volume

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m ³)
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	Meyerhof	2,15
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	Meyerhof	2,50

Peso unità di volume saturo

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	Meyerhof	2,33
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	Meyerhof	2,50

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA P1

TERRENI INCOERENTI

Densità relativa

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Densità relativa (%)
Strato (1) Sabbie limose con rari inclusi litoidi (depositi di copertura superficiali sciolti)	3,92	0.00-1,80	3,92	Meyerhof 1957	45,53
Strato (2) Ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa (depositi alluvionali terrazzati moderatamente addensati)	28,67	1,80-2,20	28,67	Meyerhof 1957	100
Strato (3) Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Meyerhof 1957	100

Angolo di resistenza al taglio

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Sowers (1961)	29,1
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Sowers (1961)	36,03
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Sowers (1961)	42,41

Modulo di Young

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Bowles (1982) Sabbia Media	---
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Bowles (1982) Sabbia Media	218,35
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Bowles (1982) Sabbia Media	332,25

Modulo Edometrico

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	35,52
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	86,35
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	133,14

Classificazione AGI

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	A.G.I	SCIOLTO
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	A.G.I	MOLTO ADDENSATO

Peso unità di volume

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m ³)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Meyerhof ed altri	1,49
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Meyerhof ed altri	2,12
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Meyerhof ed altri	2,24

Peso unità di volume saturo

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m³)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,88
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Terzaghi-Peck 1948-1967	2,03
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Terzaghi-Peck 1948-1967	2,15

Modulo di Poisson

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Poisson
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	(A.G.I.)	0,35
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	(A.G.I.)	0,3
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	(A.G.I.)	0,25

Modulo di deformazione a taglio dinamico

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	G (Kg/cm²)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Ohsaki (Sabbie pulite)	234,75
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Ohsaki (Sabbie pulite)	1523,69
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Ohsaki (Sabbie pulite)	2640,07

Coefficiente spinta a Riposo $K_0 = \sigma_H / P_0$

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	K_0
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Navfac 1971-1982	0,73
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Navfac 1971-1982	5,42
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Navfac 1971-1982	8,39

Q_c (Resistenza punta Penetrometro Statico)

Descrizione	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Q_c (Kg/cm²)
Strato (1)	3,92	0.00-1,80	3,92	Robertson 1983	7,84
Strato (2)	28,67	1,80-2,20	28,67	Robertson 1983	57,34
Strato (3) - Trovante	51,45	2,20-2,40	51,45	Robertson 1983	102,90

Allegato 4: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P – ST1

Committente: DOTT. GEOL. RICCARDO BIAGIONI
Località: La Custia (Pieve Fosciana)
Data di esecuzione: 27.01.2020
Linea sismica: ST1

Sistema di acquisizione

SISMOGRAFO: Geometrics GEODE 24 canali

Caratteristiche tecniche

Registrazione: Configurabile da 3 a 24 canali
Risoluzione: 24 bit
Larghezza di banda di ingresso: 1,75 Hz – 20.000 Hz
Intervalli di campionamento: Selezionabili da 0,02 msec a 16 msec
Range dinamico di sistema: 144 dB (110 dB misurato a 2 msec)
Distorsione: 0,0005%
Accuratezza del trigger: 1/32 del passo di campionamento
Alimentazione: Batterie esterne a 12 Volt
Unità centrale di controllo: Collegamento con PC notebook

LaCustia_ST1 - TABELLA RISULTATI – modello tomografico

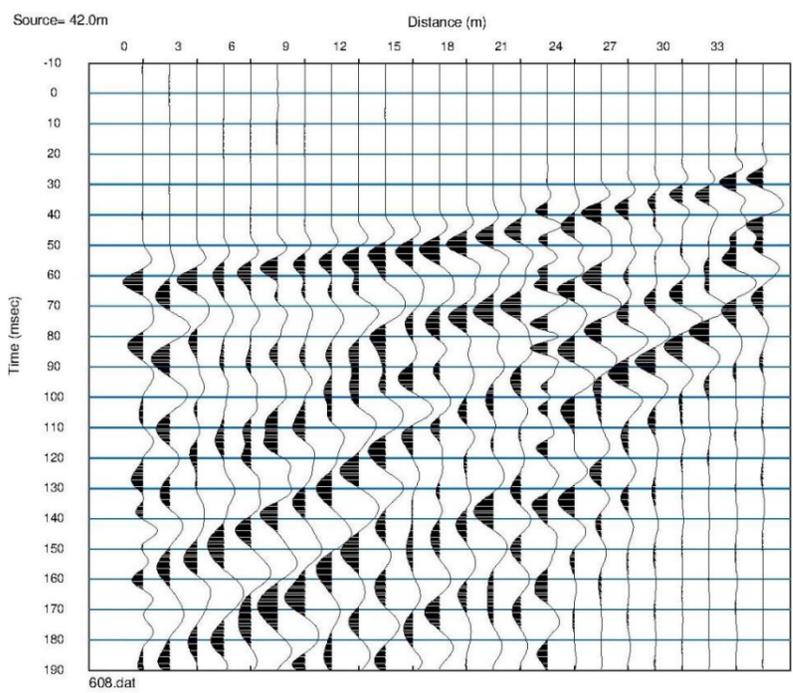
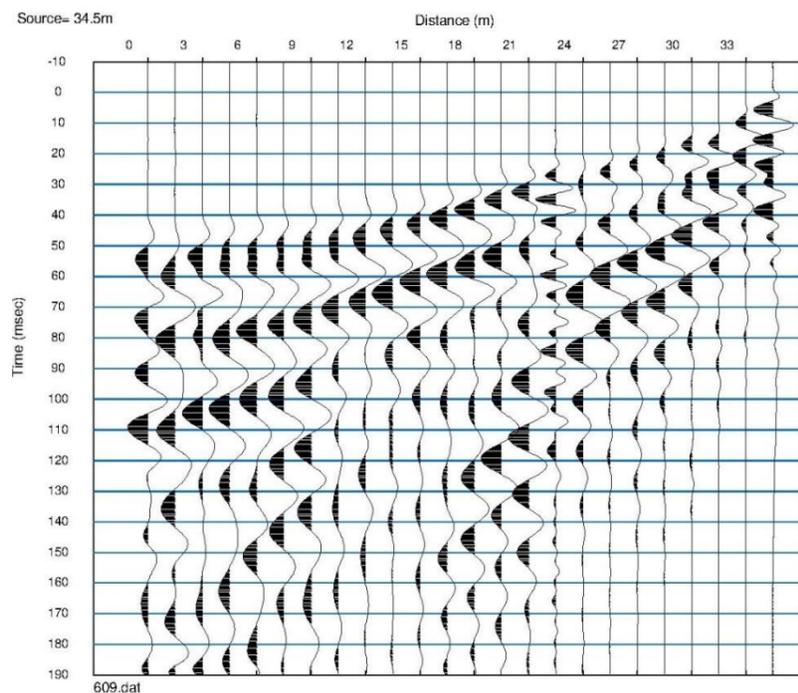
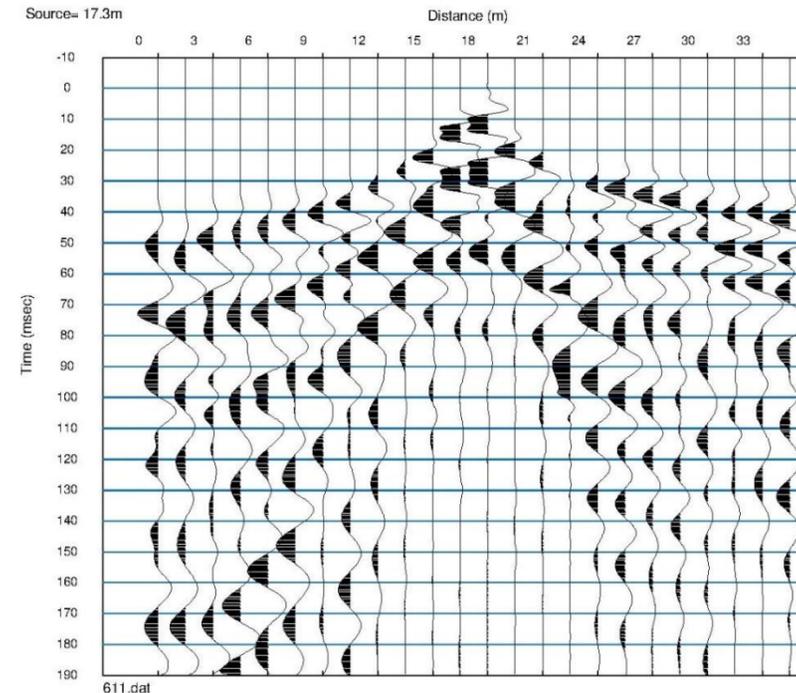
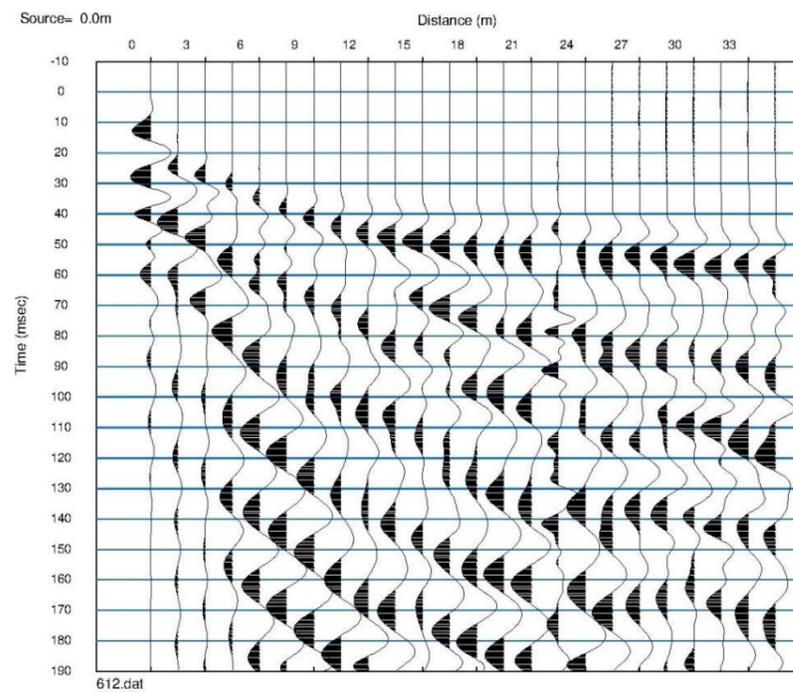
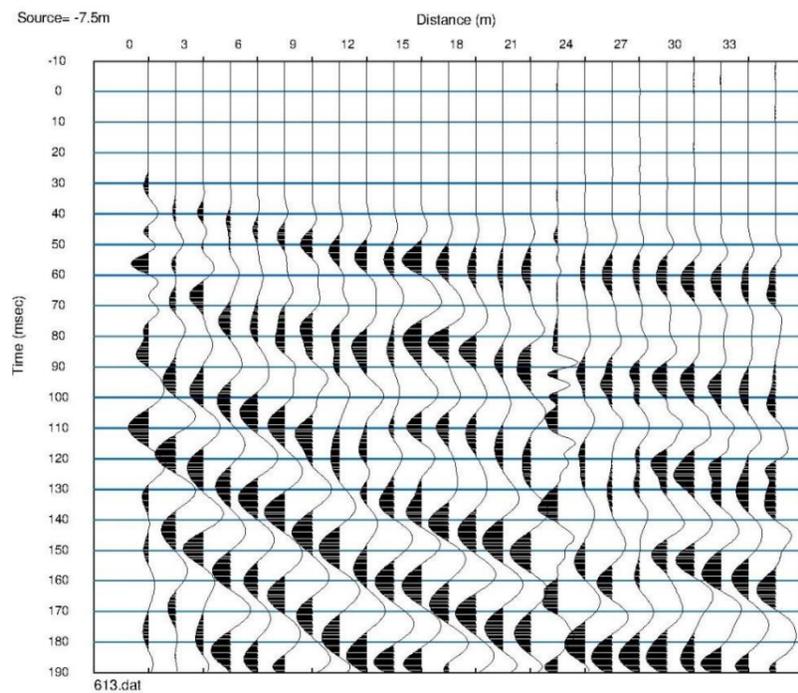
The spread contains 5 shotpoints and 24 geophones

SP	Elev	X-loc	Y-Loc	Depth
1	384.40	-7.50	0.00	0.00
2	384.00	0.00	0.00	0.00
3	383.70	17.25	0.00	0.00
4	383.90	34.50	0.00	0.00
5	384.20	42.00	0.00	0.00

Geo	Elev	X-loc	Y-Loc	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5
1	384.00	0.00	0.00	16.35 1	0.00 1	35.16 1	44.54 1	49.90 1
2	383.95	1.50	0.00	20.34 1	4.45 1	34.44 1	44.16 1	49.52 1
3	383.90	3.00	0.00	24.48 1	9.01 1	33.35 1	43.16 1	48.52 1
4	383.85	4.50	0.00	28.83 1	13.57 1	32.03 1	41.95 1	47.32 1
5	383.80	6.00	0.00	31.69 1	18.12 1	30.62 1	40.67 1	46.04 1
6	383.70	7.50	0.00	32.77 1	22.63 1	28.91 1	39.05 1	44.63 1
7	383.70	9.00	0.00	34.00 1	27.05 1	25.07 1	37.45 1	43.36 1
8	383.70	10.50	0.00	35.09 1	30.40 1	20.51 1	35.83 1	42.02 1
9	383.70	12.00	0.00	36.20 1	31.51 1	15.95 1	34.23 1	40.62 1
10	383.70	13.50	0.00	37.25 1	32.64 1	11.39 1	32.67 1	39.19 1
11	383.70	15.00	0.00	38.15 1	33.73 1	6.84 1	31.11 1	37.73 1
12	383.70	16.50	0.00	38.92 1	34.69 1	2.28 1	29.41 1	36.21 1
13	383.70	18.00	0.00	39.65 1	35.53 1	2.28 1	27.77 1	34.72 1
14	383.70	19.50	0.00	40.45 1	36.42 1	6.84 1	26.24 1	33.34 1
15	383.70	21.00	0.00	41.25 1	37.31 1	11.39 1	24.75 1	31.86 1
16	383.70	22.50	0.00	42.04 1	38.19 1	15.93 1	23.21 1	30.32 1
17	383.70	24.00	0.00	42.79 1	38.98 1	20.45 1	21.66 1	28.78 1
18	383.70	25.50	0.00	43.53 1	39.73 1	23.31 1	19.91 1	27.09 1
19	383.75	27.00	0.00	44.32 1	40.52 1	24.19 1	18.29 1	25.48 1
20	383.75	28.50	0.00	44.95 1	41.16 1	24.88 1	16.56 1	23.74 1
21	383.80	30.00	0.00	45.66 1	41.87 1	25.67 1	12.34 1	22.10 1
22	383.80	31.50	0.00	46.49 1	42.70 1	26.57 1	8.18 1	20.51 1
23	383.85	33.00	0.00	47.45 1	43.67 1	27.59 1	4.09 1	19.02 1
24	383.90	34.50	0.00	48.32 1	44.54 1	28.62 1	0.00 1	17.52 1

X (m)	Y (m)	V (m/s)	X (m)	Y (m)	V (m/s)	X (m)	Y (m)	V (m/s)
0,0	384,0	336,6	6,0	380,5	439,7	13,5	383,5	329,2
0,0	383,8	339,9	6,0	379,8	1090,2	13,5	383,2	329,2
0,0	383,5	377,2	6,0	379,1	1112,4	13,5	382,9	329,2
0,0	383,2	391,6	6,0	378,4	1118,7	13,5	382,6	329,2
0,0	382,8	395,9	6,0	377,6	1148,3	13,5	382,3	329,3
0,0	382,5	396,9	6,0	376,9	1190,0	13,5	381,9	329,8
0,0	382,2	397,8	6,0	376,2	1283,6	13,5	381,2	364,9
0,0	381,4	398,9	7,5	383,7	329,1	13,5	380,5	901,3
0,0	380,7	413,6	7,5	383,5	329,2	13,5	379,8	1123,0
0,0	379,9	831,4	7,5	383,2	330,2	13,5	379,0	1124,4
0,0	379,2	1120,6	7,5	382,9	331,5	13,5	378,3	1158,3
0,0	378,4	1164,0	7,5	382,6	333,3	13,5	377,6	1228,1
0,0	377,7	1240,4	7,5	382,3	333,8	13,5	376,9	1303,2
0,0	376,9	1296,3	7,5	381,9	335,4	13,5	376,2	1304,2
0,0	376,2	1326,2	7,5	381,2	336,5	15,0	383,7	329,1
1,5	384,0	329,1	7,5	380,5	506,5	15,0	383,5	329,2
1,5	383,8	329,1	7,5	379,8	1087,6	15,0	383,2	329,2
1,5	383,5	350,7	7,5	379,0	1119,8	15,0	382,9	329,2
1,5	383,1	358,3	7,5	378,3	1156,7	15,0	382,6	329,2
1,5	382,8	370,9	7,5	377,6	1183,2	15,0	382,3	329,2
1,5	382,5	371,8	7,5	376,9	1202,6	15,0	381,9	329,2
1,5	382,1	372,6	7,5	376,2	1268,7	15,0	381,2	394,0
1,5	381,4	374,0	9,0	383,7	329,1	15,0	380,5	978,4
1,5	380,6	385,9	9,0	383,5	329,9	15,0	379,8	1161,1
1,5	379,9	922,8	9,0	383,2	331,8	15,0	379,0	1162,1
1,5	379,1	1079,7	9,0	382,9	332,3	15,0	378,3	1175,6
1,5	378,4	1110,4	9,0	382,6	333,6	15,0	377,6	1216,9
1,5	377,7	1178,9	9,0	382,3	334,3	15,0	376,9	1313,0
1,5	376,9	1269,4	9,0	381,9	335,3	15,0	376,2	1314,0
1,5	376,2	1324,6	9,0	381,2	336,4	16,5	383,7	329,1
3,0	383,9	329,1	9,0	380,5	602,0	16,5	383,5	329,1
3,0	383,7	329,1	9,0	379,8	1081,9	16,5	383,2	329,1
3,0	383,4	336,1	9,0	379,0	1110,4	16,5	382,9	329,1
3,0	383,1	338,0	9,0	378,3	1168,0	16,5	382,6	329,1
3,0	382,7	355,0	9,0	377,6	1223,1	16,5	382,3	329,1
3,0	382,4	355,7	9,0	376,9	1228,5	16,5	381,9	329,1
3,0	382,1	356,6	9,0	376,2	1262,0	16,5	381,2	446,5
3,0	381,3	357,8	10,5	383,7	329,1	16,5	380,5	1060,0
3,0	380,6	378,4	10,5	383,5	330,4	16,5	379,8	1196,4
3,0	379,9	1017,7	10,5	383,2	331,7	16,5	379,0	1197,4
3,0	379,1	1072,1	10,5	382,9	332,2	16,5	378,3	1200,0
3,0	378,4	1076,5	10,5	382,6	332,9	16,5	377,6	1212,6
3,0	377,6	1135,8	10,5	382,3	333,7	16,5	376,9	1312,5
3,0	376,9	1227,0	10,5	381,9	334,9	16,5	376,2	1321,8
3,0	376,2	1317,8	10,5	381,2	339,1	18,0	383,7	329,1
4,5	383,9	329,1	10,5	380,5	709,5	18,0	383,5	329,1
4,5	383,7	329,1	10,5	379,8	1083,0	18,0	383,2	329,1
4,5	383,4	329,9	10,5	379,0	1102,2	18,0	382,9	329,1
4,5	383,0	333,2	10,5	378,3	1157,9	18,0	382,6	329,1
4,5	382,7	344,6	10,5	377,6	1243,8	18,0	382,3	329,1
4,5	382,4	345,2	10,5	376,9	1255,9	18,0	381,9	329,1
4,5	382,1	347,2	10,5	376,2	1267,1	18,0	381,2	526,1
4,5	381,3	348,1	12,0	383,7	329,1	18,0	380,5	1135,8
4,5	380,6	399,6	12,0	383,5	329,8	18,0	379,8	1219,6
4,5	379,8	1073,2	12,0	383,2	330,0	18,0	379,0	1220,6
4,5	379,1	1088,3	12,0	382,9	330,3	18,0	378,3	1221,6
4,5	378,4	1088,3	12,0	382,6	330,7	18,0	377,6	1222,6
4,5	377,6	1130,7	12,0	382,3	331,1	18,0	376,9	1307,4
4,5	376,9	1197,0	12,0	381,9	332,1	18,0	376,2	1339,9
4,5	376,2	1302,9	12,0	381,2	347,5	19,5	383,7	329,1
6,0	383,8	329,1	12,0	380,5	813,1	19,5	383,5	329,1
6,0	383,6	329,1	12,0	379,8	1095,8	19,5	383,2	329,1
6,0	383,3	329,2	12,0	379,0	1103,6	19,5	382,9	329,1
6,0	383,0	332,3	12,0	378,3	1151,2	19,5	382,6	329,1
6,0	382,7	336,4	12,0	377,6	1239,6	19,5	382,3	329,1
6,0	382,3	336,9	12,0	376,9	1282,2	19,5	381,9	329,1
6,0	382,0	339,6	12,0	376,2	1285,0	19,5	381,2	620,0
6,0	381,3	340,5	13,5	383,7	329,1	19,5	380,5	1187,6

X (m)	Y (m)	V (m/s)	X (m)	Y (m)	V (m/s)	X (m)	Y (m)	V (m/s)
19,5	379,8	1232,8	27,0	382,9	333,7	33,0	377,6	1398,0
19,5	379,0	1233,8	27,0	382,6	334,0	33,0	376,9	1450,3
19,5	378,3	1234,8	27,0	382,3	334,4	33,0	376,2	1450,3
19,5	377,6	1236,9	27,0	382,0	491,7	34,5	383,9	366,0
19,5	376,9	1307,1	27,0	381,2	1134,8	34,5	383,7	381,7
19,5	376,2	1363,1	27,0	380,5	1234,2	34,5	383,4	382,8
21,0	383,7	330,6	27,0	379,8	1235,2	34,5	383,1	383,8
21,0	383,5	330,8	27,0	379,1	1236,2	34,5	382,7	384,9
21,0	383,2	331,1	27,0	378,3	1237,2	34,5	382,4	385,9
21,0	382,9	331,3	27,0	377,6	1304,1	34,5	382,1	988,7
21,0	382,6	331,6	27,0	376,9	1417,7	34,5	381,3	1069,0
21,0	382,3	331,8	27,0	376,2	1450,3	34,5	380,6	1188,1
21,0	381,9	332,1	28,5	383,8	345,2	34,5	379,9	1188,1
21,0	381,2	725,0	28,5	383,6	345,8	34,5	379,1	1221,7
21,0	380,5	1217,5	28,5	383,3	346,3	34,5	378,4	1268,3
21,0	379,8	1240,2	28,5	382,9	346,9	34,5	377,6	1428,8
21,0	379,0	1241,2	28,5	382,6	347,4	34,5	376,9	1450,3
21,0	378,3	1242,2	28,5	382,3	348,0	34,5	376,2	1450,3
21,0	377,6	1245,5	28,5	382,0	568,4			
21,0	376,9	1314,0	28,5	381,2	1184,9			
21,0	376,2	1385,8	28,5	380,5	1228,2			
22,5	383,7	332,1	28,5	379,8	1229,2			
22,5	383,5	332,6	28,5	379,1	1230,5			
22,5	383,2	333,1	28,5	378,3	1234,3			
22,5	382,9	333,6	28,5	377,6	1321,2			
22,5	382,6	334,2	28,5	376,9	1441,1			
22,5	382,3	334,8	28,5	376,2	1450,3			
22,5	381,9	345,5	30,0	383,8	360,7			
22,5	381,2	842,3	30,0	383,6	361,6			
22,5	380,5	1234,1	30,0	383,3	362,5			
22,5	379,8	1243,9	30,0	383,0	363,4			
22,5	379,0	1244,9	30,0	382,7	364,3			
22,5	378,3	1245,9	30,0	382,3	365,1			
22,5	377,6	1252,5	30,0	382,0	661,5			
22,5	376,9	1326,3	30,0	381,3	1203,2			
22,5	376,2	1411,1	30,0	380,5	1213,8			
24,0	383,7	330,6	30,0	379,8	1218,9			
24,0	383,5	330,8	30,0	379,1	1224,4			
24,0	383,2	331,1	30,0	378,4	1233,5			
24,0	382,9	331,5	30,0	377,6	1325,5			
24,0	382,6	332,0	30,0	376,9	1449,8			
24,0	382,3	332,6	30,0	376,2	1450,3			
24,0	381,9	375,6	31,5	383,8	367,3			
24,0	381,2	959,8	31,5	383,6	368,3			
24,0	380,5	1240,7	31,5	383,3	369,3			
24,0	379,8	1243,8	31,5	383,0	370,3			
24,0	379,0	1244,8	31,5	382,7	371,3			
24,0	378,3	1245,8	31,5	382,3	372,3			
24,0	377,6	1263,2	31,5	382,0	787,7			
24,0	376,9	1350,4	31,5	381,3	1177,6			
24,0	376,2	1434,4	31,5	380,5	1195,7			
25,5	383,7	329,4	31,5	379,8	1203,6			
25,5	383,5	329,4	31,5	379,1	1221,7			
25,5	383,2	329,5	31,5	378,4	1233,5			
25,5	382,9	329,7	31,5	377,6	1348,3			
25,5	382,6	330,0	31,5	376,9	1450,3			
25,5	382,3	330,4	31,5	376,2	1450,3			
25,5	381,9	425,0	33,0	383,9	366,7			
25,5	381,2	1060,0	33,0	383,7	372,5			
25,5	380,5	1239,0	33,0	383,4	373,5			
25,5	379,8	1240,0	33,0	383,0	374,5			
25,5	379,0	1241,0	33,0	382,7	375,5			
25,5	378,3	1242,0	33,0	382,4	376,6			
25,5	377,6	1280,3	33,0	382,1	914,7			
25,5	376,9	1384,6	33,0	381,3	1119,3			
25,5	376,2	1447,2	33,0	380,6	1188,1			
27,0	383,8	333,0	33,0	379,8	1189,3			
27,0	383,6	333,2	33,0	379,1	1221,7			
27,0	383,3	333,4	33,0	378,4	1233,5			



**PROSPEZIONE SISMICA
A RIFRAZIONE CON ONDE P**

Località: La Custia (Pieve Fosciana)

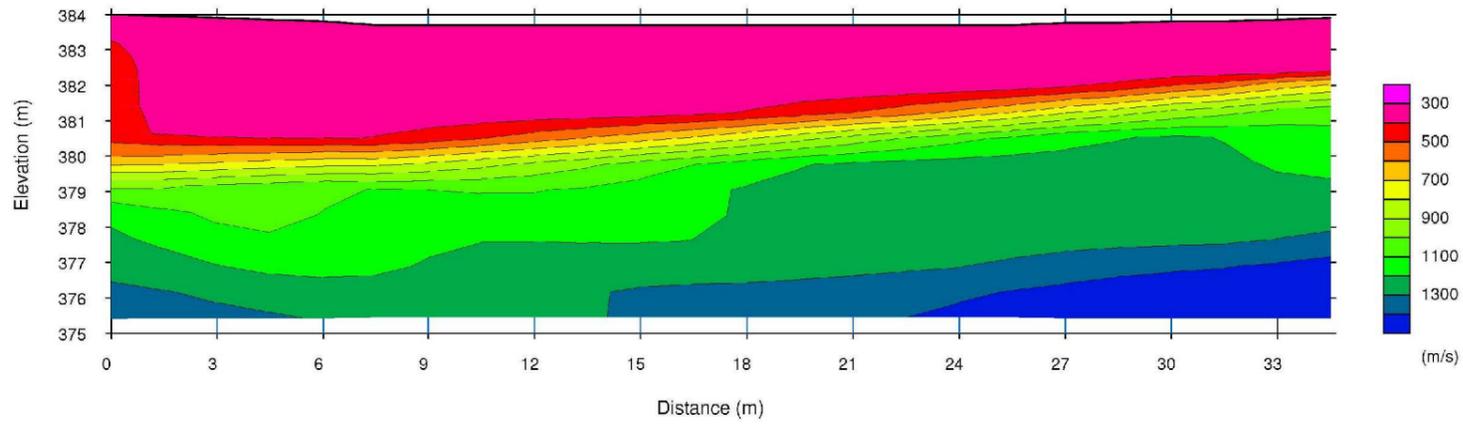
Committente: Dott. Geol. Riccardo Biagioni

Cantiere: Variante urbanistica
per adeguamento viabilità

Sismogrammi

All. 4

Gennaio 2020



Modello tomografico 2D - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:200

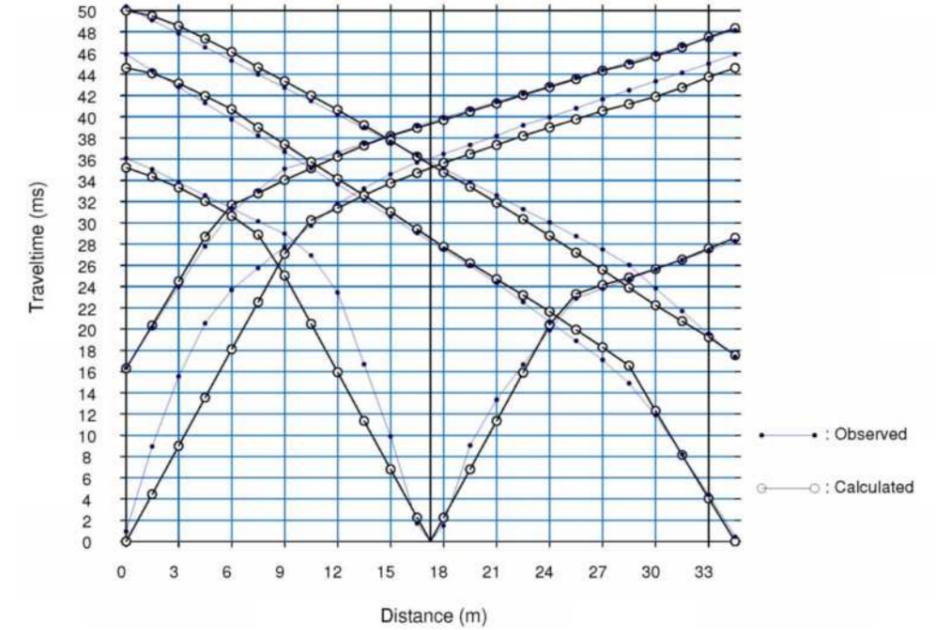
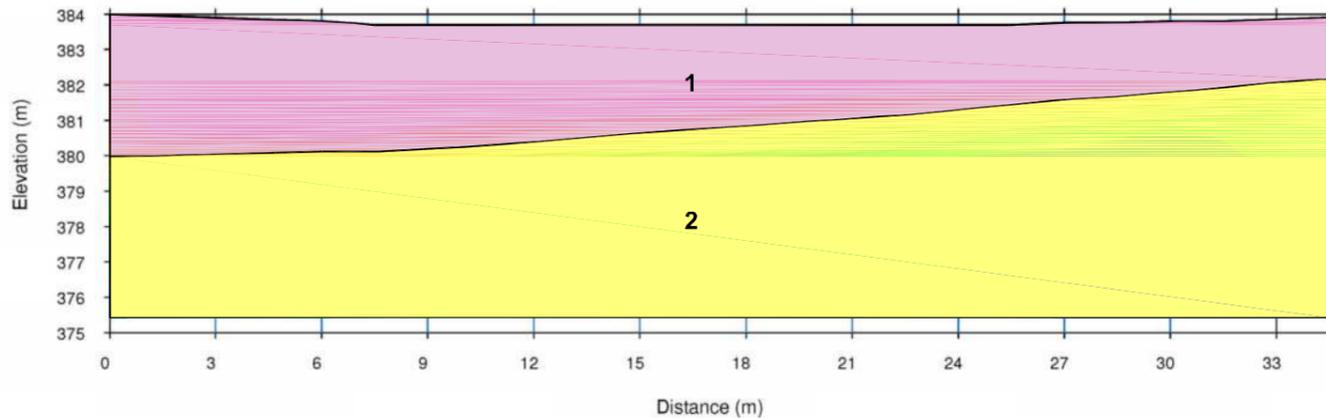
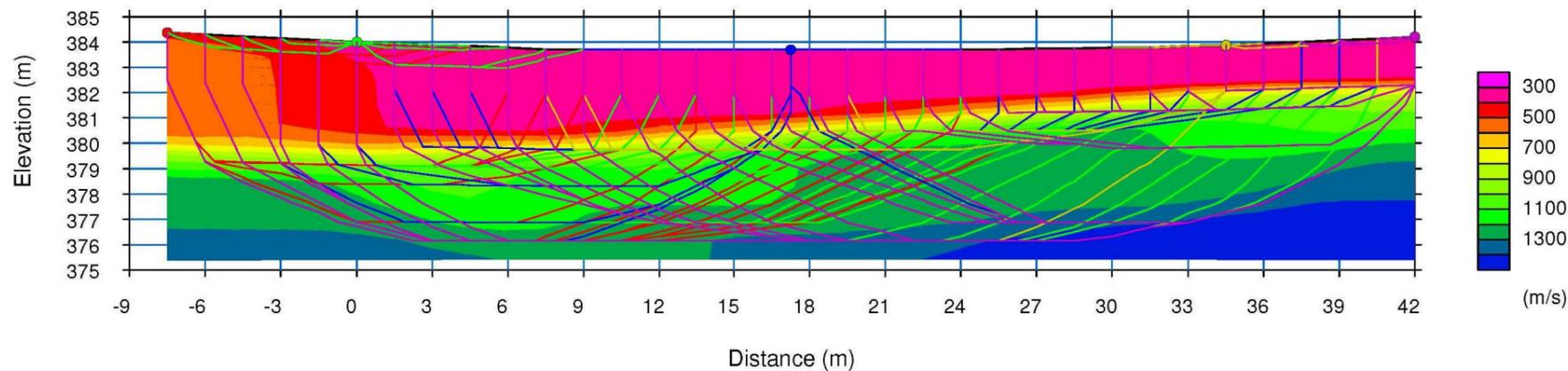


Grafico delle domocrone misurate e calcolate in scala 1:400

- 1** Depositi alluvionali terrazzati sciolti/poco addensati (sabbie limose con ghiaie e ciottoli poco diffusi)
- 2** Depositi alluvionali terrazzati prevalentemente grossolani da poco a moderatamente addensati (ghiaie e ciottoli eterometrici in matrice sabbioso-limosa)



Sezione sismostratigrafica in scala 1:200



Modello tomografico esteso - Percorso dei raggi in scala 1:250

PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P

Località: La Custia (Pieve Fosciana)

Committente: Dott. Geol. Riccardo Biagioni

Cantiere: Variante urbanistica per adeguamento viabilità

SEZIONE SISMICA ST1

All. 4

Gennaio 2020

dataset: 616.dat
 sampling: 0.5 ms
 minimum offset: 7.5 m
 geophone spacing: 1.5 m

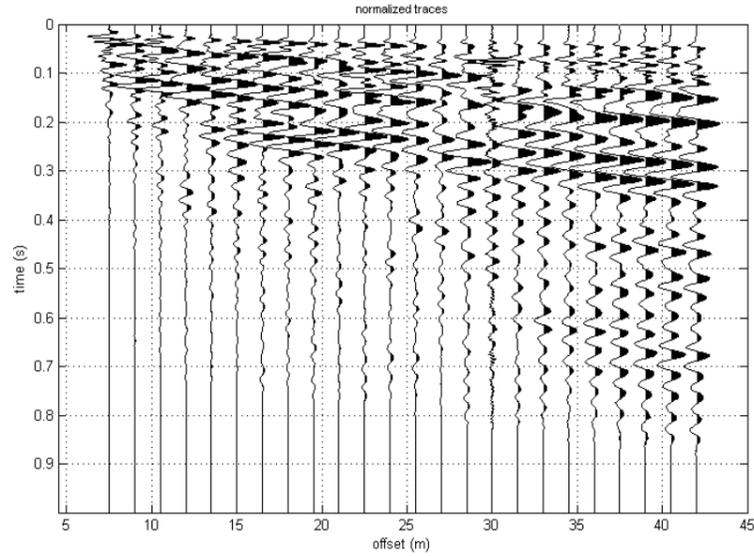


Figura 1 - Dataset - sismogramma registrato

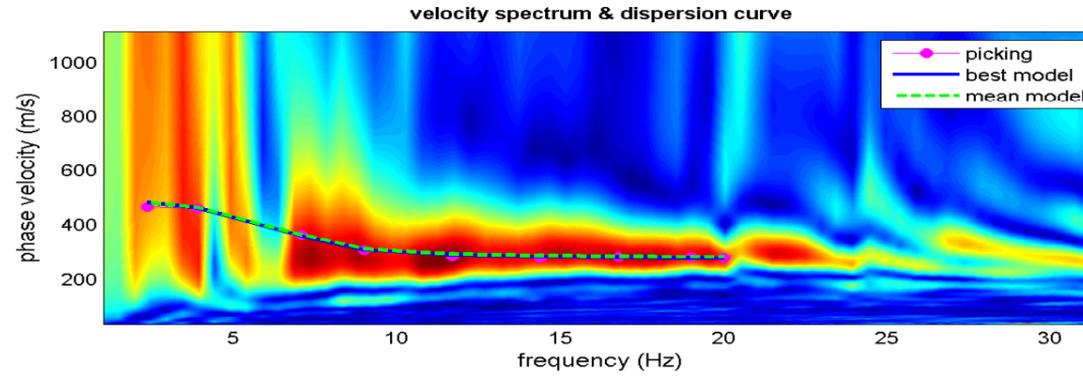


Figura 2 - Spettro di velocità e curve di dispersione

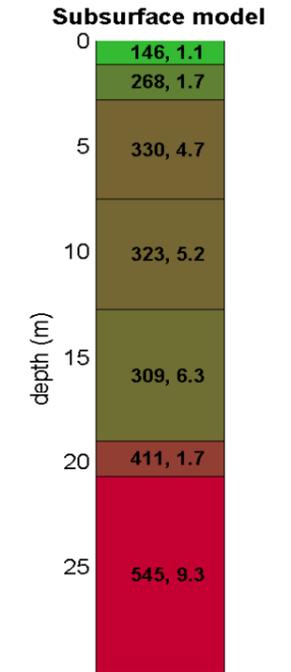
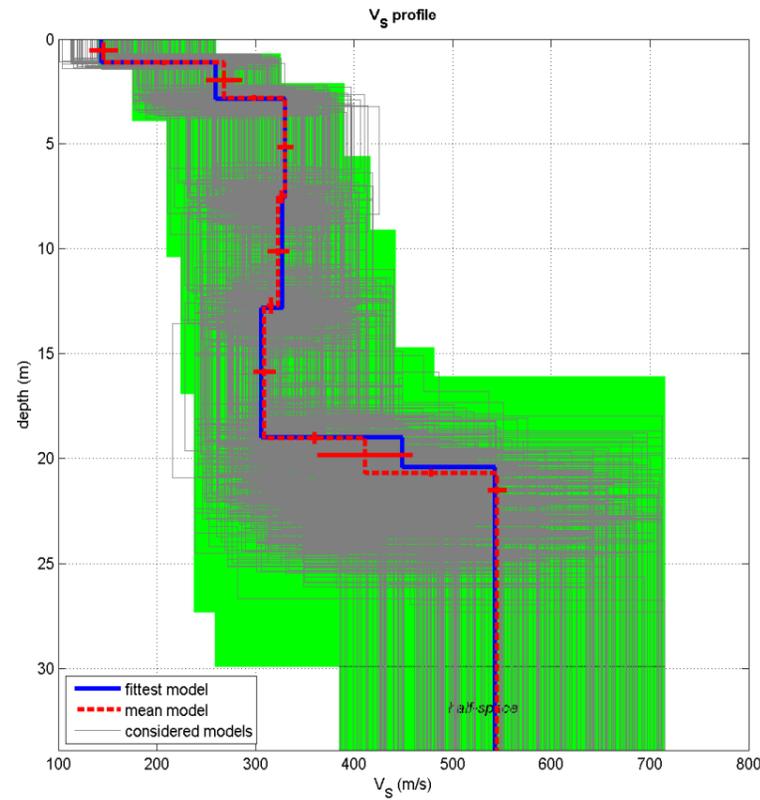


Figura 3 - Modello di sottosuolo ricavato
 Vs (m/sec) - Spessore (m)



dataset: 616.dat

Figura 4 - Profilo verticale delle velocità Vs

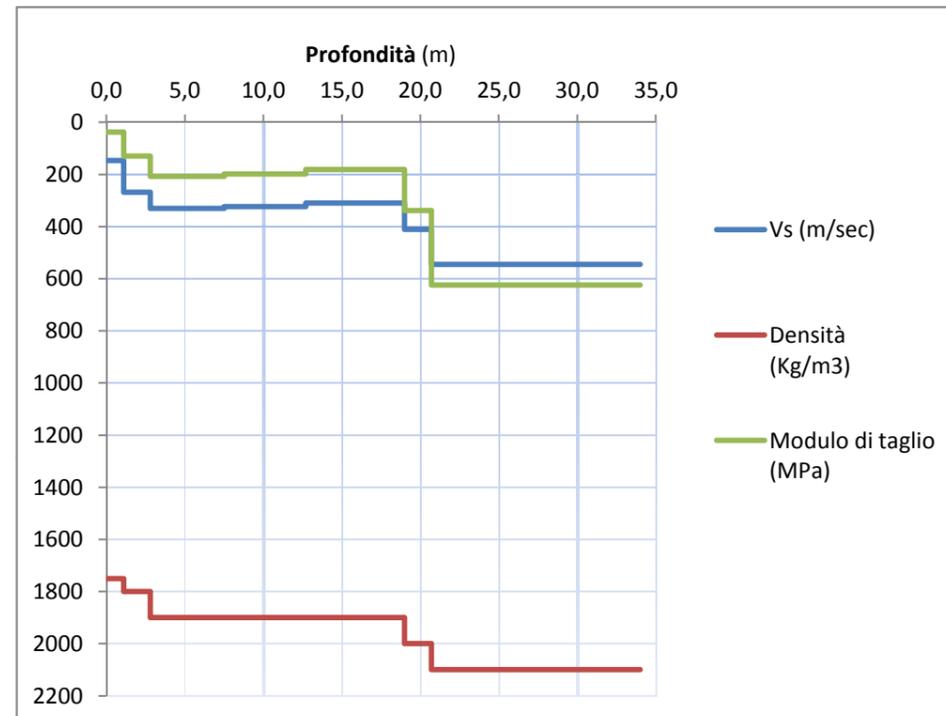


Figura 5 - Modello di sottosuolo ricavato
 (Profilo di Velocità Vs, Densità e Modulo di taglio)

Da Prof. (m)	A Prof. (m)	Spessore (m)	Vs (m/sec)	Vs _x (m/sec)	Densità (gr/cm ³)	Modulo di taglio (MPa)
0,0	1,1	1,1	146	146	1,75	37
1,1	2,8	1,7	268	202	1,80	129
2,8	7,5	4,7	330	267	1,90	207
7,5	12,7	5,2	323	287	1,90	198
12,7	19,0	6,3	309	294	1,90	181
19,0	20,7	1,7	411	301	2,00	338
20,7	34,0	13,3	545	365	2,10	624

Prof. sub. >30 m Vs,eq 350 m/sec

PROVA SISMICA MASW M1		
Componente Verticale ZVF - Onde di Rayleigh		
Località: La Custia (Pieve Fosciana)		
Committente: Dott. Geol. Riccardo Biagioni		
Cantiere: Variante urbanistica per adeguamento viabilità		
All. 5	Gennaio 2020	Pro.Geo. s.r.l.

Allegato 6: Documentazione fotografica



Foto 1 – Prova penetrometrica dinamica superpesante P1



Foto 2 – Stendimento sismico ST1 – M1