

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

# MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

Regione Toscana  
Comune di Molazzana (LUI)

## Relazione delle indagini geofisiche e geognostiche

Regione Regione Toscana – Settore Sismica	Soggetto realizzatore:  Comune di Molazzana/Servizio Assetto del Territorio/RUP Geom. B Vonugli Irene  Professionisti incaricati: Dott. Geol. Cristian Pieroni Tecna Srl Di Moretti Giuliano  Collaboratore subordinato di Geol. Cristian Pieroni  Dott. Geol. Francesco Puccetti	Data Marzo 2020
--	---	--------------------

---

## **INDICE RELAZIONE**

<b>1 – PREMESSA</b>	<b>2</b>
1.1 UBICAZIONE AREA DI STUDIO	2
1.2 INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE	2
1.3 STRUTTURA DELLA RELAZIONE	2
<b>2 – LE ONDE DI SUPERFICIE</b>	<b>3</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE	3
2.2 CENNI TEORICI	4
2.3 PROPRIETA' RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI	7
<b>3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE</b>	<b>9</b>
3.1 PROCEDURE DI CAMPAGNA	9
3.2 METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE	10
<b>4 – INDAGINE SISMICA MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves)</b>	<b>12</b>
4.1 ACQUISIZIONE DEI DATI MASW	14
4.1.1 PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI	15
4.1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	18
4.1.3 ESECUZIONE INDAGINE MASW	18
4.2 ELABORAZIONE (PROCESSING) ED INVERSIONE DEI DATI MASW	20
<b>5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)</b>	<b>24</b>
5.1 ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA	25
5.2 ANALISI DEI DATI	26
5.3 IL PROGETTO SESAME	26
5.3.1 CRITERI DI AFFIDABILITA' DEL PICCO	26
5.3.2 CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO	28
5.3.3 INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME	29
5.4 VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLE MISURE HVSR	31
5.5 CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	33
<b>6 – INDAGINE SISMICA DOWN – HOLE</b>	<b>36</b>
5.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE	36
5.2 METODO INTERVALLO	37
<b>7 – METODI ELETTRICI E TOMOGRAFIA</b>	<b>38</b>
7.1 PRINCIPI	39
7.2 LA RESISTIVITA' E LA SUA RELAZIONE CON LA LITOLOGIA	41
7.3 TECNICHE 2D	44
7.3.1 ARRAY WENNER	48

---

7.3.2 ARRAY DIPOLO – DIPOLO	49
7.3.3 ARRAY WENNER-SHUMBERGER	51
7.3.4 ARRAY POLO – POLO	52
7.3.5 ARRAY POLO – DIPOLO	53
7.4 INVERSION DEI DATI	54
<b>8 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>57</b>

---

#### **ALLEGATI**

- ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI DOWN – HOLE
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI GEOELETTRICHE
- ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI E REPORT PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE SUI CAMPIONI
- ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Scala 1:2000)

---

## **1 – PREMESSA**

Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geofisiche, di tipo sismico attivo-passivo ed elettrico, condotte a supporto degli studi di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Molazzana (LU).

Lo studio di microzonazione sismica (MS) di livello 3 rappresenta un il livello di maggior dettaglio tra gli studi di MS e consiste in un approfondimento di indagini al fine di determinare il l'amplificazione di ciascuna area individuata nello studio mediante risposta sismica locale RSL2D.

Tale approfondimento quindi ha come intento quello di perseguire gli studi pregressi effettuati ed assicurare la riduzione del rischio sismico, evidenziando le criticità ed indagando le aree per le quali sono stati richiesti studi di approfondimento (MS3).

### **1.1 – UBICAZIONE AREA DI STUDIO**

Le indagini geofisiche integrate, sono state eseguite all'interno del territorio del Comune di Molazzana sia in aree urbane sia in aree limitrofe per meglio correlare ed interpretare i dati ottenuti.

Per la visualizzazione dell'ubicazione di ciascuna indagine geofisica svolta si rimanda alla cartografia tematica realizzata.

### **1.2 – INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE**

La caratterizzazione dal punto vista sismico del terreno è stata condotta mediante la realizzazione delle seguenti tipologie di prove geofisiche sia attive che passive:

**n. 1 indagine sismica attiva P/SH**, per la determinazione dei profili sismostratigrafici;

**n. 1 indagine sismica attiva MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità Vs nel sottosuolo;

**n. 1 indagine sismica attiva congiunta MASW-ESAC** (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità Vs nel sottosuolo;

**n. 1 indagine sismica passiva HVSR** per determinare la frequenza di risonanza di sito.

**n. 2 indagini sismiche attive Down-Hole** per la determinazione dei profili di velocità Vp e Vs nel sottosuolo svolte all'interno dei fori di sondaggio;

**n. 2 indagini geoelettriche** per la determinazione dell'assetto stratigrafico;

### **1.3 – STRUTTURA DELLA RELAZIONE**

La presente relazione descriverà i metodi di indagine utilizzati, illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione, e verranno mostrati, in allegato, i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica sismica ed elettrica integrata, a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo relativamente alle diverse aree di indagine.

Verranno quindi in un primo momento illustrate e descritte le varie tecniche di acquisizione dei dati geofisiche, successivamente verranno riportate le modalità di elaborazione dei dati ed infine mostrati i risultati ottenuti.



---

## **2 – LE ONDE DI SUPERFICIE**

### **2.1 – DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE**

Le onde superficiali si generano ogni qual volta esiste una superficie libera.

Vengono a crearsi quindi a causa dell'interazione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica, la più studiata delle quali è la superficie libera della Terra.

Queste onde si propagano solo lungo la superficie o nell'interfaccia tra due strati con proprietà fisiche diverse.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di volume, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

Esistono due tipi di onde di superficie, chiamate coi nomi dei due fisici che per primi le studiarono: Onde di Rayleigh e Onde di Love.

#### **- Onde di Rayleigh**

Quando un'onda S (componente SV) assieme ad un'onda P incide sulla superficie libera dalla componente vettoriale delle due si generano onde superficiali che si propagano lungo la superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la loro velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, ossia la sua velocità è anche funzione della sua frequenza).

Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Si dimostra che una particella investita da questo tipo di onda vicina alla superficie, percorre un moto ellittico retrogrado lungo la direzione di propagazione (Fig. 1).

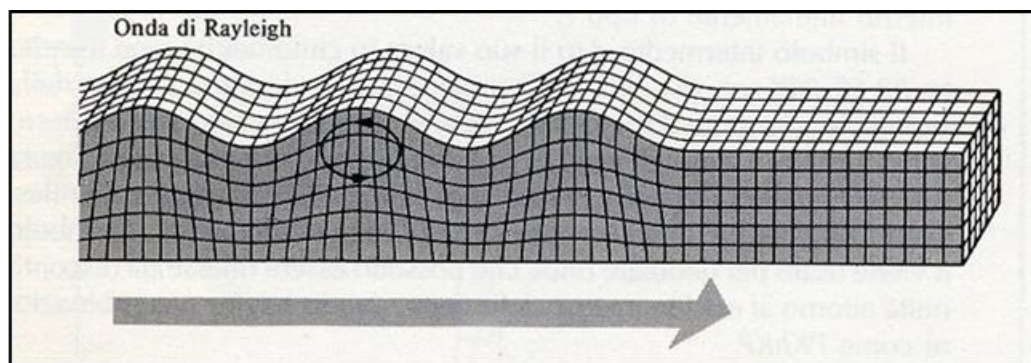


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

---

### - Onde di Love

Le onde di Love sono onde superficiali, anch'esse generate dall'incontro delle Onde S (componente SH) con la superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (un mezzo quindi disomogeneo) di conseguenza sono onde sempre disperse.

Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 2).

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

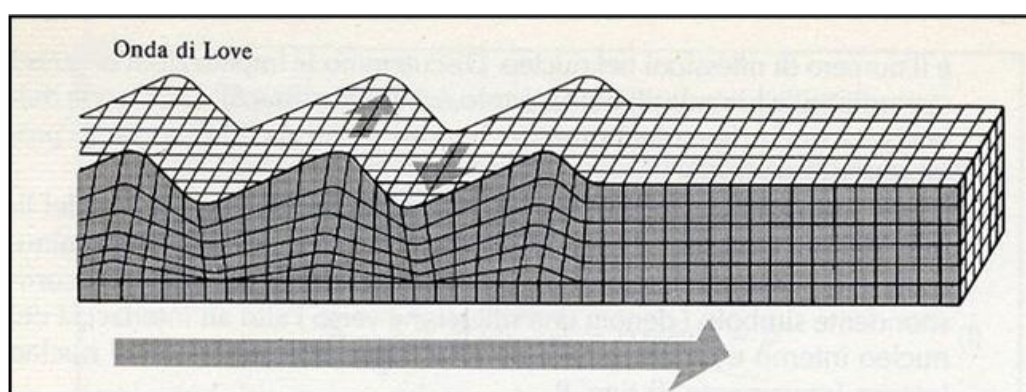


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

## **2.2 – CENNI TEORICI**

Nella maggior parte delle indagini sismiche di superficie, quando viene utilizzata una sorgente di onde di compressione, oltre due terzi del totale di energia sismica complessivamente generata è trasmessa mediante onde di Rayleigh.

Se consideriamo la variazione di velocità verticale in mezzi eterogenei noteremo che le onde di Rayleigh hanno un comportamento dispersivo, vale a dire che la velocità di gruppo non coincide con la velocità di fase di ciascuna frequenza.

Detto questo all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$  aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione.

Sapendo che la lunghezza d'onda è legata al periodo  $T$  dell'onda mediante la relazione:

$$\lambda = V \cdot T$$

se ne deduce che, a parità di velocità ( $V$ ), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza (si ricorda che  $T = 1/f$  dove  $f$  è la frequenza).

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.

Il terreno inoltre agisce da filtro passa basso quindi le frequenze più alte possono essere indicative soltanto per gli strati più superficiali.

Nel caso delle onde Rayleigh, lo strato coinvolto nella perturbazione ha uno spessore dell'ordine di circa  $0.5 \lambda$  (Choon B.Park et al, 1997).

L'immagine sottostante (Fig. 3) riassume il concetto per cui considerando due componenti una ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (a sinistra) e una a bassa frequenza e quindi grande lunghezza d'onda (a destra), la velocità di propagazione della prima dipende dal materiale più superficiale (quindi dalle caratteristiche ad esempio del primo strato) mentre la seconda viaggerà ad una velocità che dipende da tutto il materiale fino in profondità (quindi dalle caratteristiche di tutti gli strati che compongono questo ipotetico modello).

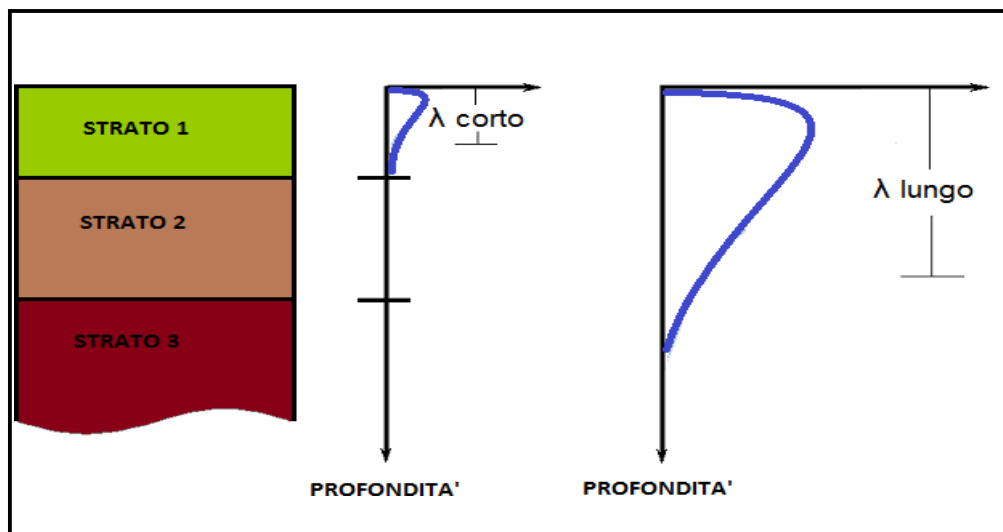


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

La distribuzione della velocità di fase in funzione della frequenza prende il nome di curva di dispersione.

E' chiaro quindi che più un modello di terreno è eterogeneo e maggiore sarà il grado di dispersione delle onde superficiali (Fig. 4).

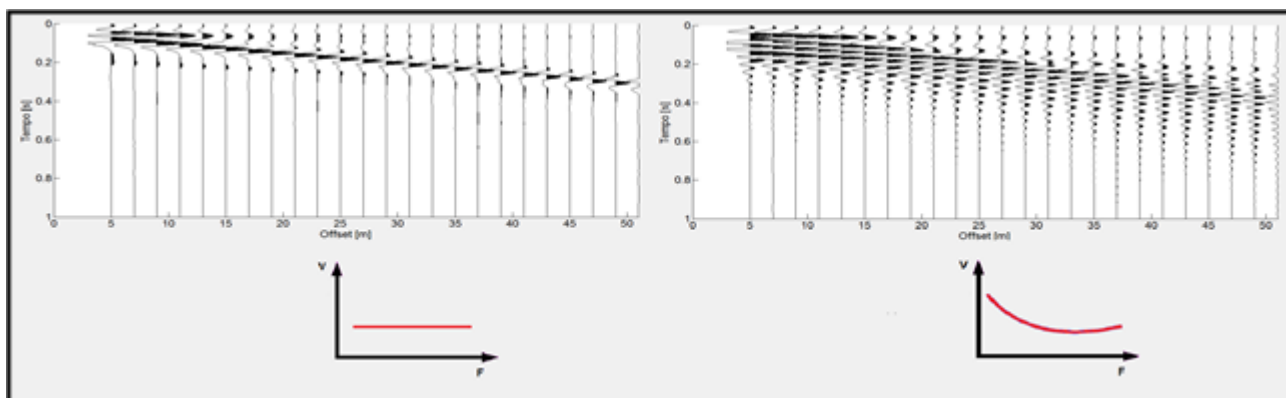


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

Un altro importante aspetto è connesso con la possibilità che questo tipo di onde, in presenza di eterogeneità verticali, manifestino anche una natura multimodale, vale a dire che la loro propagazione può avvenire, per una data frequenza, solo a determinate velocità (modi di propagazione).

Il modo che presenta la velocità di propagazione più bassa è detto modo fondamentale, mentre i restanti costituiscono i modi superiori.

In caso di strati eterogenei e con velocità crescenti il modo fondamentale è quello più energetico.

E' stato osservato che i modi superiori hanno origine in presenza di inversioni di velocità (Fig. 5) o di contrasti di velocità molto forti tra due strati (Cercato, 2008).

In questo caso i modi superiori sono caratterizzati da energia superiore rispetto al modo fondamentale.

Molto spesso può accadere che ci siano dei "salti di modo" tra il fondamentale e i superiori e viceversa quindi il solo basarsi sul modo fondamentale implica in alcuni casi una scorretta inversione dei dati.

I modi superiori vengono sempre più usati infatti il loro utilizzo nelle elaborazioni unitamente al modo fondamentale, può aiutare a vincolare meglio il modello  $V_s$  del sottosuolo, soprattutto in profondità. I più comuni software in commercio ne prevedono l'uso.

La dispersione delle onde superficiali quindi, elemento di disturbo negli altri tipi di indagini (sismica a rifrazione e a riflessione), risulta invece, grazie a questa sua proprietà, estremamente utile per calcolare le proprietà elastiche dei mezzi presenti in superficie.

Dalla curva di dispersione, in particolare dallo studio del modo fondamentale, infatti si può ricavare, attraverso l'operazione di inversione dei dati, il profilo di Velocità  $V_s$  e gli spessori degli strati indagati, parametri fondamentali sia in ingegneria sia in geofisica di esplorazione.

La stessa curva di dispersione inoltre può essere calcolata a partire dal sismogramma iniziale  $x-t$  (offset-tempi) sia in forma generale in un diagramma  $F-V$  (frequenze-velocità), sia in un diagramma  $F-L$  (frequenze-lentezze dal momento che  $L = 1/V$ ), sia in un diagramma  $F-K$  (frequenze-numeri d'onda dal momento che  $f=1/T$  quindi  $V = \lambda f = 2\pi f / K$ ) sia in un diagramma  $T-V$  o  $T-L$  (tempi-velocità o tempi-lentezze).

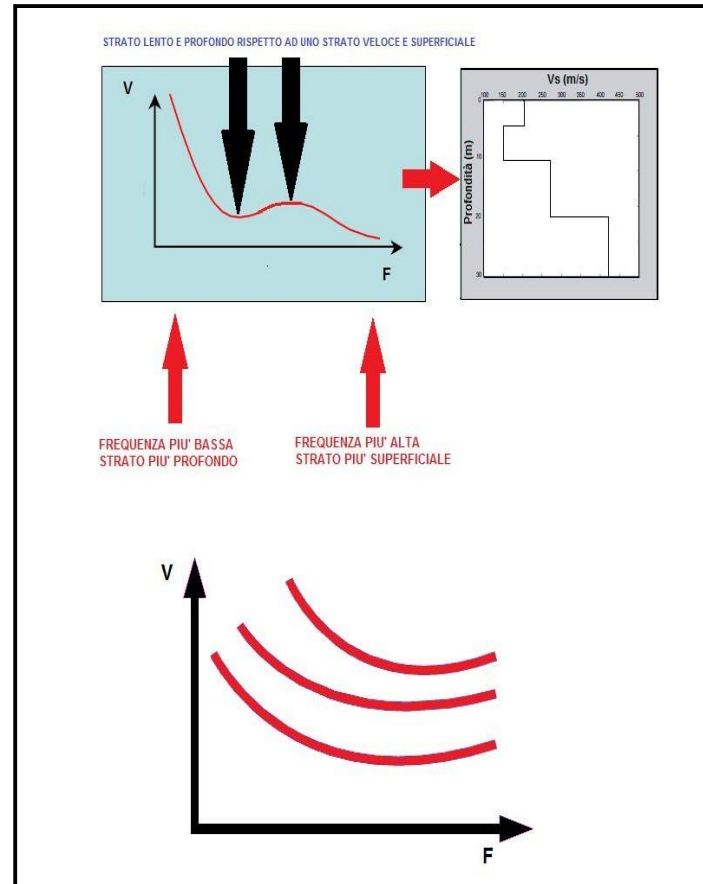


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

### **2.3 – PROPRIETÀ RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI**

1. Circa il 67% dell'energia rilasciata da un qualsiasi tipo di sorgente genera onde di superficie.
2. L'ampiezza delle onde superficiali caratterizzate da un fronte d'onda cilindrico, la cui area risulta  $2\pi xz$ , è notevolmente maggiore rispetto alle onde di corpo che invece presentano fronte d'onda sferico.

Questo significa che per conservare l'energia (dal momento che l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda) l'ampiezza dell'onda di superficie alla distanza  $X$  deve essere proporzionale a  $1/X$ . Il fronte d'onda delle onde di corpo invece è sferico (area relativa  $4\pi x^2$ ) quindi

---

l'ampiezza alla distanza  $X$  è proporzionale a  $X^{-2}$  il che significa che decade molto più velocemente delle onde superficiali.

3. Lo studio delle onde superficiali non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

4. La propagazione delle onde di Rayleigh è influenzata prevalentemente da  $V_s$  e dallo spessore  $h$  degli strati mentre le velocità  $V_p$  e la densità possono essere trascurate. La velocità delle onde di Rayleigh è circa il 90 % della velocità delle  $V_s$ .

5. La proprietà della dispersività permette il calcolo della curva di dispersione dalla quale è possibile ricavare i parametri fondamentali del modello di terreno in superficie. Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

---

### **3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE**

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

#### **3.1 – PROCEDURE DI CAMPAGNA**

I cavi sismici sono stati stesi lungo la zona di interesse e ad essi sono stati collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

Per quanto riguarda invece l'energizzazione delle onde SH è stata utilizzata sempre una mazza da 8 Kg e la battuta è stata eseguita all'interno di buche con pareti a 90° colpendo su ambo i lati in maniera trasversale allo stendimento dei geofoni.

---

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points), sono stati disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi, esternamente ed a distanze variabili entro il profilo stesso (in questo caso solo in posizione centrale).

La profondità di investigazione è, in linea teorica direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

### **3.2 – METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE**

La procedura d'elaborazione dati consiste di due fasi: la lettura dei tempi d'arrivo ai vari geofoni dello stendimento per ciascuna energizzazione effettuata e la loro successiva elaborazione mediante metodi di calcolo.

I tempi di primo arrivo delle onde sismiche vengono riportati su diagrammi spazio-tempo (dromocrone) nei quali l'asse dei tempi ha l'origine coincidente con l'istante in cui viene prodotta l'onda sismica (to), mentre nelle ascisse si hanno le distanze relative fra i geofoni dello stendimento.

Tali diagrammi consentono di determinare, nei punti di flesso, le variazioni di velocità fra i vari strati attraversati dai raggi sismici e, tramite elaborazioni, le profondità a cui si verificano tali variazioni.

Il procedimento di elaborazione dei tempi d'arrivo per ottenere le profondità dei rifrattori, utilizza più metodi: il Metodo del tempo di ritardo (delay time), il Metodo del tempo di intercetta, il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) proposto da Palmer (1980) ed il Metodo Tomografico.

Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni (analisi della velocità e tempo-profondità) si determinano le velocità e quindi le profondità dei rifrattori individuati sulle dromocrone.

La funzione di analisi della velocità corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifrattore (distanza intergeofonica), per cui la sua determinazione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche sul rifrattore stesso.

Tramite un procedimento di migrazione dei dati, sia la funzione tempo-profondità che quella di analisi della velocità vengono calcolate per distanze intergeofoniche crescenti (da 0 a multipli interi dell'equidistanza dei geofoni): viene scelta poi quella distanza per la quale le curve presentano il miglior andamento rettilineo.



---

Il G.R.M., a differenza del metodo del tempo d'intercetta, permette anche di verificare e di individuare, con metodi di calcoli indiretti, la presenza di eventuali strati nascosti (di limitato spessore e/o basso contrasto di velocità) e strati a bassa velocità nella serie stratigrafica.

Negli strati nascosti si ha sempre un aumento di velocità con la profondità, ma il loro spessore è sottile e/o il contrasto di velocità con lo strato sottostante è piccolo, per cui i raggi sismici che partono da questi strati vengono oscurati dai raggi che partono dallo strato sottostante. Gli strati a bassa velocità presentano invece una velocità sismica minore rispetto allo strato sovrastante (inversione di velocità), per cui alla loro interfaccia non si verifica una rifrazione critica e così non vengono evidenziati sul grafico tempo-distanza.

L'individuazione di eventuali strati nascosti e/o inversioni di velocità viene effettuata attraverso il confronto fra i valori delle funzioni tempo-velocità misurate e quelle ricalcolate in base al valore di XY utilizzata per l'elaborazione (Palmer 1980).

Il Metodo tomografico permette di intervenire sui parametri del modello e di "controllare" le iterazioni successive, al fine di ridurre l'errore quadratico medio (indice della differenza tra i percorsi delle onde sismiche calcolati e quelli misurati).

A partire dal modello con parametri predefiniti dall'operatore (numero di iterazioni da effettuare, intervallo delle velocità sismiche di riferimento, posizione delle celle, dimensione delle celle e forma delle celle), i valori iniziali di velocità sismica relativi alle singole celle vengono modificati mediante iterazioni successive allo scopo di "fittare" i segmenti dei percorsi sismici e renderli compatibili con le misure sperimentali.

L'obiettivo è quindi il calcolo del tempo di transito dell'onda attraverso le celle del modello ed il confronto di tale tempo con quello sperimentale.

Attraverso successivi processi iterativi si determina un modello di velocità sismica finale che permette di soddisfare contemporaneamente le caratteristiche dei vari raggi sismici.

---

#### **4 – INDAGINE SISMICA MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves)**

Per le proprietà descritte precedentemente può risultare quindi conveniente l'utilizzo delle onde superficiali per la caratterizzazione di un determinato sito di indagine per stimare il profilo di  $V_s$  dalla velocità delle onde superficiali.

E' stato dimostrato ampiamente che la curva di dispersione delle onde superficiali è influenzata soprattutto dalla velocità delle onde S ma anche dallo spessore di ciascuno strato mentre risultano poco influenti le velocità delle onde P (totalmente nel caso delle onde di Love) e la densità di ciascuno strato.

E' quindi possibile stimare oltre al profilo di velocità delle onde S anche i diversi spessori degli strati.

La registrazione di tali forme d'onda viene effettuata mediante la tecnica MASW, l'acronimo sta per Multichannel Analysis of Surface Waves.

Bisogna precisare subito che la tecnica MASW non si basa solo ed esclusivamente sullo studio delle onde di Rayleigh in quanto anche le onde di Love sono onde superficiali anch'esse soggette al fenomeno della dispersione.

In questa specifica tecnica verranno però prese in considerazione solo le onde di Rayleigh.

Come è stato descritto in precedenza le onde di Rayleigh sono caratterizzate da una polarizzazione sul piano verticale e sono quindi registrabili lungo le due componenti verticale e radiale quindi possono essere registrate sia tramite geofoni verticali (per quanto riguarda la componente verticale) sia tramite geofoni orizzontali posti parallelamente allo stendimento (per quanto riguarda la registrazione della componente radiale).

Il tipo di sorgente dovrà comunque essere di tipo verticale per entrambe le componenti.

Questa precisazione è stata fatta perché molto spesso il solo utilizzo della componente verticale e/o orizzontale delle onde di Rayleigh, come unica tecnica MASW, senza avere dati geologici di base su un determinato sito, può non essere sufficiente per una corretta interpretazione dei diversi modi e la successiva inversione dei dati potrebbe dare qualche problematica.

#### **LIMITAZIONI DEL METODO MASW**

In generale è bene precisare che il metodo MASW presenta alcune limitazioni tra le quali:

1. Il modello di terreno deve essere a strati piani e paralleli viceversa la prova MASW perderebbe di attendibilità.
2. In riferimento a quanto previsto al precedente punto 1, non ci devono essere significative variazioni laterali del terreno.
3. La quota topografica dello stendimento dei geofoni non deve avere variazioni consistenti.

---

4. Le caratteristiche elastiche del terreno possono in alcuni casi attenuare completamente le onde superficiali rendendo quindi il metodo MASW inutilizzabile.

5. La profondità di investigazione è dipendente anche dalla lunghezza dello stendimento.

6. Poiché il profilo  $V_s$  finale viene calcolato mediante un processo di inversione, è possibile pervenire ad una curva di dispersione non univoca, ovvero quest'ultima soddisfa più modelli differenti di terreno (vedere seguito).

I metodi di prospezione sismica **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves) quindi, consentono di ottenere un modello verticale delle VS a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale.

In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda.

Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari.

Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore  $H$  dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità  $\rho$  dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson.

A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame.

Quanto detto rappresenta il problema diretto: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh.

Nella prospezione occorre invece affrontare il problema inverso: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi di seguito descritte in maniera semplificata:

**Acquisizione:** registrazione e osservazione dei dati sismici “grezzi” contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;

**Processing:** trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FP) e operazione di *Picking* della Curva di dispersione ottenuta;

**Inversione:** uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità riconducibile col minor scarto di errore possibile al *Picking* della Curva di dispersione sperimentale ottenuta.

#### **4.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI MASW**

Le analisi della dispersione delle onde superficiali partono dall'acquisizione dei dati con una geometria di tipo off-end ovvero lo stendimento dei geofoni si trova allineato da una stessa parte rispetto alla sorgente (Fig. 6) oppure split-spread quando invece la sorgente è posta all'interno dello stendimento di geofoni.

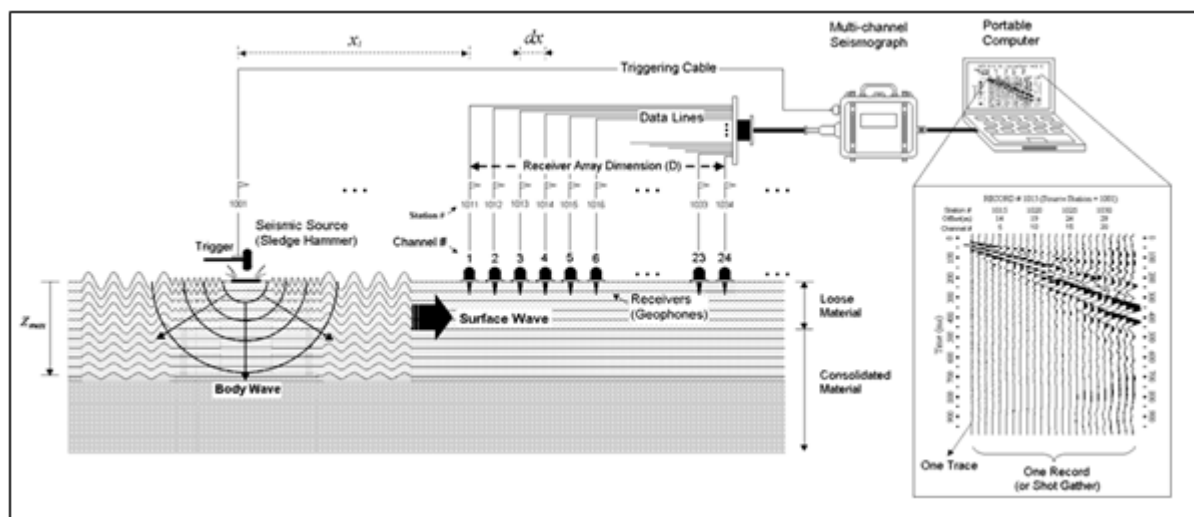


Fig. 6 - Schema di acquisizione delle Onde Superficiali (Fonte immagine [www.kgs.ku.edu](http://www.kgs.ku.edu)).

---

La strumentazione necessaria deve comprendere:

- Sismografo e suoi componenti (Cavi, Trigger, Sistema di acquisizione dati e inversione)
- Geofoni verticali e orizzontali
- Sorgente: martello, grave in caduta libera o fucile sismico
- Piastra per la battuta o traversina
- Appositi supporti per ciascun geofono in caso di presenza di asfalto o roccia

#### **4.1.1 – PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI**

Ecco nel dettaglio i vari parametri necessari per un'acquisizione dati MASW:

##### **1- Sorgente**

Il tipo di sorgente utilizzata è stato di tipo verticale (martellata).

Qualora la registrazione fosse risultata problematica a causa della distanza e/o dell'attenuazione intrinseca del terreno è stato aumentato il numero di stack (ovvero il numero di colpi per registrazione). Ciò in generale tende a migliorare il rapporto segnale/rumore, la qualità delle registrazioni e quindi degli spettri di velocità su cui si andrà a fare il picking.

##### **2 - Lunghezza dello stendimento Array Dimension (D)**

Lo stendimento, in teoria, deve avere la lunghezza (D) maggiore possibile (in base alla disponibilità di spazio e di geofoni) in quanto dalla sua lunghezza derivano le frequenze più basse registrabili ( $\lambda_{\max}$ ) e quindi di conseguenza, come descritto in precedenza, una maggiore profondità di investigazione (Z).

La sua lunghezza non deve comunque essere superiore a 46 m (la distanza tra geofoni deve essere pari a 2 m per un array di 24 geofoni). In caso di utilizzo di più geofoni possono essere comunque possibili anche lunghezze superiori.

Dalla lunghezza dello stendimento dipende inoltre la risoluzione dei vari spettri, maggiore è la lunghezza e maggiore è la risoluzione. Di conseguenza sarà più facile effettuare l'operazione di picking.

In prima approssimazione quindi, sempre in via teorica,  $D \approx Z \approx \lambda_{\max}$  dove  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza).

##### **3 – Distanza tra i geofoni (dx)**

Dipende molto dal numero di geofoni (in questo caso 24), dalla lunghezza dello stendimento e quindi dalla disponibilità di spazio. Utilizzando 24 geofoni la dx deve essere massimo di 2 m.

A maggior ragione se venisse utilizzato lo spettro f-k per l'individuazione dei modi delle onde superficiali deve essere comunque sempre utilizzata una dx piccola (2 m massimo).

---

Questo a causa del problema dell'*aliasing spaziale* ovvero la non sufficientemente ridotta distanza tra geofoni non consente di campionare a sufficienza i segnali a più alta frequenza.

Tale problema si presenta qualsiasi spettro si utilizzi, ma nel caso  $f - v$  è più facilmente individuabile e non compromette l'interpretazione del dato rispetto allo spettro  $f - k$ .

Dalla distanza tra i geofoni dipendono inoltre le frequenze più alte registrabili quindi le informazioni inerenti gli strati più superficiali.

Una  $dx$  troppo grande inoltre (utilizzando 24 geofoni) ridurrebbe la "ridondanza", cioè quel fenomeno che permette di registrare la stessa frequenza da più stazioni e consente di avere un migliore rapporto segnale/rumore e quindi una migliore definizione della curva di dispersione ottimale.

In prima approssimazione quindi, in questo caso, la profondità minima di esplorazione  $z \approx dx \approx \lambda_{\min}$ , dove  $\lambda_{\min}$  è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

#### 4 - Distanza sorgente-primo ricevitore (offset minimo $X_1$ )

Per quanto riguarda l'offset minimo bisogna tenere in considerazione il fatto che una sorgente troppo vicina causa problemi di *near offset* e non si rispetta la condizione di onda piana in quanto l'onda generata ha un fronte sferico.

La teoria prevede che un'onda può considerarsi piana ad una distanza circa la metà della massima lunghezza d'onda desiderata (se vogliamo ad esempio avere un profilo che interessa i primi 30 metri di profondità si deve considerare una lunghezza d'onda di circa 60-70 metri, quindi un offset minimo di 30-40 m).

In pratica molto spesso ciò non è possibile, ma buoni risultati si possono ottenere anche ad offset minimi inferiori.

E' necessario quindi effettuare registrazioni con diversi offset in modo da poter valutare, nella fase di elaborazione dati, diversi spettri di velocità derivanti da diverse configurazioni sorgente-ricevitori ed ottenere dal loro confronto un quadro più completo che agevoli il riconoscimento dei modi delle onde di Rayleigh effettivamente presenti, non essendo possibile stabilire a priori, in campagna, quale sia la migliore configurazione.

In questo modo si può avere inoltre un riscontro sulla conformazione 1D del sottosuolo (presenza o meno di variazioni laterali) ma anche risultati che interessino porzioni di terreno sempre più profonde.

#### 5 - Tipo di geofoni

E' raccomandato per questo tipo di registrazioni l'utilizzo di geofoni in grado di registrare basse frequenze (4.5 Hz o inferiore).

---

I geofoni verticali vengono utilizzati per la misura della componente verticale delle onde di Rayleigh mentre quelli orizzontali, eventualmente, per la componente radiale delle onde di Rayleigh.

I geofoni vengono posizionati in maniera ben solidale al terreno; in presenza di roccia o di asfalto si utilizzano gli appositi supporti. Il numero di geofoni utilizzati in questa campagna è di 24.

#### 6 – Intervallo di campionamento (dt)

Per quanto riguarda le onde superficiali si parla di onde che hanno un range di frequenze teoricamente <100 Hz per questo motivo è sufficiente utilizzare un passo di campionamento molto ampio (anche 4 ms).

#### 7 – Tempo di registrazione

Il tempo di registrazione dipende molto dal tipo di terreno. Se omogeneo o quasi il fenomeno della dispersione non è molto accentuato, se invece è molto eterogeneo il “ventaglio” della dispersione è molto ampio.

Pertanto la lunghezza della registrazione deve essere di almeno 1-2 secondi.

Nella tabella successiva vengono riassunti i parametri utilizzati appena descritti:

SORGENTE	Onde di Rayleigh: verticale (martellata)
LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO (D)	46 metri
DISTANZA TRA GEOFONI (dx)	2 m
OFFSET MINIMO (X <sub>1</sub> )	≈ dx e ≈ D/2
NUMERO DI SCOPPI	2
TIPO DI GEOFONI	4.5 Hz (verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh)
NUMERO DI GEOFONI	24
TEMPO DI REGISTRAZIONE	1-2 secondi
INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO (dt)	0.5 – 2 ms
NOTE	Le tracce non sono state filtrate e è stato aggiunto AGC (Automatic Gain Control)

---

#### **4.1.2 – STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente campagna geofisica sono state svolte utilizzando un sismografo *DOREMI* prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

#### **4.1.3 – ESECUZIONE INDAGINE MASW**

La geometria di acquisizione utilizzata è indicata nello schema sottostante.

E' bene precisare che una geometria di acquisizione "fissa" non esiste, poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato.

La geometria proposta, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, rappresenta il giusto compromesso tra pratica e teoria.



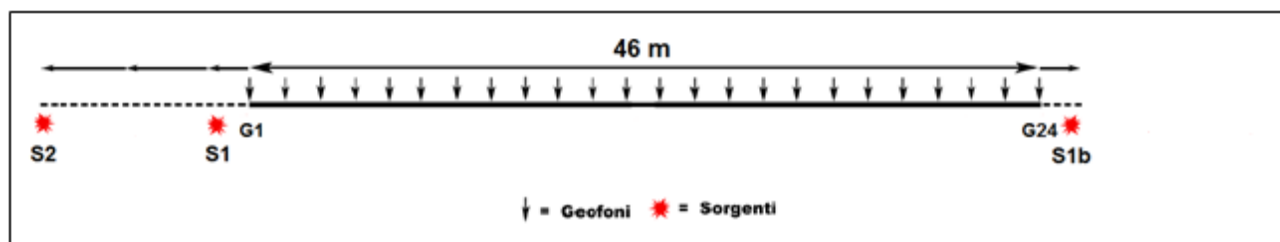


Fig. 7 - Geometria di acquisizione massima per le onde superficiali utilizzando 24 geofoni e  $dx=2$ .

S1: a distanza adeguata da G1.

S2: a distanza  $D/2$  da G1 pari alla semi lunghezza dell'array di geofoni ( $D$ ).

S1b: a distanza da G24 speculare rispetto a S1

La scelta di utilizzare due scoppi S1 e S2 di cui quest'ultimo a distanza, ove possibile, pari a  $D/2$  è stata fatta per i seguenti motivi:

- Scoppi posti a distanza considerevole permettono di mettere in evidenza tutto il range di frequenze ottenibile dalla sorgente utilizzata, dalle più alte (S1) a quelle più basse (S2);
- I modi superiori, se presenti, sono maggiormente individuabili e discriminabili da quello fondamentale, il che in caso contrario porterebbe ad una interpretazione errata a seguito della fase di inversione dei dati;
- La similarità tra i due spettri F-V ricavabili dai due scoppi permette di stabilire se siamo in condizione di piani paralleli e/o assenza di variazioni laterali significative;
- In aggiunta al punto precedente, per verificare il parallelismo e l'omogeneità degli strati, in caso non ci sia lo spazio necessario per lo scoppio S2, eventualmente, ove possibile, è buona norma ricorrere ad uno scoppio (S1b) posto nella parte opposta dello stendimento in posizione geometricamente speculare allo scoppio S1.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione si passa alla fase di montaggio della strumentazione in campagna.

I cavi sismici vengono stesi lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La profondità di investigazione è, in linea teorica come descritto precedentemente, direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

---

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

#### **4.2 – ELABORAZIONE (PROCESSING) E INVERSIONE DEI DATI MASW**

L'analisi della dispersione delle onde superficiali (qualsiasi tipo esse siano) al fine di determinare il profilo delle Vs di un determinato sito è composta da due fasi fondamentali:

1 – Determinazione dello spettro di velocità (generalmente nel dominio  $f - v$ ) dal quale vengono determinate le caratteristiche delle onde superficiali quindi le curve di dispersione.

2 – l'inversione, ovvero il passaggio dalle curve di inversioni al modello di terreno, dei diversi modi precedentemente individuati (in particolare il modo fondamentale). Una volta registrate le tracce seguendo la metodologia precedentemente descritta si ottiene il dataset dei dati nel dominio  $x - t$  ovvero spazio – tempo. E' chiaramente impossibile lavorare in questo dominio quindi si deve passare al dominio  $f - k$  (frequenze – numeri d'onda) oppure al dominio  $f - v$  (frequenze – velocità) (Fig. 8).

Alcuni punti chiave da tenere in considerazione per il controllo di qualità dei dati sono:

1 – La registrazione corretta ben visibile in tutte le tracce.

2 – Spettro di velocità chiaro ed interpretabile.

3 – Attenzione ai modi superiori se presenti.

4 – Utilizzare come modello iniziale i dati geologici e/o i dati forniti dalla sismica a rifrazione. Trattandosi infatti di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile (Foti, 2008).

5 - La corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali (Foti, 2008).

6 – In caso di incertezze legate alla NON UNIVOCITA' DELLA SOLUZIONE è necessaria quindi una taratura mediante dati diretti di esplorazione del sottosuolo.

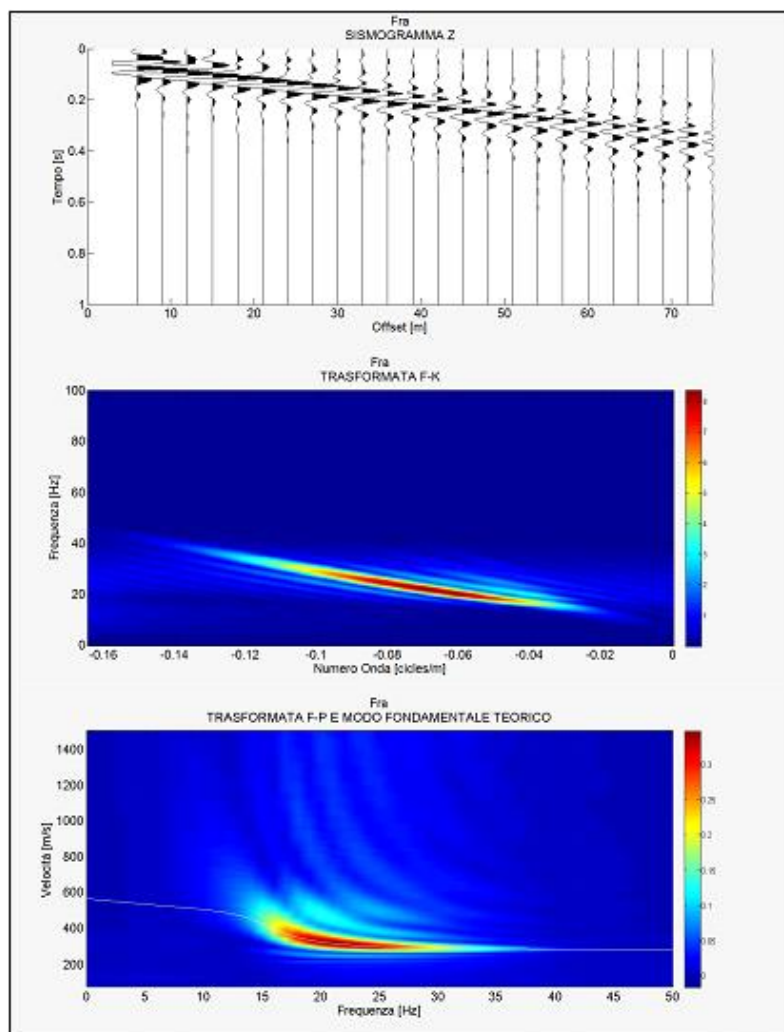


Fig. 8 - Semplice modello preso dalla letteratura composto da due strati a velocità crescente ( $V_p = 650$  e  $1400$  m/s,  $V_s = 300$  e  $600$  m/s, spessore  $h$  fino al semispazio di  $8$  m). Dall'alto al basso si può vedere il sismogramma sintetico (componente verticale), lo spettro f-k e lo spettro f-v (con modo fondamentale teorico).

Una volta calcolato lo spettro  $f-v$  è buona norma verificare la profondità massima raggiunta dall'indagine (Fig. 9) in modo da meglio vincolare il modello da utilizzare nella fase di inversione, dopo di che si entra nella parte più delicata, ovvero il picking, l'individuazione cioè dei diversi modi.

La loro individuazione è quindi soggettiva (di contro all'oggettività dello spettro calcolato) e le scelte che si fanno devono essere ponderate con cura per non inficiare in maniera determinante il processo di inversione.

E' di uso comune interpretare il modo fondamentale come quello a più alta energia.

Questo non è sempre vero. In base infatti alla complessità del sito geologico i modi superiori potrebbero essere molto più energetici o addirittura talmente energetici che nello spettro il modo fondamentale non è visibile.

Non bisogna in maniera categorica basarsi sul picking e inversione automatica che molti software consentono di fare.

E' necessario quindi fare riferimento a prove invasive presenti nelle vicinanze (penetrometrie, carotaggi ecc.). Più dati si hanno a disposizione e maggiore è la probabilità di ricostruire, dalla curva di dispersione, il modello di terreno più veritiero che l'ha determinata, riducendo al minimo così i problemi di non univocità.

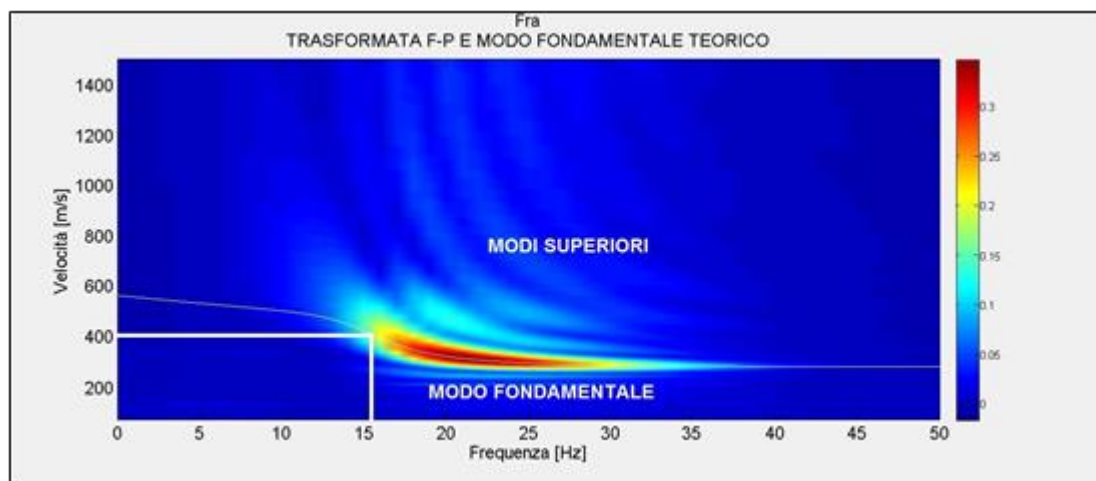


Fig. 9 - Calcolato lo spettro f-v per determinare in maniera approssimata la profondità massima raggiunta dalla prova si prendono le coordinate f-v dell'ultimo punto chiaramente visibile del modo fondamentale e si esegue la seguente formula:  $Z = v / 2f$ . In questo caso  $v = 400$  m/s,  $f = 15.5$  Hz quindi  $Z = 400 / 31 = 12.9$  m

Il metodo di prospezione **ESAC** (Extended Spatial Autocorrelation Method) invece avviene tramite la registrazione dei microtremori come sorgenti sismiche con stendimenti bidimensionali e attraverso il processo di inversione della curva di dispersione effettiva (anziché modale come nel caso dell'indagine MASW).

Nel metodo ESAC si registra il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente, cioè sollecitazioni di qualsiasi origine, provenienti da sorgenti ignote e isotropiche (disposte in tutte le direzioni) rispetto ad uno stendimento sismico non lineare.

In assenza di spazi sufficientemente lunghi e in presenza di ambienti urbanizzati, acquisizioni con stendimenti 2D (a "L", croci o cerchi) e di breve durata, consentono in maniera speditiva l'analisi del microtremore sismico.

L'acquisizione secondo una geometria bidimensionale risolve alcuni problemi legati alle velocità apparenti, presenti nei dati acquisiti mediante array unidirezionali (ReMi).

Uno stendimento ESAC è realizzato mediante l'utilizzo della classica strumentazione per l'esecuzione di una prospezione sismica MASW con geofoni a componenti verticale da 4,5 Hz disposti secondo una geometria 2D (a "L", croci o cerchi).

---

Al contrario di ciò che avviene con le tecniche attive, il metodo ESAC, consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con una sorgente attiva e l'acquisizione può essere eseguita, al limite, anche da un solo operatore.

Con la metodologia ESAC viene studiata la direzionalità del microtremore e valutata la velocità di fase alle diverse frequenze.

Il metodo consente di definire la cosiddetta **curva di dispersione effettiva**, che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali “pesate” in base al loro specifico contenuto energetico nel sito.

Nel caso di profili normalmente dispersivi, la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale.

In altri casi, per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, la curva di dispersione effettiva risulta frutto di una combinazione dei diversi modi in funzione della relativa energia.

Un vantaggio quindi della tecnica ESAC è quello di non dovere identificare (come in altre metodologie) i vari modi di vibrazione, che sono invece trattati, più semplicemente, in modo unitario.

Mediante software dedicato viene calcolata automaticamente la curva di dispersione effettiva, dalla quale può essere eseguita la **modellazione delle velocità di taglio ( $V_s$ )**.

Le analisi ESAC sono mirate ed utili a definire le basse frequenze, ma non risultano altrettanto efficaci alle alte (ove invece le analisi di sismica attiva si rivelano decisamente superiori).

Per questo motivo si utilizzano tecniche passive con **analisi congiunta** con dati provenienti da sismica attiva (**ESAC+MASW**) al fine di risalire ad un modello sismostratigrafico affidabile lungo tutta la profondità di indagine.

La geometria dello stendimento **MASW** utilizzata è stata di **24 geofoni** intervallati da una distanza di **5 m** (Lunghezza stendimento pari quindi a **115 m**) mentre i parametri di acquisizione sono stati settati in maniera consona a questo tipo di indagine (tempo di registrazione più lungo e bassa frequenza di campionamento).

La geometria dello stendimento **ESAC** è stata invece di tipo a **L** utilizzando spaziature variabili in base alla logistica dei luoghi.

In base alle indagini sismiche effettuata quindi, è stato possibile ricavare più sequenze sismo-stratigrafiche relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali, nei primi 30 metri di profondità ed oltre ( **$V_{s30}/V_{seq}$** ).

---

## **5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)**

Il metodo reso popolare da Nakamura nel 1989 è una valutazione di tipo sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie terrestre misurati puntualmente mediante l'utilizzo di un apposito sismometro a tre componenti (due orizzontali ortogonali tra di loro ed una verticale).

Proprio dal fatto che tale metodo si basa su di un rapporto viene anche denominato indagine HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio) o più semplicemente prova “di Nakamura”.

Rumore al di sotto degli 0.5 Hz è generato prevalentemente da onde marine e perturbazioni atmosferiche mentre al di sopra degli 0.5 Hz il contributo prevalente è dato da vento, traffico veicolare e attività industriali.

Il risultato di tale misura viene mostrato in un grafico in cui il rapporto H/V (in ordinata) è messo in relazione con la frequenza (in ascissa).

Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei picchi sono le frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura.

La risonanza è un fenomeno che si viene a creare quando si hanno forti contrasti di impedenza sismica tra uno strato e il sottostante.

In caso quindi di misura effettuata al di sopra di una roccia la curva H/V non presenterà picchi significativi ma avrà un andamento piano con ampiezza pari ad 1. Maggiore quindi è il contrasto sismico e maggiore sarà la precisione della misura H/V.

Geologicamente quindi una copertura soffice al di sopra di un basamento rigido rappresenta la condizione ottimale per questa metodologia di misurazione.

In questa configurazione molto semplice è possibile quindi mettere in relazione la frequenza di risonanza (f) con la velocità media delle onde S ( $V_s$ ) e lo spessore della copertura soffice (h) mediante la seguente relazione:

$$f = V_s/4h$$

Data quindi la frequenza di risonanza calcolata tramite il metodo H/V e la velocità media delle  $V_s$  delle coperture è quindi possibile ricavare la profondità dello strato a forte impedenza sismica e quindi fare successivamente una valutazione sulla possibile amplificazione sismica del sito in esame.

E' importante però che questo metodo (data la sua natura stocastica) sia utilizzato assieme ad una conoscenza generale dell'area di studio dal punto di vista geologico ed a prove di sismica quali MASW e/o rifrazione in modo da avere una conoscenza a priori della natura del sito e della velocità delle coperture.

In assenza di qualsiasi vincolo infatti esistono infiniti modelli (cioè combinazioni  $V_s$ -H) che soddisfano la stessa curva H/V.

---

## **5.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA**

Le misure di rumore a stazione singola si effettuano mediante l'utilizzo di sismometri a tre componenti (chiamati anche tromografi) con una sensibilità tra 0.1 e 20 Hz (corrispondenti ai modi di vibrare della maggior parte delle strutture).

Per quanto riguarda l'acquisizione in campagna bisogna prestare molta cura ed attenzione al posizionamento dello strumento.

L'accoppiamento dello strumento con il terreno deve essere fatto il più solidale possibile evitando interfacce intermedie (ad esempio cemento, fondo stradale ecc.) le quali causano grossi problemi dovuti all'inversione di velocità la cui conseguenza in molti casi è il non corretto risultato della curva H/V.

Importante è la messa in bolla dello strumento, se questo non fosse verificato le misure sarebbero completamente errate. Evitare la misura in giornate particolarmente avverse dal punto di vista meteorologico.

E' sempre consigliabile posizionare lo strumento all'interno di una piccola buca nel terreno in modo da mantenerlo oltre che perfettamente solidale anche al riparo da possibili agenti di disturbo.

Dal momento che le frequenze di interesse ingegneristico non superano i 25 Hz la frequenza di campionamento non deve essere inferiore ai 50 Hz.

Particolarmente importante è la durata della registrazione. Come accennato in precedenza, la misura di rumore è un fenomeno detto stocastico quindi per avere una validità dal punto di vista statistico è necessaria una consistente quantità di dati i quali si ottengono registrando il rumore per una durata commisurata alla frequenza di risonanza di interesse.

In generale quindi per avere un dato concreto riguardante un bedrock sismico profondo (basse frequenze di risonanza) sarà necessario un tempo di registrazione più lungo rispetto ad un bedrock sismico superficiale (alte frequenze di risonanza).

L'orientamento dello strumento in via convenzionale deve essere rivolto verso il Nord geografico.

In presenza di elementi topografici o morfologici lo strumento dovrebbe essere allineato secondo gli assi di questi in modo da cogliere eventuali effetti di direttività. Quest'ultima può essere causata o da una non omogenea distribuzione delle sorgenti attorno allo strumento di misura o da cause derivanti dalla natura del sottosuolo sia per motivi topografici (misure a bordo di una scarpata ad esempio) sia per motivi stratigrafici (valli sepolte, stratificazioni inclinate ecc.). Le misure quindi in cui è presente questa problematica vanno interpretate con cautela.

---

## **5.2 – ANALISI DEI DATI**

Una volta registrate le serie temporali di ciascuna componente il calcolo della curva H/V avviene passando al dominio delle frequenze e facendo il rapporto tra la componente H e la componente V. La componente H è la media delle due componenti orizzontali.

Per quanto riguarda le fasi dettagliate del processing si fa riferimento alle linee guide fornite dal progetto SESAME (2004).

La fase di interpretazione successiva deve essere fatta con alcuni accorgimenti fondamentali:

- 1- La curva H/V deve essere statisticamente significativa, ovvero deve avere una deviazione standard sia in ampiezza che in frequenza ridotta. Se questo non fosse verificato, premesso che la prova è stata acquisita tenendo presente tutti gli accorgimenti descritti nel precedente paragrafo, è necessario “pulire” la curva H/V. SESAME (2004) propone la rimozione nella serie temporale di quelle finestre in cui la deviazione standard del segnale STA (media a breve termine) è maggiore della media a lungo termine (LTA). Si tratta quindi dell’eliminazione di quelle finestre in cui è evidente la presenza di segnali di disturbo (detti transienti).
- 2- La curva H/V deve essere SEMPRE osservata insieme agli spettri di ciascuna componente in modo da poter effettivamente individuare quei picchi di natura stratigrafica. In condizioni normali infatti le tre componenti hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza si ha un picco del rapporto H/V in quanto diminuisce la componente verticale determinando una forma a “occhio” o “ogiva” indice di una risonanza stratigrafica. I picchi di forma differente non sono attribuibili a cause stratigrafiche.

## **5.3 – IL PROGETTO SESAME**

Il progetto SESAME ha stabilito delle direttive per garantire la riproducibilità delle misure H/V, indispensabile per ottenere dei dati rappresentativi e poco influenzati dal contesto di misura ed ambientale.

Le direttive fornite dal progetto SESAME descrivono diversi criteri da seguire mediante i quali è possibile valutare l’attendibilità della curva H/V.

### **5.3.1 – CRITERI DI AFFIDABILITÀ DEL PICCO**

Le seguenti condizioni di affidabilità sono state stabilite grazie al progetto SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations), a seguito dei numerosi studi condotti (SESAME 2004).



---

La prima condizione necessaria per ritenere una curva H/V affidabile, è la sua riproducibilità nello stesso sito con altre sorgenti e tipologie di rumore ambientale, e mediante una differente selezione di finestre.

In sintesi i primi tre criteri tutti da soddisfare sono i seguenti:

1.  $f_0 > 10 / l_w$  , ovvero che alla frequenza di interesse devono trovarsi almeno 10 cicli significativi nella finestra selezionata.;  $l_w$  è la lunghezza della finestra.
2.  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$ , ossia che il numero di cicli significativi sia maggiore di 200;  $n_w$  è il numero di finestre selezionate per condurre l'analisi.
3. un basso livello di scattering tra le finestre. Deviazioni standard troppo elevate sono riportabili a situazioni di scarsa stazionarietà ed alta perturbazione del segnale, quindi ad una bassa rappresentatività. In particolare la deviazione standard deve essere minore di 2 (se  $f_0 > 0.5$ ) nell'intervallo  $0.5f_0 < f < 2f_0$  e minore di 3 (se  $f_0 < 0.5$ ) sempre nel solito intervallo.

Per quanto detto nei punti I e II quindi un picco ad 1 Hz per la sua corretta affidabilità devono esserci almeno 20 finestre di 10 s ognuna, o per un picco a 0,5 Hz, 10 finestre a 40s.

Nella tabella sottostante vengono indicati parametri di affidabilità a seconda del picco di interesse.

$f_0$ [Hz]	Minimum value for $l_w$ [s]	Minimum number of significant cycles ( $n_c$ )	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Poiché i transienti eventualmente presenti nella registrazione vanno eliminati in fase di processing, è opportuno allungare il tempo di registrazione.

La tabella sopra indicata, fornita dal progetto SESAME deve comunque essere utilizzata in maniera molto indicativa.

Nella realtà infatti bisogna tenere presente che per la registrazione corretta di un picco a basse frequenze (bedrock sismico profondo quindi) a seconda delle caratteristiche geologiche del sito sono necessari tempi di registrazione superiori (anche nell'ordine delle ore).

E' quindi buona norma prima di effettuare misure di rumore conoscere la geologia della zona da investigare e fare riferimento a tutte le prove pregresse effettuate nel sito.

### **5.3.2 – CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO**

Nel migliore dei casi, la curva mostra un singolo picco 'netto', definibile in termini di ampiezza, deviazione standard relativa ed assoluta. In termini di ampiezza deve soddisfare le seguenti condizioni:

1. Esistenza di una frequenza  $f^-$  tra  $f_0/4$  ed  $f_0$  tale che  $A_0 / A_{H/V}(f^-) > 2$ ; dove  $A_0$  rappresenta l'ampiezza media del picco e  $A_{H/V}(f^-)$  l'ampiezza della frequenza  $f^-$ .
2. Esistenza di un'altra frequenza  $f^+$ , compresa tra  $f_0$  e  $4f_0$ , tale che  $A_0 / A_{H/V}(f^+) > 2$ ;
3.  $A_0 > 2$ .

Viceversa le condizioni di **stabilità** sono che:

1. Il picco deve apparire alla stessa frequenza sulle curve H/V corrispondenti alla somma e differenza della deviazione standard, con una percentuale del 5%;
2. La deviazione standard del picco in frequenza  $\sigma_f$ , deve essere inferiore ad una soglia massima  $\varepsilon(f_0)$ ;
3. La deviazione standard del picco in ampiezza  $\sigma_A(f_0)$ , deve essere inferiore ad una soglia massima  $\theta(f_0)$ ; Il valore  $\sigma_A(f_0)$  rappresenta il numero con cui moltiplicare e dividere la curva media H/V per ottenere le curve relative alla deviazione standard.

Di seguito sono inseriti i valori massimi accettabili per le deviazioni standard a diversi range di frequenza del picco.

Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

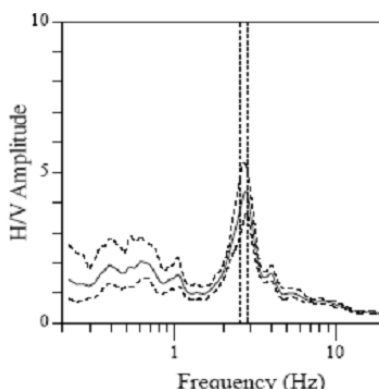
Quindi se la curva H/V per un dato sito soddisfa almeno 5 di queste 6 condizioni, il valore di  $f_0$  è da considerarsi rappresentativo della frequenza fondamentale; se l'ampiezza di picco  $A_0$  è

maggiore di 4 o 5, si può affermare con certezza che esiste una discontinuità ed un contrasto di velocità ad una qualche profondità.

Bisogna infine verificare che:

1. la frequenza  $f_0$  è consistente con la frequenza di cut-off del sensore e con la sensibilità;
2. il picco non ha origine industriale.

In basso si riporta un esempio di curva H/V, con picco ‘netto’ che soddisfa le condizioni di stabilità.



Window length $l_w$ [s]	Number of windows $n_w$	Number of significant cycles $n_c$	Frequency statistics from individual windows			
			$f_0$ [Hz]	$\sigma_f$ [Hz]	$A_0$	$\sigma_A(f_0)$
41	14	1561	2.72	0.11	4.4	1.2

Fig. 10 - Esempio di picco netto da SESAME (2004)

Non sempre la curva H/V mostra dei picchi netti. Talora sono poco chiari o allargati, e non soddisfano le condizioni sopra citate.

In questi casi sono imputabili a diversi fattori quali: un contrasto di impedenza moderato o alla bassa frequenza delle vibrazioni ambientali; condizioni di misura ventose e perturbate; un disaccoppiamento suolo-sensore; disturbi a bassa frequenza (camion, macchine a grande distanza); parametri di smoothing inadeguati; sensore a frequenza e sensibilità troppo basse.

### **5.3.3 – INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME**

A questo punto verificati i punti sopra elencati occorre allegare a tali risultati altre informazioni non descritte nel progetto SESAME per dare maggiore stabilità all'indagine.

Di seguito l'elenco completo:

1. Stazionarietà temporale dei rapporti spettrali.

In pratica una volta effettuata la registrazione, il dato viene diviso dall'operatore in finestre temporali, per ciascuna di esse il software calcola la curva H/V e come output restituisce un diagramma FT in cui al variare del tempo viene mostrato l'andamento del segnale.

---

Il segnale è stazionario se la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura.

2. Direttività del segnale (azimuth).

Il software calcola una volta selezionate le finestre la direttività del segnale ovvero la sua provenienza rispetto all'orientazione degli assi dei sensori dello strumento (di norma la componente orizzontale NS deve essere rivolta verso Nord).

La direttività corretta si ha quando il picco H/V (nel caso sia presente uno solo altrimenti tutti i picchi) è presente da 0 a 180° (da 180° a 360° è superfluo poiché la distribuzione del segnale è speculare) ovvero le sorgenti intorno allo strumento sono uniformi in tutte le direzioni.

Viceversa in caso di segnali direttivi in un range ridotto di frequenze le cause possono essere varie tra cui sorgenti non uniformi (es. rumori industriali).

In questo caso il risultato della registrazione non è attendibile. le variazioni azimuthali di ampiezza non devono superare il 30% del massimo.

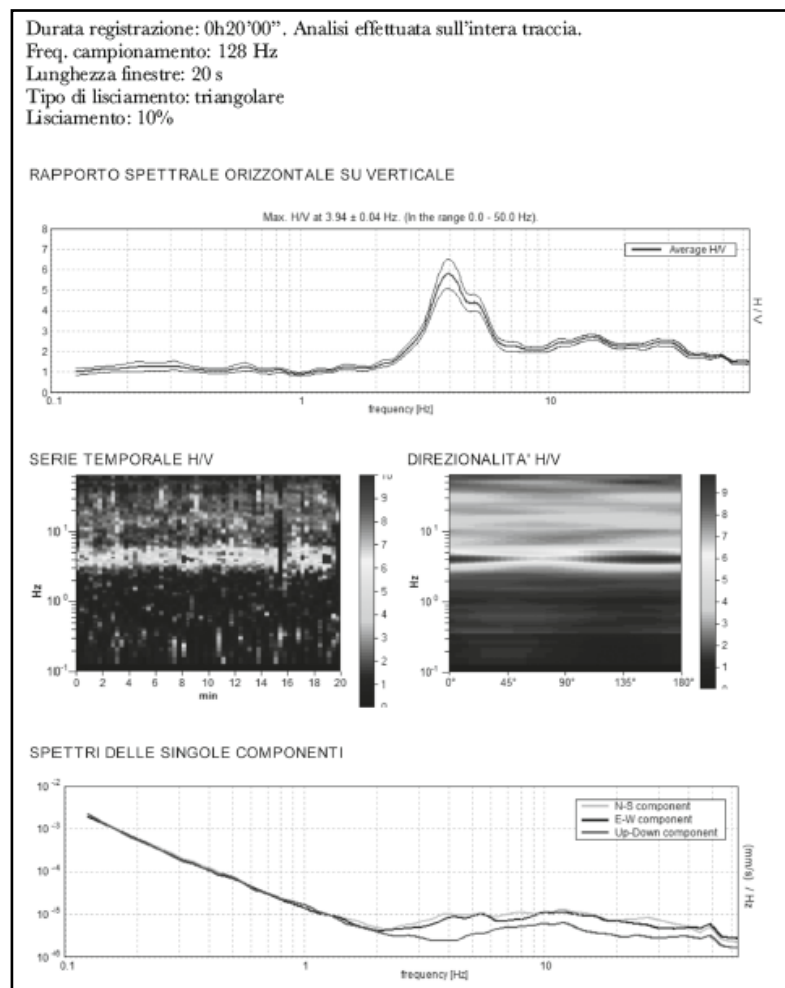
Questo deriva dal fatto che, nonostante la natura stocastica del fenomeno, in presenza di un campo d'onda diffuso, ovvero caratterizzato da sorgenti posizionate in maniera statisticamente omogenea attorno al sito di misura che si attivano in maniera non coordinata, l'andamento medio del segnale risulterà statisticamente indipendente dalla loro natura e posizione e sarà condizionato soprattutto dalla struttura del sottosuolo.

3. Si deve inoltre allegare l'andamento complessivo del rapporto H/V e gli spettri di ciascuna componente.

Ciò è utile per verificare che in corrispondenza del picco ci sia un effettivo abbassamento della componente verticale rispetto alle componenti orizzontali (plausibilità fisica).

Inoltre mediante il confronto dei vari spettri è possibile verificare se lo strumento è bene in bolla e l'eventuale presenza di inversioni di velocità caratterizzate contrariamente da quanto detto in precedenza da un abbassamento delle componenti orizzontali rispetto alla componente verticale.

4. Bisogna verificare l'assenza di rumore elettromagnetico caratterizzato da una forte direttività e da picchi molto stretti nella curva H/V.



**Picco H/V a  $3.9 \pm 0.04$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).**

**Criteri per una curva H/V affidabile**  
 [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.94 > 0.50$	OK	
$n_s(f_0) > 200$	$4725.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 190	OK	

**Criteri per un picco H/V chiaro**  
 [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^*$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste $f^*$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5.79 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00462  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < g(f_0)$	$0.01818 < 0.19688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < 0(f_0)$	$0.3534 < 1.58$	OK	

Fig. 11 - Esempio di acquisizione corretta e presentazione dei risultati (D.Albarello,S.Castellaro, 2011)

## 5.4 – VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLE MISURE HVSR

E' proposta, quale metodo di valutazione della qualità tecnica delle misure HVSR acquisite, la classificazione proposta da Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro,2011.

---

L'obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati.

La classificazione di Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro, 2011 si divide in 3 classi principali: Classe A, Classe B e Classe C.

**Classe A:** H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola.

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (stazionarietà)
2. le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (isotropia)
3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (assenza di disturbi)
4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (plausibilità fisica)
5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (robustezza statistica)
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (durata)

ECCEZIONE per la Classe A: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con ampiezza circa pari a 1, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile.

**Classe B:** curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE per la Classe A.

**Classe C:** curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura
2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse.

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia: Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: possibile

---

risonanza Tipo 2. Non presenta picchi “chiari” nell’intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza

### **5.5 – CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

Le misure di rumore HVSR sono state tutte registrate mediante l'utilizzo del tromografo *THEREMINO*, costituito da geofoni con frequenza di 4.5 Hz

La sua particolare forma e utilizzo è il risultato di alcune considerazioni sperimentali e non per motivi estetici o di designer:

- 1- Forma circolare per avere la minima resistenza al vento;
- 2- Cupola emisferica ribassata per avere la minima resistenza al vento;
- 3- Baricentro molto ribassato per avere la massima stabilità;
- 4- Peso aumentato da una zavorra in piombo;
- 5- Diametro sufficientemente largo per avere una maggiore stabilità;
- 6- Materiale in policarbonato per isolare acusticamente i geofoni dai rumori antropici ed ambientali;
- 7- I cavi non devono essere posizionati verticalmente rispetto allo strumento perché causano vibrazioni dovute al vento, il cavo ha l'effetto " bandiera " generando frequenze orizzontali che non hanno nulla a che fare con i microtremori;
- 8- Aumento della larghezza della base di appoggio, in questo modo i tre puntali che poggiano sul terreno aumentano la stabilità dello strumento e garantiscono una riduzione della rumorosità strumentale indotta da vento e rumori antropici;
- 9- Distanza identica tra i vari puntali, in questo modo si ha una eguale distribuzione a 360° delle vibrazioni indotte dal terreno;
- 10- Con il piombo di zavorra si è aumentata la pressione sul terreno evitando così saltellamenti verticali e garantendo una maggiore aderenza e continuità tra terreno e strumento;
- 11- La zavorra in piombo posizionata nella parte medio bassa della piastra e l'alleggerimento della cupola hanno spostato il baricentro strumentale a pochi cm dal piano di appoggio sul terreno, ciò va a favore della stabilità;
- 12- La forma rotondeggiante della piastra e la forma emisferica della cupola permette di avere un alto grado di permeabilità al vento, possibile affondare la piastra di 4- 5 cm nel terreno estirpando la cortina erbosa superficiale, in questo modo dal piano si campagna spunta solo la cupola riducendo ulteriormente l'effetto vento;

- 
- 13- Isolamento acustico del geofono grazie allo spessore della cupola, in questo modo di riduce l'effetto "microfono" dei geofoni che trasformano i rumori acustici in fastidiosi disturbi e rumori random;
  - 14- Spessori centimetrici delle pareti dell'ufo per evitare vibrazioni dannose dovute a spessori millimetrici dei contenitori spesso in plastica della scatola utilizzata;
  - 15- Minima superficie laterale per ridurre l'impatto con il vento;
  - 16- La forma tondeggiante e emisferica della piastra e della cupola permette di avere la medesima disposta al vento in tutti i 360 gradi;
  - 17- Contenitore basso e largo, e pesante al contrario di molti strumenti stretti alti e leggeri con pareti di lamierino sottile (vere casse acustiche), il contrario di come dovrebbero essere;
  - 18- Molta cura nel posizionamento all'interno dello strumento dell'elettronica e dei geofoni, riduzione al massimo di componenti inutili che hanno lo scopo di sporcare il segnale e una cura per schermare il segnale da inquinamento elettromagnetico.



---

## **6 - INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE**

In sismica non esistono soltanto le metodologie di indagine della rifrazione e della riflessione, esistono altre che prendono il nome di “sismica in foro”.

Una di esse, che è stata affrontata in questo lavoro di Tesi, è la sismica Down-Hole. In questa tecnica viene fatto un foro nel terreno (di solito si utilizza il foro fatto per un carotaggio) opportunamente rivestito in cui viene fatto calare un sensore a tre componenti, in grado quindi di registrare sia le onde P che le S (SH e SV), a intervalli di 1-2 metri fissandolo alle pareti del foro tramite un sistema ad aria compressa o idraulico.

La sorgente viene posta in superficie ad una distanza  $d$  dal foro.

L'impulso alla sorgente produce lungo la direzione di propagazione verticale prevalentemente onde longitudinali P se la battuta è effettuata verticalmente (ad esempio una colpo di mazza su di una piastra) mentre produce impulsi prevalentemente orizzontali e quindi onde di taglio polarizzate orizzontalmente (onde SH) se vengono effettuate battute parallele al terreno di superficie (ad esempio lateralmente ad una trave di legno opportunamente fissata al terreno).

L'acquisizione dei dati può avvenire in due modi differenti:

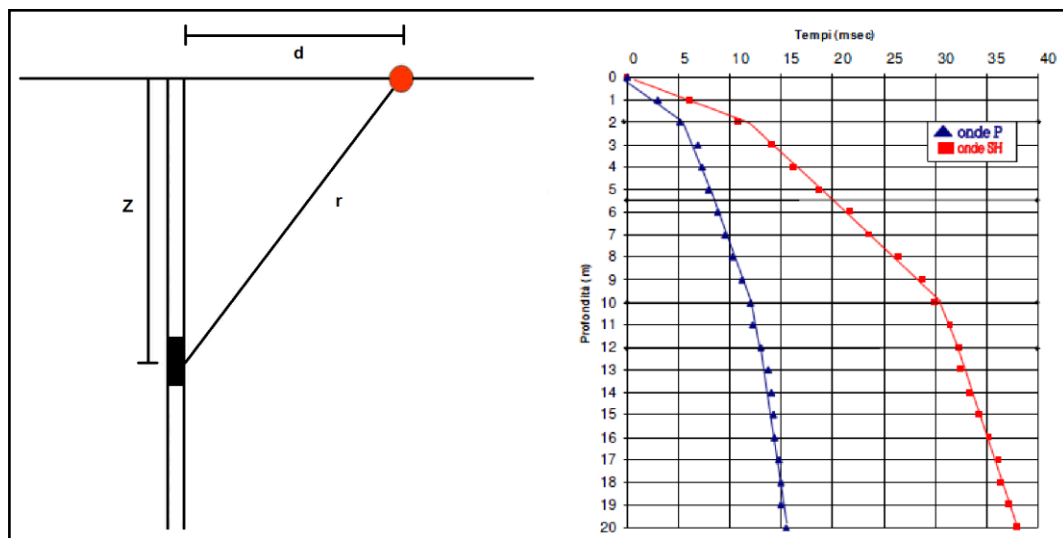
### **6.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE**

Per poter interpretare il down - hole con il metodo diretto, inizialmente, è necessario correggere i tempi di tragitto  $t$  misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde.

Quindi se  $d$  è la distanza della sorgente dall'asse del foro,  $r$  la distanza fra la sorgente e il sensore tridimensionale,  $z$  la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti ( $t_{corr}$ ) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{corr} = (Z / r) t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico  $t_{corr} - z$  in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dal coefficiente angolare (come nella sismica a rifrazione) dei segmenti di retta lungo i quali si interpolano i dati sperimentali.



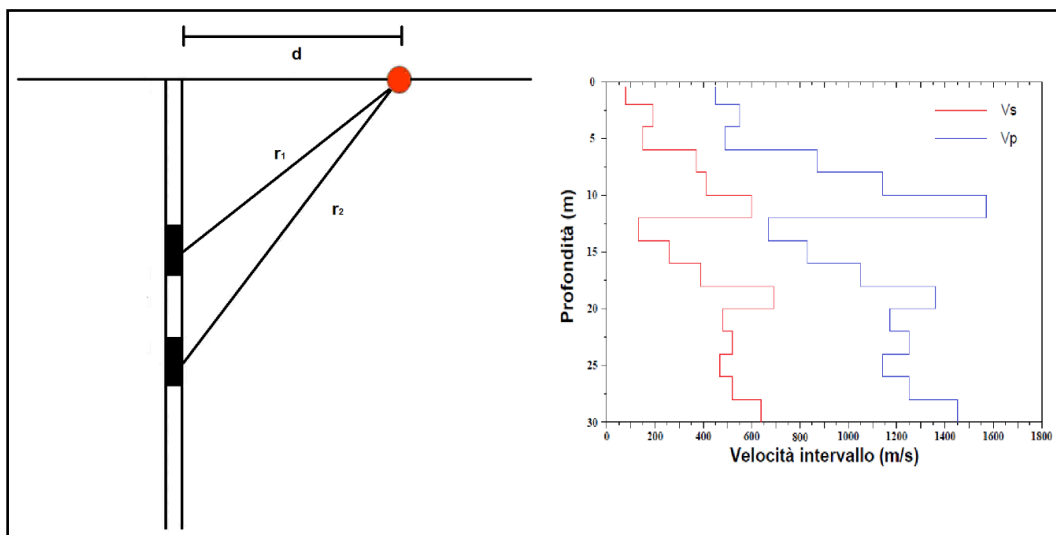
Schema di acquisizione con un ricevitore e a destra il relativo risultato

## 6.2 METODO INTERVALLO

Questo metodo risulta migliore del primo in quanto i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità consentendo una migliore definizione del profilo di velocità.

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la formula vista in precedenza e la “velocità di intervallo” delle onde P e S con la formula seguente:

$$V_{p,s} = (Z_2 - Z_1) / (t_{2corr} - t_{1corr})$$



Schema di acquisizione con doppio ricevitore e a destra il relativo risultato.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti infatti non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti e non è applicabile nel caso in cui  $t_{2corr} < t_{1corr}$ .

---

## **7 - METODI ELETTRICI E TOMOGRAFIA**

I metodi di geoelettrica si propongono di caratterizzare il sottosuolo in termini di resistività apparente.

Il sottosuolo può essere schematizzato in prima approssimazione come una serie di strati piani e paralleli, ognuno caratterizzato da un proprio valore di resistenza al passaggio della corrente elettrica.

Il valore della resistenza che l'ennesimo strato dell'unità di volume del materiale offre al passaggio della corrente elettrica, è ottenibile o misurando direttamente la resistività di un campione del materiale, oppure generando un campo elettrico le cui linee di forza partono dalla superficie del terreno.

In tutti gli strati fino all'n-esimo, la resistività apparente si ottiene dalla relazione:

$$\rho_a = \cdot \frac{V}{J} \cdot K$$

Questo valore è riferito alla profondità dello strato n-esimo, ma è influenzato anche dai valori di profondità e resistività degli strati precedenti.

Il coefficiente K tiene conto della geometria elettroica, mentre il rapporto V/I definisce la resistenza del terreno interposto tra gli elettrodi.

In un sottosuolo caratterizzato da uno strato di spessore indefinito, la resistività apparente coincide con quella reale dello strato. Infatti La resistività è la resistenza che un volume unitario di materiale offre al passaggio della corrente elettrica.

Il fenomeno che descrive il passaggio della corrente nei materiali è noto col nome di conduzione elettrica, ed avviene nei materiali, grazie ad una migrazione di elettroni o di ioni.

La prima si realizza nei metalli alcalini ed alcalino-terrosi, come Cu, Ag, Al, dove migrano gli elettroni liberi di valenza. La seconda invece si osserva in fluidi elettroliti, gassosi o liquidi, e comporta oltre ad un flusso di carica, un flusso di materia.

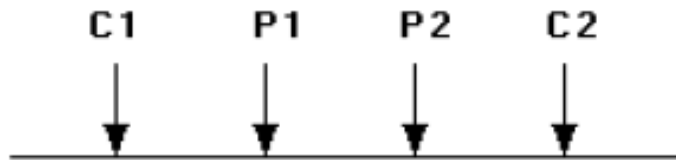
Esistono anche elettroliti allo stato solido, in cui però gli ioni sono rigidamente confinati in punti del reticolo cristallino, e quindi difficilmente mobilizzabili.

La conduzione elettrica nei litostrati è solamente di tipo ionico, e dipende dalla presenza di acqua e dalla concentrazione di ioni disciolti.

In questo caso il liquido e la porosità dello strato, definiscono la mobilità degli ioni disciolti.

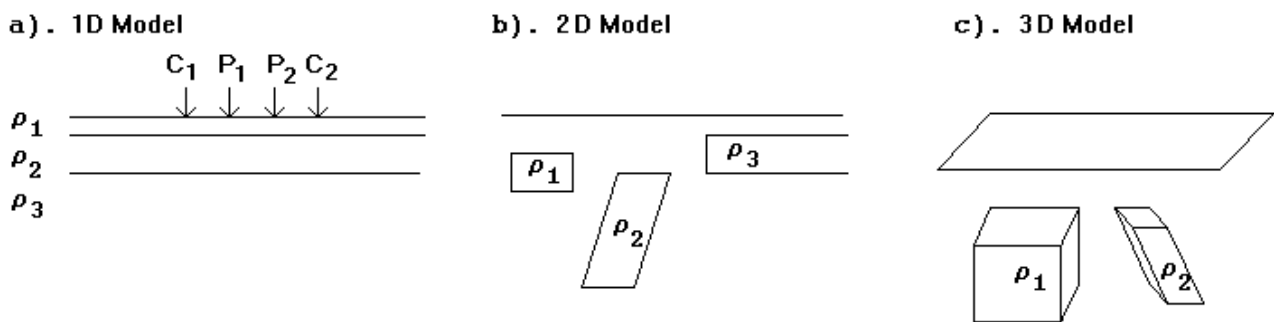
Generalmente un dispositivo per misure di resistività del terreno è costituito da un quadripolo i cui gli elettrodi sono posti su quattro punti della superficie del suolo, e le cui disposizioni geometriche sono illustrate in figura 3.4.

A partire dai dati acquisiti in termini di resistività apparente, è possibile ottenere un modello della distribuzione delle resistività reali in profondità, mediante l'uso di programmi di inversione creati allo scopo.



**FIGURA 3.1** – SCHEMA ESEMPLIFICATIVO DI UN DISPOSITIVO ELETTRICO, CON DUE ELETTRODI DI POTENZIALE (P1 E P2) E DUE ELETTRODI DI CORRENTE (C1 E C2).

Sono state sviluppate tecniche 1D, 2D e 3D, che differiscono per la dimensionalità del modello ottenibile.



**FIGURA 3.2** – MODELLI A DIFFERENTI DIMENSIONI.

## **7.1 PRINCIPI**

Per descrivere il fenomeno della conduzione elettrica si fa riferimento alla prima legge di Ohm, la quale stabilisce che il rapporto tra la differenza di potenziale ( $\Delta V$ ) esistente tra due punti di un conduttore e l'intensità di corrente ( $I$ ) che in esso fluisce è costante:

$$\frac{\Delta V}{I} = \text{cost}$$

A questa costante è dato il nome di resistenza elettrica:

$$\frac{\Delta V}{I} = R$$

---

La seconda legge di Ohm dichiara che, a parità di ogni altra condizione, la resistenza elettrica di un conduttore è direttamente proporzionale alla sua lunghezza (L) ed inversamente proporzionale alla sua sezione (A):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

in cui la costante di proporzionalità  $\rho$  è definita resistività o anche resistenza elettrica dell'unità di volume.

Dalla combinazione delle due si ottiene:

$$\Delta V = \rho \cdot \frac{I}{A} \cdot L$$

Il rapporto  $I/A$  definisce la densità di corrente J, dalla quale si deriva il concetto di intensità di corrente:

$$I = \int_S \vec{J} \times d\vec{A}$$

Nell'integrale di superficie, il prodotto tra i due vettori è un prodotto scalare, e per l'intensità di corrente si assume la definizione di flusso di J attraverso una superficie. Fatta questa considerazione, la superficie A che compare al denominatore è una parte della superficie equipotenziale definita nel conduttore, dal campo elettrico.

Tornando al flusso di J, possiamo definire due condizioni per una superficie chiusa:

1. 
$$\oint_S \vec{J} \times d\vec{A} = 0$$

2. 
$$\oint_S \vec{J} \times d\vec{A} \neq 0$$

Il primo caso ci dice che nel volume racchiuso da A non ci sono sorgenti di carica J, mentre viceversa il secondo contempla la condizione che nel volume racchiuso da A ci siano sorgenti di J.

Applicando il teorema della divergenza nell'equazione 1, si trasforma l'integrale di superficie chiusa in un integrale esteso al volume racchiuso, quindi:

$$\oint_S \vec{J} \times d\vec{A} = \int_V \text{div}(\vec{J}) \cdot dV = 0$$

---

e scrivendo il secondo membro in forma differenziale:

$$\nabla \cdot \vec{J} \cdot dV = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

questa equazione ci dice che nel volume considerato, la divergenza della densità di corrente risulta essere nulla, ed applicando la legge di Ohm, si riscrive in termini di campo elettrico:

$$\frac{1}{\rho} \nabla \vec{E} = 0$$

Ora, ricordando che in caso di campo conservativo il vettore campo elettrico si può esprimere come gradiente del potenziale scalare V

$$\vec{E} = -gradV = -\vec{\nabla}V$$

si sostituisce, ottenendo l'equazione di Laplace, o 'equazione di continuità per i mezzi isotropi ed omogenei'.

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 V = 0$$

In questa equazione la resistività è una quantità scalare. Laddove viceversa, la resistività questa varia lungo le tre direzioni dello spazio, dovrà considerarsi come un tensore di rango 2 e l'equazione si scrive nel modo seguente:

$$\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

## **7.2 - LA RESISTIVITÀ E LA SUA RELAZIONE CON LA LITOLOGIA**

Come abbiamo precedentemente detto, una prima importante distinzione nell'ambito dei numerosi materiali geologici per ciò che riguarda le loro caratteristiche elettriche, è operabile in termini di porosità.

I mezzi porosi (sedimenti e rocce porose), sono descrivibili come sistemi granulari dove i vuoti intergranulari possono essere occupati da fluidi come aria, acqua, idrocarburi.

La resistività globale è quindi interpretabile come la somma dei contributi 'pesati' del fluido e della porzione rocciosa granulare.

---

Dal momento che la maggior parte dei minerali che compongono una roccia e/o un sedimento sono silicati, globalmente buoni isolanti, una notevole rilevanza acquisiscono la presenza, la quantità e le proprietà elettriche del fluido.

Una roccia può contenere un fluido in base alla sua porosità, definita come il rapporto:

$$\phi = \frac{v_p}{v_b} \cdot 100$$

in cui  $v_p$  è la somma dei volumi dei pori contenuti nel volume  $v_b$  del mezzo poroso. Si distingue una porosità primaria dovuta ai processi sedimentari, e rappresentata dagli spazi intergranulari in un sedimento o in una roccia clastica, ed una porosità secondaria in cui i vuoti sono costituiti da fratture di origine tettonica o, più raramente, prodotti da fenomeni di dissoluzione.

Nell'ambito della porosità primaria inoltre, si differenziano una porosità totale rappresentata dall'intero sistema di vuoti, ed una porosità effettiva o anche porosità interconnessa, legata ai pori realmente in comunicazione tra loro.

Raramente la porosità supera il 45%; i carbonati compatti (calcari e dolomie) e le evaporati possono presentare valori pressoché nulli; le arenarie ben consolidate mostrano una porosità intorno al 10-15%, mentre le formazioni sabbiose incoerenti valori fino al 30%.

Le formazioni argillose possiedono una porosità molto alta (anche maggiore del 40%), ma la permeabilità è quasi nulla perché le lamelle che le costituiscono sono di dimensioni tali da limitare in modo molto sensibile il flusso.

La legge di Archie vale nell'assunzione di porosità primaria, ed in particolare mette in evidenza la relazione esistente tra la porosità del mezzo ( $\Phi$ ) e la resistività di parte solida ( $\rho_{ms}$ ) e fluida ( $\rho_w$ ) :

$$F = \frac{\rho_{ms}}{\rho_w} = a \cdot \phi^{-m}$$

dove  $F$  è il fattore di formazione. I parametri 'a' ed 'm' sono variabili in un range, che per le arenarie varia è sperimentalmente:

$$0,5 \leq a \leq 4,5$$

$$0,9 \leq m \leq 2,2$$

In particolare 'a' dipende dalla litologia e dalla geometria del sistema di vuoti; 'm' è il fattore di cementazione o di tortuosità, dipendente dal tipo di sedimenti, dal grado di compattamento della roccia, dalla forma e dalla connessione dei pori, e dalla porosità.

---

Sono state proposte varie relazioni  $F$ - $\Phi$ , prodotte dagli studi effettuati nell'ambito della ricerca di idrocarburi, valide per differenti litologie:

#### ARENARIE

Formula di Humble

$$F = \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

Formula di Humble semplificata

$$F = \frac{0.81}{\phi^2}$$

Formula della Phillips

$$F = \frac{1.45}{\phi^{1.54}}$$

Formula della Chevron

$$F = \frac{1.13}{\phi^{1.73}}$$

#### CALCARI

Calcari fini

$$F = \frac{1}{\phi^2}$$

Rocce carbonatiche compatte

$$F = \frac{1}{\phi^{2.22+2.5}}$$

Formula della Shell

$$F = \frac{1}{\phi^{1.87+0.019\phi}}$$

La resistività di un mezzo poroso contenente fluidi, dipende anche dalla saturazione in quel fluido, secondo la relazione:

$$S_w = \left( \frac{R_0}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{aR_w}{\phi^{-m} R_t} \right)^{\frac{1}{n}}$$

in cui  $S_w$  è la saturazione in acqua (o in un altro fluido),  $R_t$  è la resistività vera della formazione,  $R_0$  la resistività della medesima formazione satura al 100% d'acqua a resistività  $R_w$ , ed  $n$  è l'esponente di saturazione, solitamente variabile tra 1 e 2.5.

Per ciò che concerne le rocce ignee e metamorfiche, si nota che in assenza di fratturazione la resistività è generalmente alta. In questo caso la porosità può essere solo di origine secondaria, allora valgono le considerazioni fatte in precedenza, e la resistività complessiva dipende dal grado di fratturazione, dalla percentuale di fratture riempite di fluido, e dal tipo di fluido.

Passando a materiali non rocciosi, si nota che i metalli sono estremamente conduttivi, i composti chimici come KCl ed NaCl sono elettroliti forti ed anche per concentrazioni deboli, possono ridurre fortemente la resistività del terreno. L'effetto di elettroliti deboli come l'acido acetico, è in confronto molto minore, mentre gli idrocarburi sono molto resistivi.



MATERIALE	RESISTIVITA ( $\Omega \cdot m$ )	CONDUTTIVITA' (Siemen/m)
<b>ROCCE IGNEE E METAMORFICHE</b>		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	
Basalto	103 - 106	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marmo	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quarzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>ROCCE SEDIMENTARIE</b>		
Arenaria	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Argilla	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Calcere	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>SUOLI ED ACQUA</b>		
Argilla	1 - 100	0.01 - 1
Alluvioni	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Acqua di falda	10 - 100	0.01 - 0.1
Acqua marina	0.2 - 5	
<b>ALTRI MATERIALI</b>		
Ferro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
KCl 0,01M	0.708	1.413
NaCl 0,01M	0.843	1.185
Acido acetico 0,01 M	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{16}$	$1.429 \times 10^{-17}$

Figura 3.3 - Resistività di alcune rocce comuni, minerali e composti chimici.

### **7.3 - TECNICHE 2D**

Le tecniche 2D sono oggi largamente utilizzate, dato lo sviluppo di strumenti multielettrodi e di veloci software di inversione dei dati.

In un modello 2D la resistività può variare sia verticalmente che orizzontalmente, ma non perpendicolarmente al profilo, assunzione ragionevole per profili attraverso corpi geologici allungati. Benché una prospezione 3D sia più accurata, quelle 2D rappresentano un buon compromesso tra accuratezza e tempi e costi della prospezione.

Infatti tipicamente, mentre un profilo di resistività 1D comprende circa 10/20 letture, un 2D 100/1000 ed un 3D arriva fino a 106 misure.

La tomografia elettrica in 2D viene effettuata mediante un grande numero di elettrodi (25 o più), connessi ad un cavo. Sistematicamente ed alternativamente, quattro elettrodi vengono attivati

dal processore dello strumento, due come energizzatori e due come misuratori di potenziale, secondo la sequenza e la disposizione programmate dall'operatore.

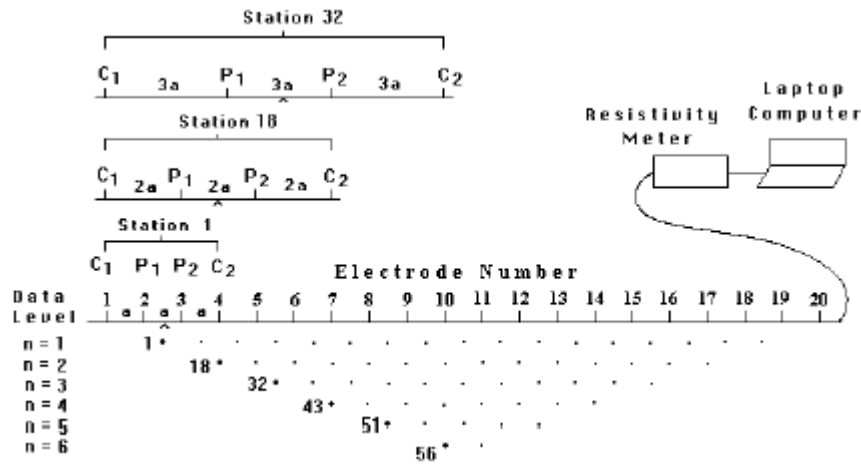


Figura 3.6 - Disposizione di 20 elettrodi attaccati ad un cavo a distanze costanti, e connessi ad un'unità elettronica di attivazione e ad un computer portatile. La geometria è di tipo wenner, con spaziatura "a".

Ad esempio, avendo scelto un array composto da 20 elettrodi e volendo effettuare misure secondo una disposizione wenner, inizialmente lo strumento misurerà attivando lungo il cavo 4 elettrodi alla volta a distanza 1a, inviando corrente dai due esterni e misurando il potenziale tramite i due centrali. Ripeterà poi la medesima operazione per distanze interelettrode di 2a, 3a, 4a, 5a, fino al limite massimo consentito dai 20 elettrodi, di spaziatura 6a.

Si nota che all'aumentare della spaziatura decresce il numero di misure di potenziale possibili, perciò il numero di misure effettuabili lungo lo stesso array dipende fortemente dalla geometria.

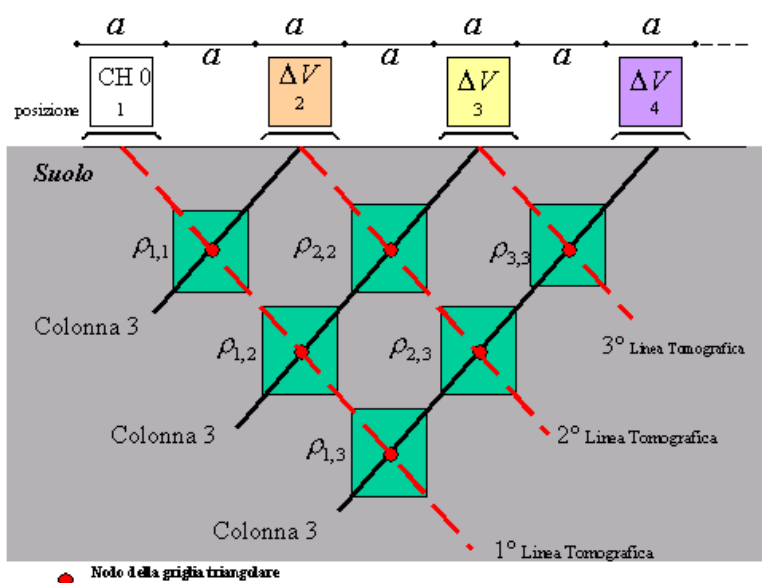
La misura di potenziale ottenuta è relativa ad un punto nel sottosuolo (DATA POINT), che giace orizzontalmente in corrispondenza del punto medio del set di elettrodi utilizzati, e la cui profondità dipende dalla spaziatura utilizzata. Ad esempio per una geometria dipolo-dipolo (fig.3.7) il data point giace a metà tra il dipolo di corrente e quello di potenziale.

Al data point viene associato un volume di terreno, in modo da discretizzare l'intero volume di indagine tramite un insieme di volumi elementari, creando una griglia.

Le resistività di ogni data point, quindi di ogni volume elementare, si ottengono con misure successive di potenziale al variare della distanza elettrode, e sono date dalla formula:

$$\rho_{i,j} = \frac{\Delta V_{j+1}}{I_i} \cdot na \cdot \pi(n+1)(n+2)$$

in cui  $i$  e  $j$  sono le posizioni rispettivamente del dipolo energizzante del dipolo di potenziale.



**FIGURA 3.7** - ESECUZIONE DI UN PROFILO DI TOMOGRAFIA CON GEOMETRIA DIPOLO-DIPOLO E POSIZIONE RELATIVA AGLI ELETTRODI DEI DATA POINT E DELLE LINEE TOMOGRAFICHE.

Essendo nota l'intensità di corrente inviata al sottosuolo, la misura di potenziale è presto tramutata in termini di resistività apparente, e plottata in una sezione  $xy$  di 'pseudoresistività', ancora però molto approssimativa rispetto alla reale distribuzione di resistività del sottosuolo, ed oltretutto variabile in funzione del tipo di array.

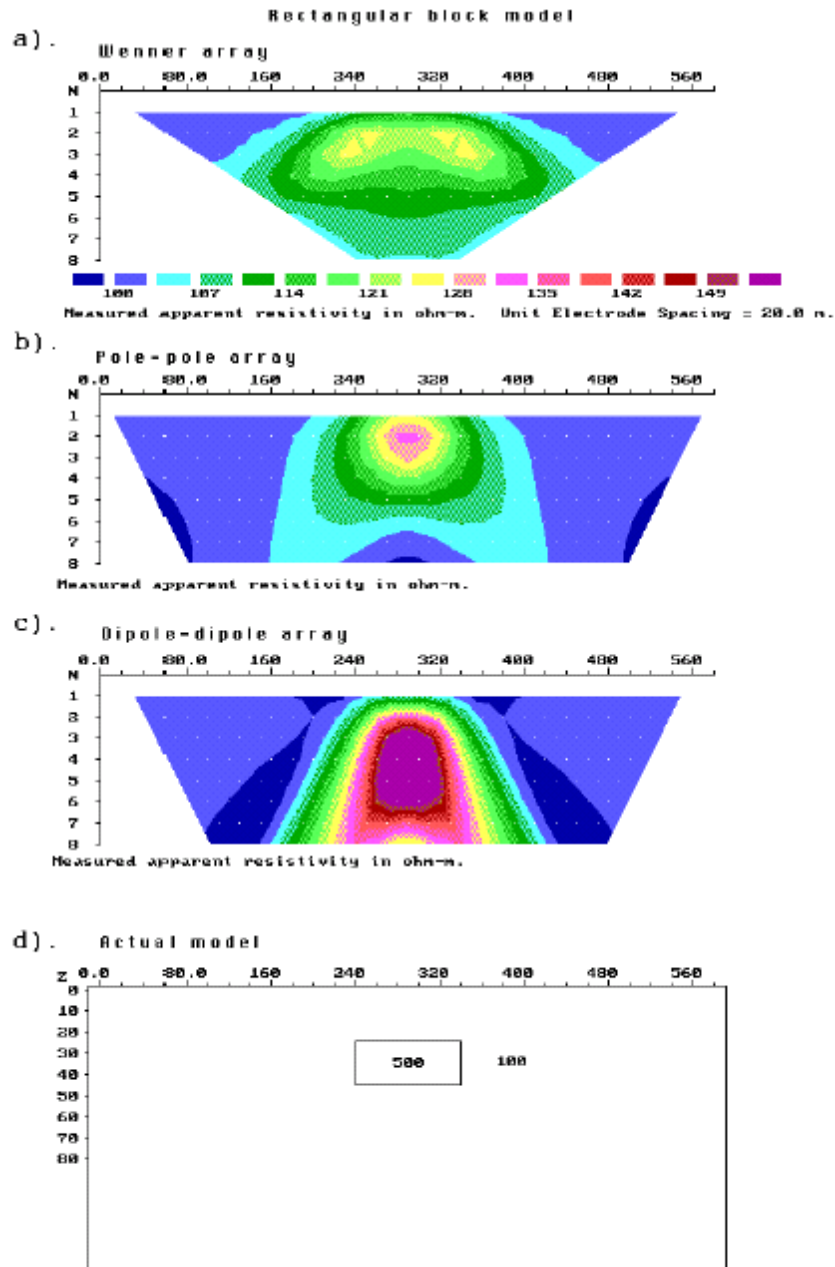


Figura 3.8 - Pseudosezione di resistività da un profilo con array Wenner, polo-polo e polo-dipolo, per una distribuzione di resistività nota. Si nota come la risposta dipenda dal tipo di array impiegato.

Ogni tipo di array ha un proprio utilizzo ottimale in determinate condizioni geologiche, in base alla sua sensibilità. La sensibilità è un indice di quanto un cambiamento di resistività del terreno influenzi la misura di potenziale, e risulta con questo in relazione di proporzionalità diretta. Per determinare la massima profondità raggiungibile per mezzo di un array, si moltiplica la massima distanza elettrodica usata “a” oppure la massima lunghezza “L”, per l’appropriato ‘fattore di profondità’.

Array type		$z_e/a$	$z_e/L$
Wenner Alpha		0.519	0.173
Wenner Beta		0.416	0.139
Wenner Gamma		0.594	0.198
Dipole-dipole	n = 1	0.416	0.139
	n = 2	0.697	0.174
	n = 3	0.962	0.192
	n = 4	1.220	0.203
	n = 5	1.476	0.211
	n = 6	1.730	0.216
Equatorial dipole-dipole			
	n = 1	0.451	0.319
	n = 2	0.809	0.362
	n = 3	1.180	0.373
	n = 4	1.556	0.377
Wenner - Schlumberger			
	n = 1	0.52	0.173
	n = 2	0.93	0.186
	n = 3	1.32	0.189
	n = 4	1.71	0.190
	n = 5	2.09	0.190
	n = 6	2.48	0.190
Pole-dipole	n = 1	0.52	
	n = 2	0.93	
	n = 3	1.32	
	n = 4	1.71	
	n = 5	2.09	
	n = 6	2.48	
Pole-Pole		0.867	

Figura 3.9 - Profondità di investigazione massima ( $z$ ) per i diversi array ( $L$  è la lunghezza totale dell'array). Si notano identici valori di  $z/a$  per Wenner-Schlumberger e polo-dipolo.

### **7.3.1 - ARRAY WENNER**

L'array Wenner consente di ottenere medesimi risultati con un minor numero di misure rispetto alle altre geometrie, garantendo una buona copertura orizzontale.

La sensitività è distribuita perlopiù orizzontalmente attraverso il centro del profilo, ecco perchè è indicato per rilevare variazioni verticali più che orizzontali.

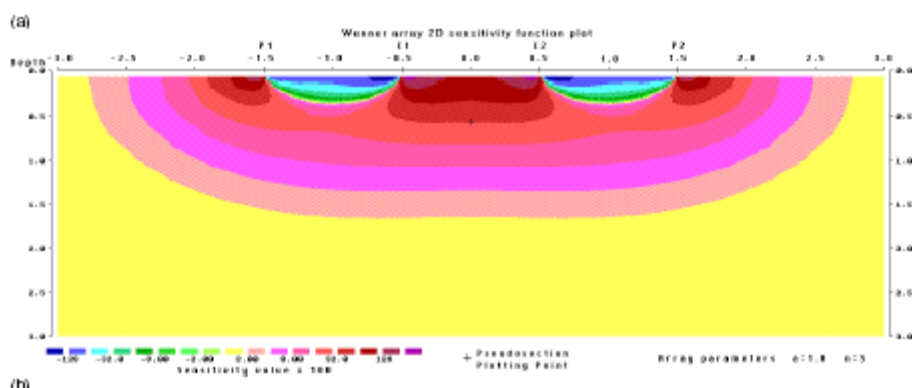


Figura 3.10 - Pattern di sensitività per l'array Wenner.

L'intensità del segnale è inversamente proporzionale al fattore geometrico,  $2\pi a$  (piuttosto piccolo), quindi essendo il segnale molto forte, risulta andare più in profondità rispetto alle altre geometrie.

La profondità di investigazione è circa la metà della spaziatura "a".

### 7.3.2 ARRAY DIPOLO-DIPOLO

Per il dipolo-dipolo la prima misura inizia con spaziatura 1a tra elettrodi di potenziale e corrente, poi si varia solo il rapporto tra le distanza C1-P1 e C1-C2 ("n" factor), fino ad un valore di accuratezza minima (legato alla debolezza del segnale) pari a 6.

La spaziatura tra gli elettrodi di corrente C2-C1 e gli elettrodi di potenziale P1 e P2, resta fissa. Si prosegue incrementando la distanza elettrodica, ed aumentando di conseguenza la profondità di investigazione.

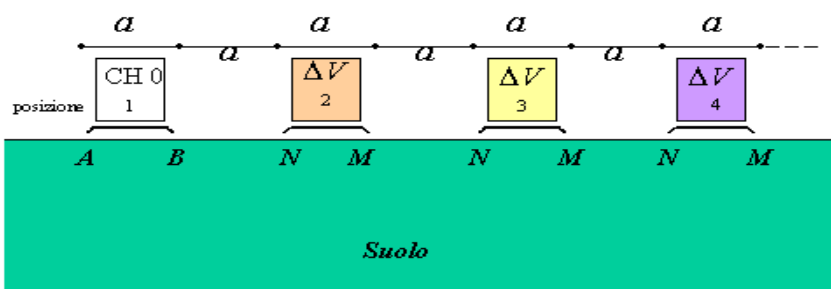


Figura 3.11 – Esecuzione di una tomografia elettrica con l'array dipolo-dipolo.

Questo array è sensitivo a variazioni orizzontali, quindi all'individuazione di strutture orizzontali come sill o livelli sedimentari.

Pur garantendo una risoluzione orizzontale maggiore rispetto all'array Wenner, la profondità di investigazione è inferiore.

Un altro svantaggio è la debolezza del segnale per alti valori di "n", in quanto il voltaggio è inversamente proporzionale ad  $n^3$ . Ciò significa che a parità di corrente la resistività misurata scende circa di 200 volte quando n aumenta da 1 a 6.

Un metodo per ridurre questa caduta di potenziale, è quello di aumentare la spaziatura "a".

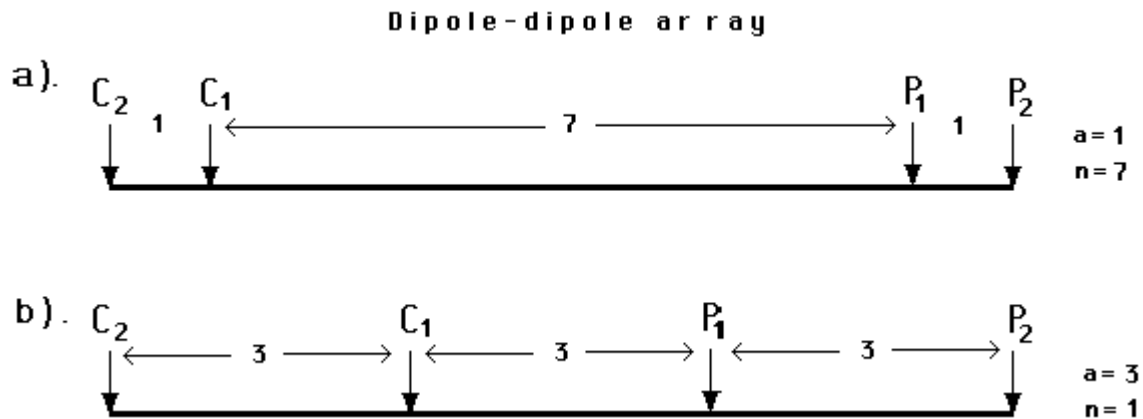


Figura 3.12 - Due differenti disposizioni dipolo-dipolo: nella b), l'intensità del segnale è 28 volte maggiore rispetto alla a).

Perciò, al fine di usare in maniera soddisfacente questo array, lo strumento deve presentare un'alta sensibilità ed un buon circuito di rifiuto del rumore, ed in fase di misura l'accoppiamento elettrodi-suolo deve essere soddisfacente.

Si nota che il datum point cade in una zona a sensibilità media. Per il dipolo-dipolo infatti la distribuzione dei data point nella pseudosezione non riflette l'area del sottosuolo mappata dalle misure di resistività apparente, il che va considerato in fase di inversione.

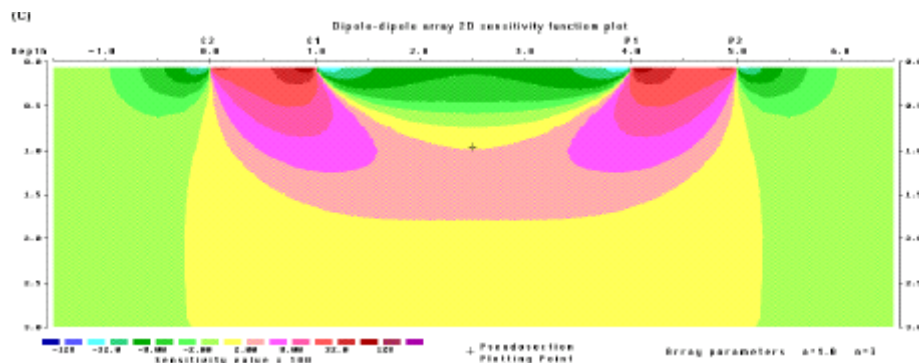


Figura 3.13 - Pattern di sensibilità per l'array Dipolo-dipolo. Si noti che vicino agli elettrodi la sensibilità è ovunque molto alta.

### 7.3.3 ARRAY WENNER-SHLUMBERGER

E' un array ibrido in cui la distanza elettrodoica è costante e fissa. Qui il fattore "n" è il rapporto tra la distanza C1-P1 (o P2-C2) e la spaziatura P1-P2.

Il pattern di sensitività presenta una lieve curvatura verticale sotto il centro dell'array, sensitività debolmente inferiori nelle regioni tra C1 e P1 e C2 e P2, e maggiori tra P1 e P2.

Ecco perché questa disposizione è indicata in aree contenenti sia strutture verticali che orizzontali, e rappresenta un buon compromesso tra il Wenner ed il dipolo-dipolo.

L'intensità del segnale e la copertura orizzontale sono intermedie tra queste due configurazioni, e la profondità di investigazione media è più grande del Wenner del 10% a parità di distanza C1-C2.

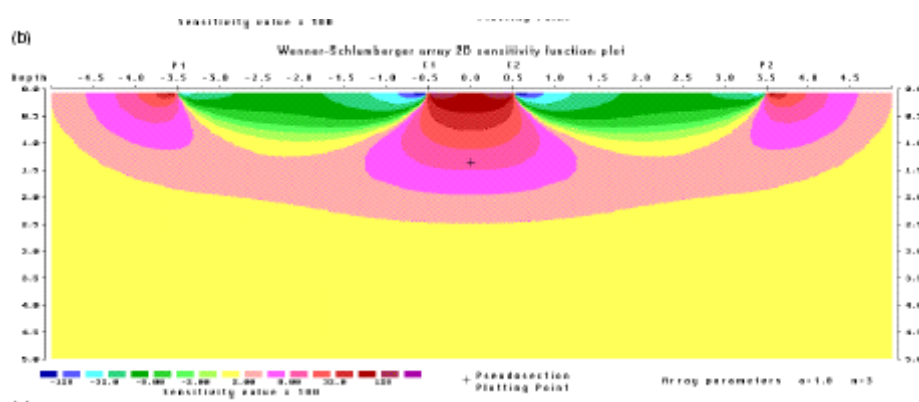


Figura 3.14 - Pattern di sensitività per l' array Wenner-Shlumberger.



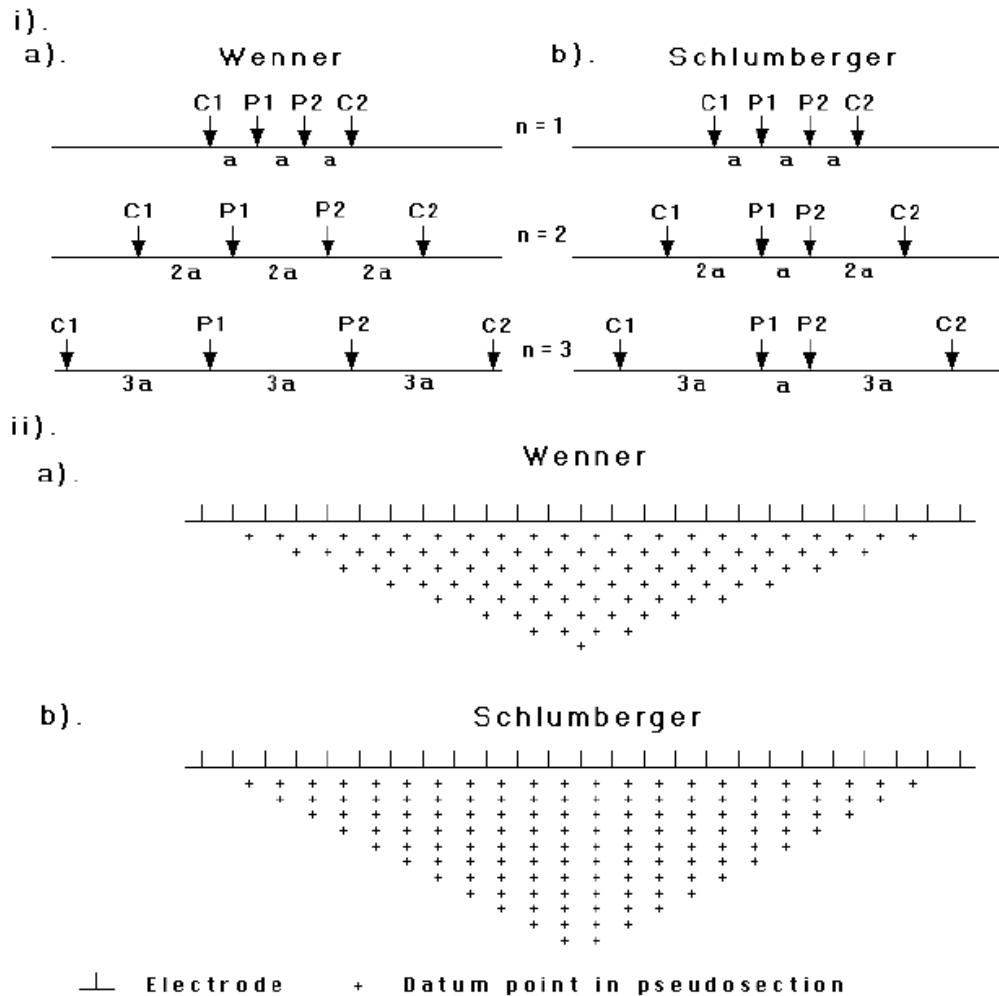


Figura 3.15 – Array Wenner e Schlumberger: esecuzione delle misure e datum points in profondità.

### **7.3.4 ARRAY POLO-POLO**

È un array assai poco comune ed in pratica la geometria ideale polo-polo con un solo elettrodo di corrente ed un solo elettrodo di potenziale, non esiste.

Quindi per approssimare la condizione, i secondi elettrodi C2 e P2 sono posti a grande distanza, pari circa  $20a$ , e la loro influenza è proporzionale al rapporto  $C1-P1 / C2-P1$ .

La procedura con il polo-polo è simile a quella wenner: sempre con 20 elettrodi a spaziatura  $a$ , si parte con 19 misure a distanza  $a$ , per poi passare a 18 spaziate  $2a$  e così via.

Uno svantaggio è che la grande distanza tra gli elettrodi di potenziale, porta alla registrazione di un segnale di piccola intensità, difficilmente distinguibile dal noise.

Quindi un suo utilizzo soddisfacente, si riduce a piccole spazature (minori di 10 metri), come in prospezioni archeologiche.

La copertura orizzontale è larga, quindi benchè la profondità di investigazione sia alta, la risoluzione resta comunque troppo bassa.

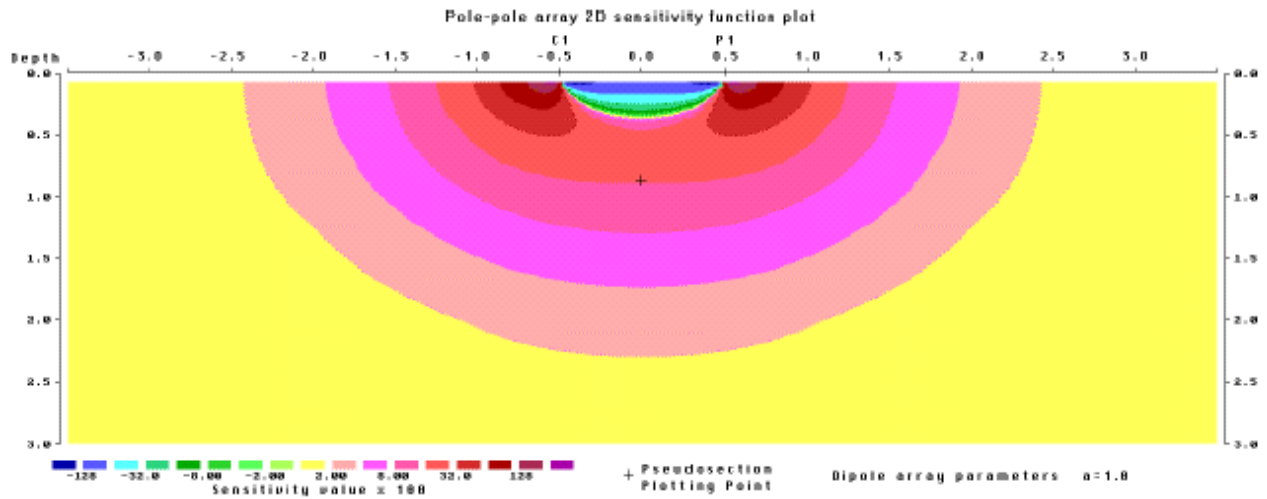


Figura 3.16 - Pattern di sensitività per l'array Wenner-Shlumberger.

### 7.3.5 ARRAY POLO-DIPOLO

Anche l'array polo-dipolo presenta una buona copertura orizzontale, ma l'intensità del segnale è maggiore rispetto al dipolo-dipolo, e non è sensitivo al noise come l'array polo-polo.

Essendo asimmetrico produce anomalie asimmetriche anche su strutture simmetriche. Per eliminare questo effetto le misure vengono ripetute secondo una disposizione inversa, quindi combinate.

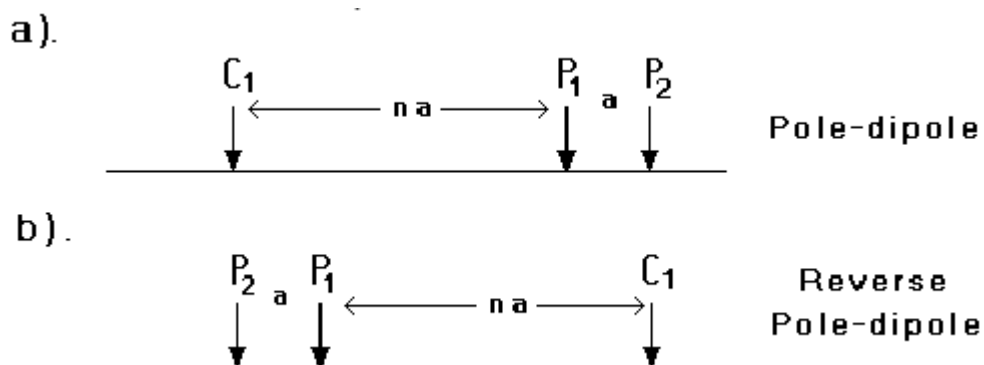


Figura 3.17 – Misure normale ed inversa eseguite con l'array polo-dipolo.

---

L'elettrodo C2 è necessario ma va posto sufficientemente lontano dal profilo, e la sua influenza è proporzionale a  $(C1-P1/C2-P1)^{1/2}$ . Questa geometria risulta meno affetta dall'elettrodo remoto rispetto all'array polo-polo, e quando  $C2 > 5 C1-P1$ , l'errore è inferiore al 5%.

L'intensità del segnale decresce con  $(n)^{1/2}$ , ma la spaziatura P1-P2 può essere incrementata.

#### **7.4 INVERSIONE DEI DATI**

Lo scopo dei metodi di inversione è quello di trovare un modello la cui risposta equivalga al set di dati misurati, modello che tuttavia non è mai univoco.

Il criterio di scelta dei metodi di inversione nel range di modelli che approssimano i dati reali, è di minimizzare la differenza tra realtà e modello, quantificata tramite lo scarto quadratico medio.

Il programma Res 2D e usa un metodo iterativo chiamato "smoothness constrained" (deGroot-Hedlin and Constable, 1990), la cui formulazione matematica è:

$$(JTJ+uF)d = JTg-uFr$$

dove F è la matrice di smoothing; J è la matrice Jacobiana delle derivate parziali; r è un vettore contenente il logaritmo dei valori di resistività del modello; u è il 'damping factor' che controlla il peso dato al modello di smoothness nel processo di inversione, ed è direttamente proporzionale all'RMS ed allo smoothing del modello; d è il vettore perturbazione del modello che rappresenta le variazioni del modello di resistività; g è il vettore di discrepanza e contiene le differenze tra i valori calcolati e misurati di resistività apparente, generalmente espressi come RMS (scarto quadratico medio).

Ad ogni iterazione si cerca di minimizzare g ed il reciproco di F, detto anche roughness del modello di resistività, che corrisponde al quadrato dei cambiamenti spaziali. Ciò produce un modello con una variazione smooth dei valori di resistività, valida quindi nel caso in cui la resistività del sottosuolo varia gradualmente.

E' possibile modificare questo metodo ad esempio modificando gli elementi della matrice F in modo da enfatizzare variazioni verticali od orizzontali del modello risultante, oppure laddove i dati presentano molto noise, è possibile dare un peso ai dati utilizzando la matrice di weighting.

Nel caso in cui la geologia consista in un certo numero di regioni internamente omogenee con limiti poco netti, come ad esempio intrusioni ignee in rocce sedimentarie, dà migliori risultati una formulazione di tipo 'robust'.

---

E' inoltre possibile includere informazioni su orientazioni preferenziali di corpi geologici come dicchi e faglie (verticali) o livelli sedimentari e sill (orizzontali), settando il peso da dare ai filtri di flatness verticali e orizzontali.

Per controllare la qualità dei dati è innanzitutto possibile notare se le variazioni di resistività apparente nella pseudosezione sono brusche o gradualmente ed rimuovere manualmente dal data set i valori isolati troppo alti o troppo bassi.

Oppure in caso di dati di bassa qualità è possibile aumentare il 'damping factor', producendo un modello con minore risoluzione ma meno sensibile al noise. Un'altra operazione è quella di usare l'opzione 'robust data constrain'.

La sub di inversione generalmente tenta di ridurre il quadrato della differenza resistività apparente calcolata e misurata, ed i dati con maggiore differenza hanno un peso maggiore.

Ciò dà buoni risultati in caso di noise random, anche se inusuali punti con resistività apparente alta o bassa possono distorcere i risultati.

Per ridurre l'effetto di questi data point cattivi, l'opzione 'robust data constrain' obbliga il programma a ridurre la differenza assoluta tra resistività apparente calcolata e misurata.

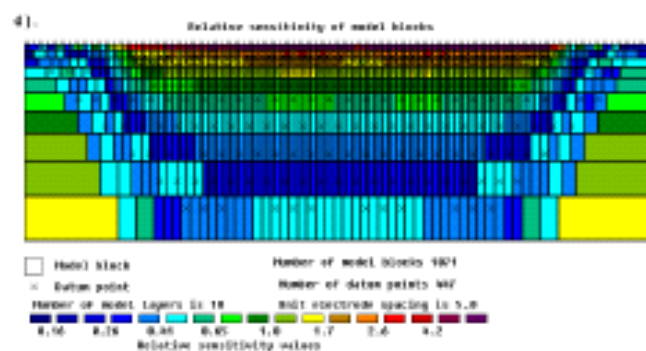
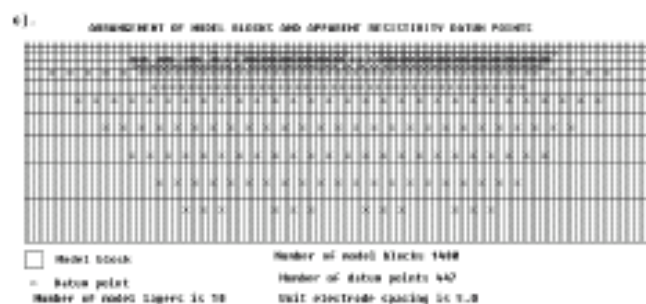
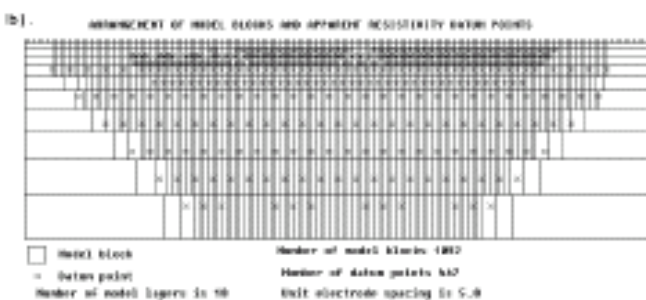
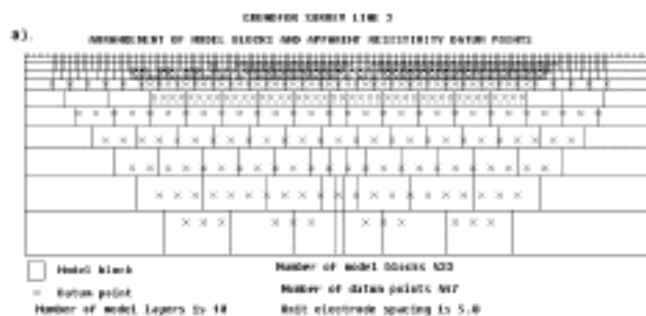
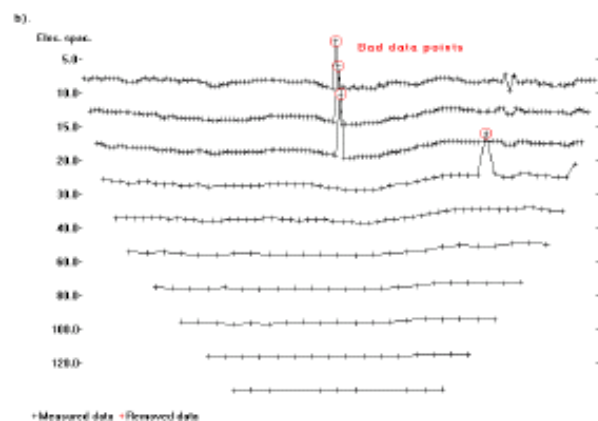
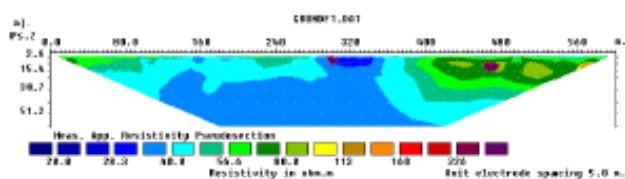
Ai data point cattivi è dato lo stesso peso degli altri, quindi il loro effetto nel processo di inversione si considera ridotto.

Un altro fattore che è possibile controllare è la grandezza e distribuzione dei blocchi rettangolari.

Di default il programma genera blocchi considerando la profondità del livello più profondo come la profondità massima di investigazione, ed il numero di blocchi non deve eccedere il numero di data points.

Ciò produce generalmente un modello in cui lo spessore dei livelli aumenta con la profondità, e con blocchi più spessi ai bordi e sul fondo.

Ma è possibile generare un modello a partire da blocchi di grandezza uniforme.



---

## **8 – BIBLIOGRAFIA**

C. Park, R. Miller, J. Xia. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808, 1999.

C. Park, R. Miller, J. Xia and J. Ivanov. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) – active and passive methods, *The Leading Edge* (January 2007).

M. Cercato. Addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion, *Geophysical Prospecting*, 00, 1-21, 2008.

S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva. Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva, 2008.

D. Albarello, S. Castellaro. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola *Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n. 2 – 2011*.

M. Bour\*, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation (1998).

SESAME European research project. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation (2004).

## **ALLEGATI**

- **ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI DOWN – HOLE**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI GEOELETTRICHE**
- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI E REPORT PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE SUI CAMPIONI**
- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI (SCALA 1:2000)**

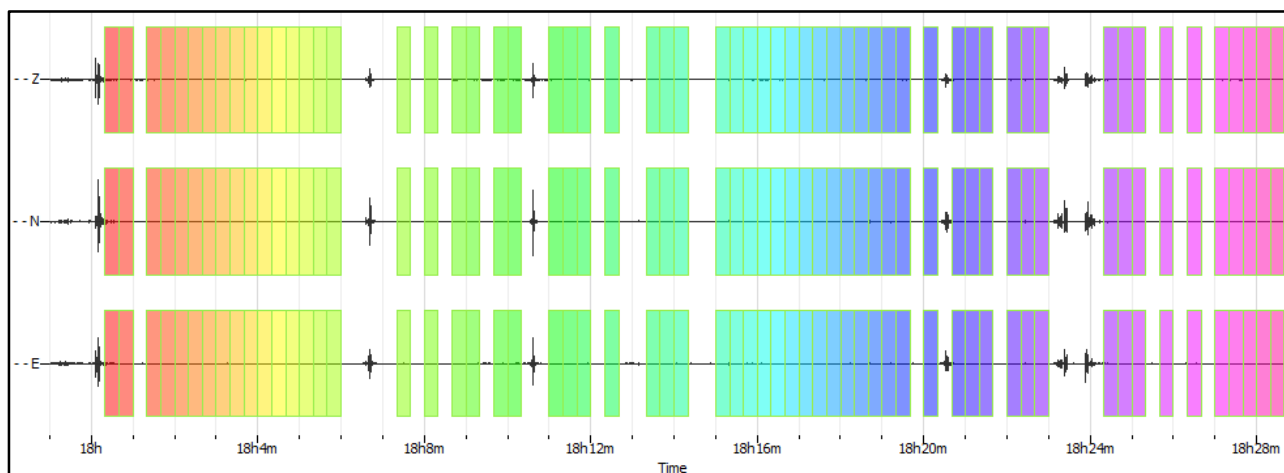
- **ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII**



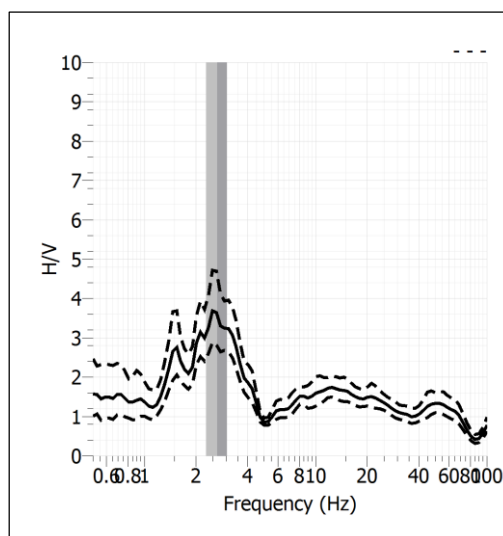
<b>Stazione</b>	1	
<b>Strumento</b>	Theremino	
<b>Data acquisizione</b>	Gennaio 2020	
<b>Coordinate Lat.</b>	133853	
<b>Coordinate Long.</b>	4891768	
<b>Durata registrazione</b>	30 minuti	
<b>Freq. Campionamento</b>	500 Hz	
<b>Lunghezza finestre</b>	20 s	
<b>Numero di finestre analizzate</b>	60 (67% del tracciato)	
<b>Tipo di lisciamento</b>	Konno & Ohmachi	
<b>Lisciamento</b>	40	
<b>Orientamento strumentazione</b>	0° N	
<b>Terreno di misura</b>	Suolo naturale	
<b>Meteo</b>	Sereno	

<b>Frequenza del picco H/V</b>	<b>2.66 Hz</b>
<b>Ampiezza Media della frequenza</b>	<b>3.55</b>

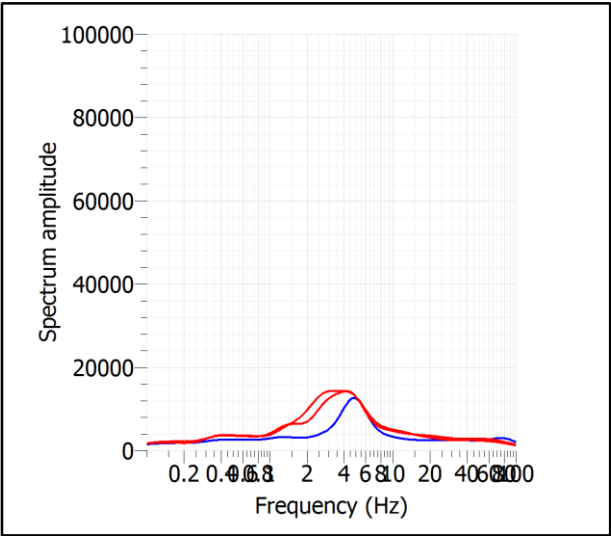
### ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



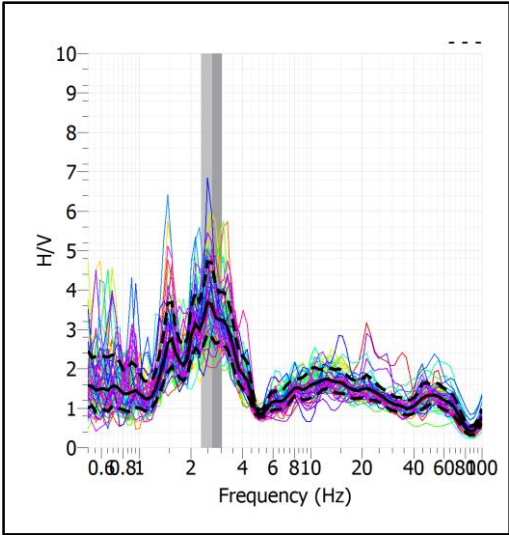
### RAPPORTO SPETTRALE H/V



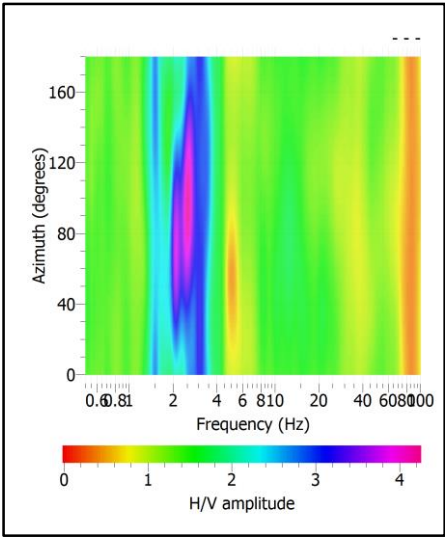
**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**



**SERIE TEMPORALE H/V**



**DIREZIONALITA' H/V**



### CRITERI SESAME

Window length $l_w$ [s]	Number of windows $n_w$	Number of significant cycles $n_c$	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			$f_0$ [Hz]	$\sigma_f$ [Hz]	$A_0$	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	60	3196	2.664	0.37	3.55	1.26	MODERATO
<b>Criteri per una curva H/V affidabile</b>							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
<b><math>f_0 &gt; 10/L_w</math></b>			2.664	>	0.500	<b>OK</b>	
<b><math>n_c(f_0) &gt; 200</math></b>			3196	>	200	<b>OK</b>	
<b><math>\sigma_A(f) &lt; 2</math> per <math>0.5f_0 &lt; f &lt; 2f_0</math> se <math>f_0 &gt; 0.5\text{Hz}</math></b>			Superato 0 volte su 27				
<b><math>\sigma_A(f) &lt; 3</math> per <math>0.5f_0 &lt; f &lt; 2f_0</math> se <math>f_0 &lt; 0.5\text{Hz}</math></b>							
<b>Criteri per un picco H/V chiaro</b>							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	<b>Esiste <math>f^*</math> in <math>[f_0/4, f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^*) &lt; A_0/2</math></b>						<b>OK</b>
	<b>Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0/2</math></b>						<b>OK</b>
	<b><math>A_0 &gt; 2</math></b>						3.5521 > 2 <b>OK</b>
Stability conditions	<b><math>f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%</math></b>						<b>NO</b>
	<b><math>\sigma_f &lt; \varepsilon(f_0)</math></b>						0.3722 > 0.1332 <b>OK</b>
	<b><math>\sigma_A(f_0) &lt; \theta(f_0)</math></b>						1.2587 < 1.5800 <b>OK</b>

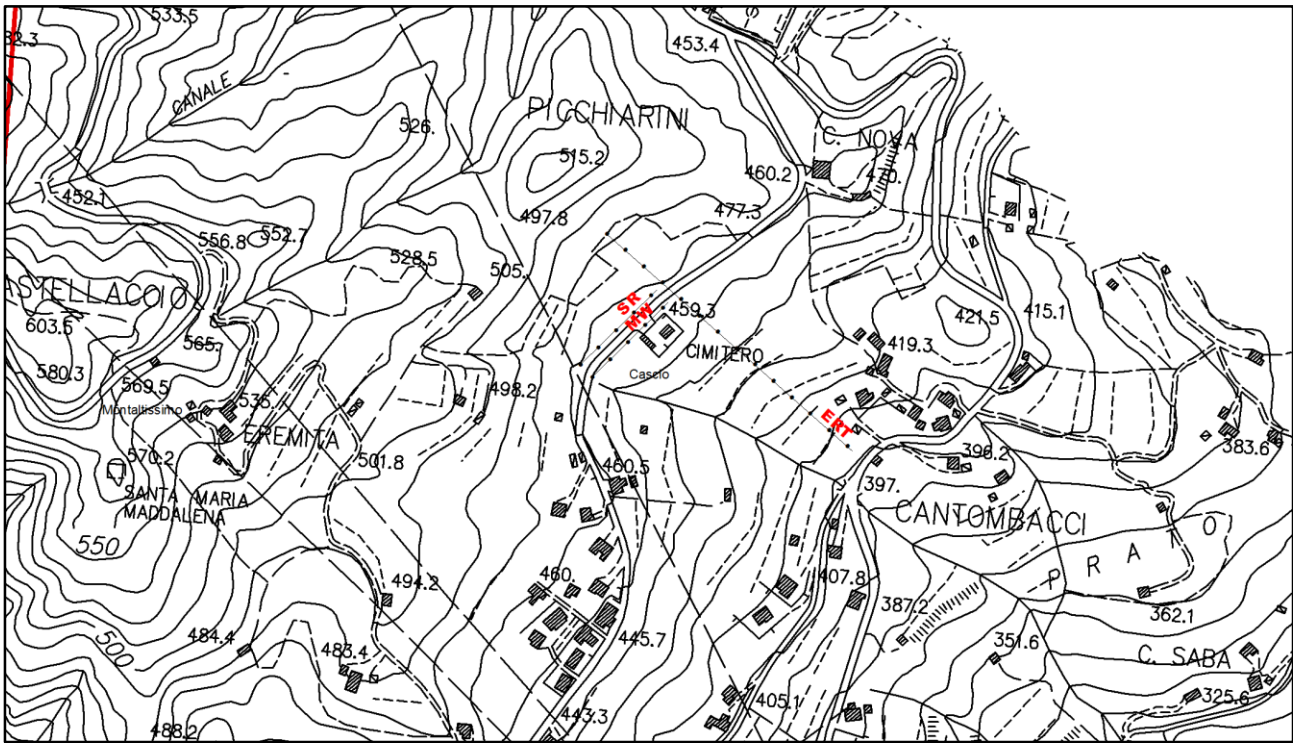
ULTERIORI CRITERI (D.Albarelli, S.Castellaro, 2011)		
<b>DURATA</b>	Durata minima registrazione 20 minuti	<b>SI</b>
<b>STAZIONARIETA'</b>	% ( $\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	<b>SI</b>
<b>ISOTROPIA</b>	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	<b>SI</b>
<b>ASSENZA DISTURBI</b>	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	<b>SI</b>
<b>PLAUSIBILITA' FISICA</b>	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	<b>SI</b>
<b>ROBUSTEZZA STATISTICA</b>	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	<b>SI</b>

**CLASSE A1**

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**

**SR\_1: SISMICA A RIFRAZIONE P-SH/MASW 1/ESAC 1**

Planimetria Scala 1:5000



Planimetria Scala 1:1000



---

### Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24  
Intervallo (m): 5 m  
Lunghezza Stendimento (m): 115 m  
Quota (m.s.l.m.): 460

### Punti di energizzazione

	<b>E1</b> <b>Esterno</b> <b>SX</b>	<b>A</b> <b>Estremo</b> <b>SX</b>	<b>D1</b> <b>Intermedio</b> <b>SX</b>	<b>C</b> <b>Centrale</b>	<b>D2</b> <b>Intermedio</b> <b>DX</b>	<b>B</b> <b>Estremo</b> <b>DX</b>	<b>E2</b> <b>Esterno</b> <b>DX</b>
<b>Posizione da Geofono G1 (m)</b>	-5	-2.5	27.5	57.5	87.5	117.5	120

### Coordinate Geofoni (WGS84 UTM33N)

<b>Geofoni</b>	<b>Longitudine</b>	<b>Latitudine</b>
<b>G1</b>	133818	4891713
<b>G24</b>	133897	4891793

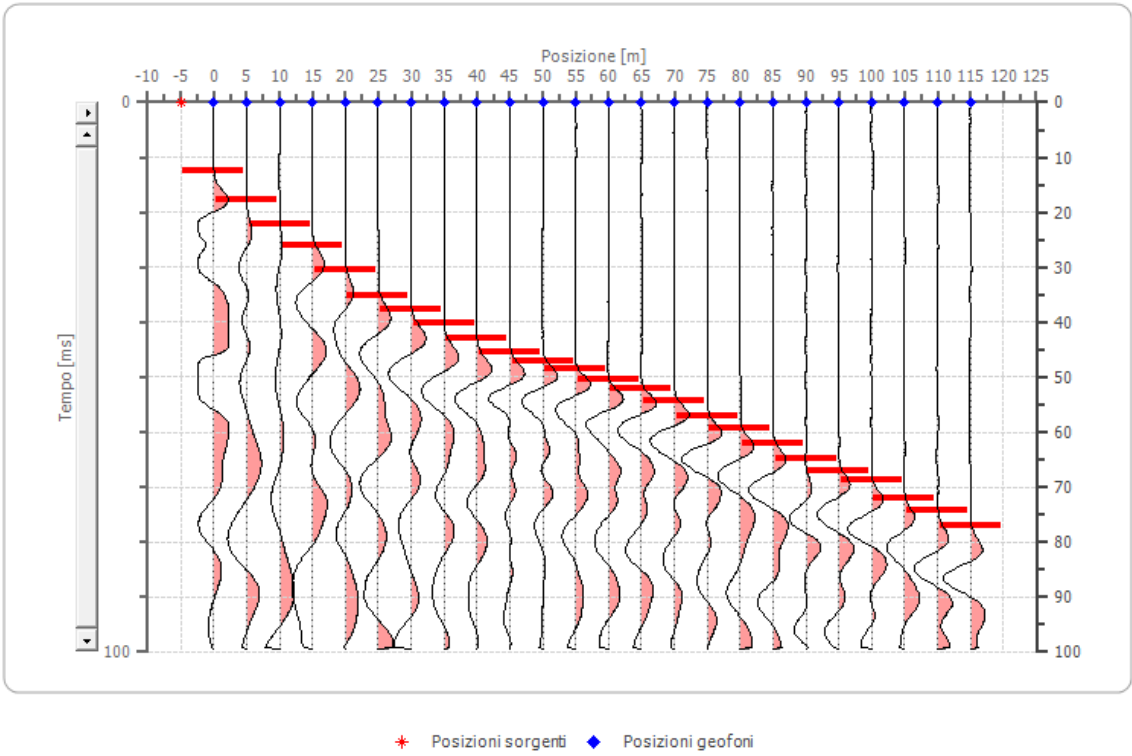
### Geometria geofoni

	<b>Posizione X</b> <b>[m]</b>	<b>Posizione Z</b> <b>[m]</b>
1	0.0	0.0
2	5.0	0.0
3	10.0	0.0
4	15.0	0.0
5	20.0	0.0
6	25.0	0.0
7	30.0	0.0
8	35.0	0.0
9	40.0	0.0
10	45.0	0.0
11	50.0	0.0
12	55.0	0.0
13	60.0	0.0
14	65.0	0.0
15	70.0	0.0
16	75.0	0.0
17	80.0	0.0
18	85.0	0.0
19	90.0	0.0
20	95.0	0.0
21	100.0	0.0
22	105.0	0.0
23	110.0	0.0
24	115.0	0.0

**Dati battute**

**Battuta 1**

Posizione sorgente X        -5 [m]  
Posizione sorgente Z        0 [m]





---

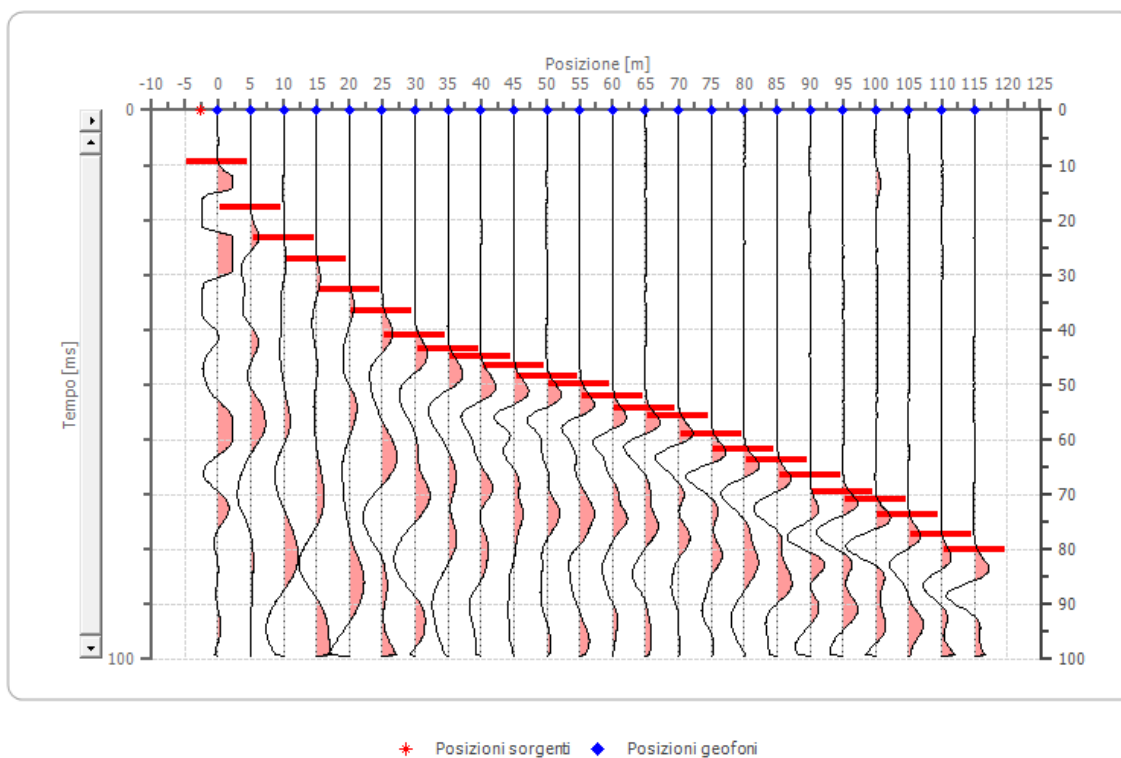
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	12.4695
5.0	17.7285
10.0	22.1680
15.0	26.0388
20.0	30.4709
25.0	35.1801
30.0	37.6290
35.0	40.2930
40.0	42.9570
45.0	45.4294
50.0	47.0914
55.0	48.4925
60.0	50.4155
65.0	52.0776
70.0	54.2936
75.0	57.0637
80.0	59.2798
85.0	62.0499
90.0	64.8199
95.0	67.0360
100.0	68.5980
105.0	71.9280
110.0	74.2590
115.0	76.9230

---

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



---

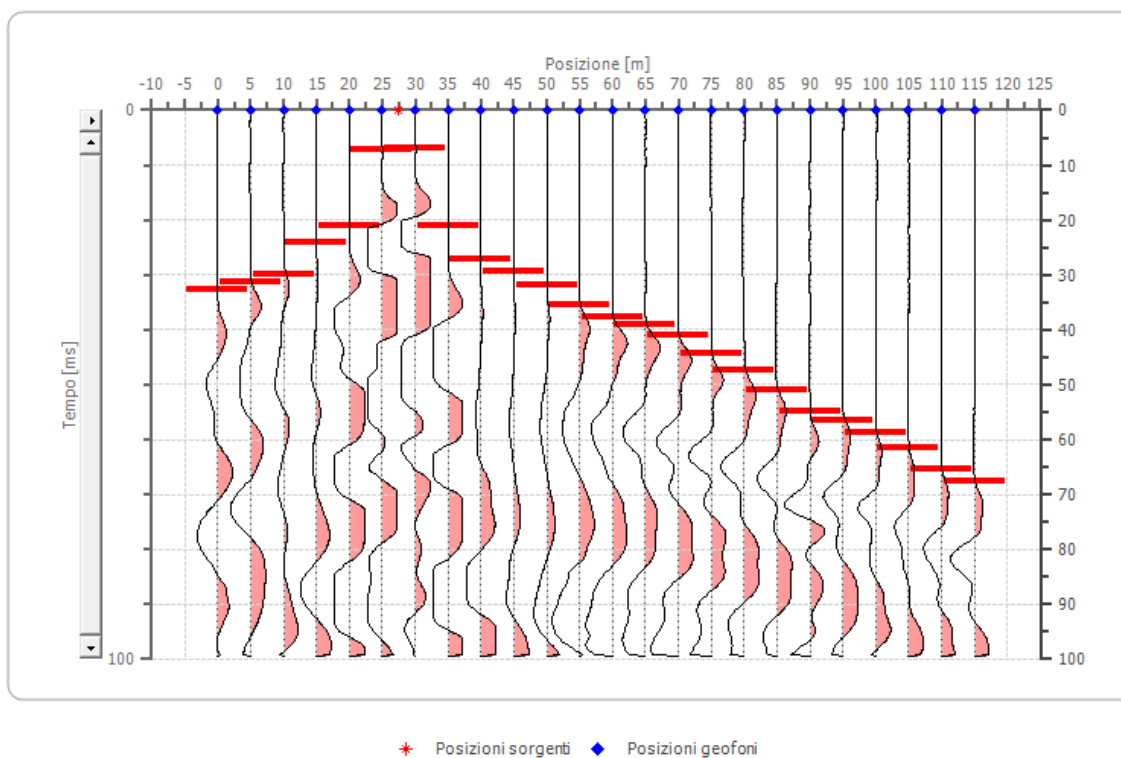
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	9.4183
5.0	17.7285
10.0	23.2687
15.0	27.1468
20.0	32.6870
25.0	36.5651
30.0	40.9972
35.0	43.4903
40.0	44.9550
45.0	46.5374
50.0	48.4765
55.0	49.8615
60.0	52.0776
65.0	54.2936
70.0	55.6787
75.0	59.0028
80.0	61.7729
85.0	63.7119
90.0	66.4820
95.0	69.5291
100.0	70.9290
105.0	73.6842
110.0	77.2560
115.0	80.0554

---

### Battuta 3

Posizione sorgente X 27.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



---

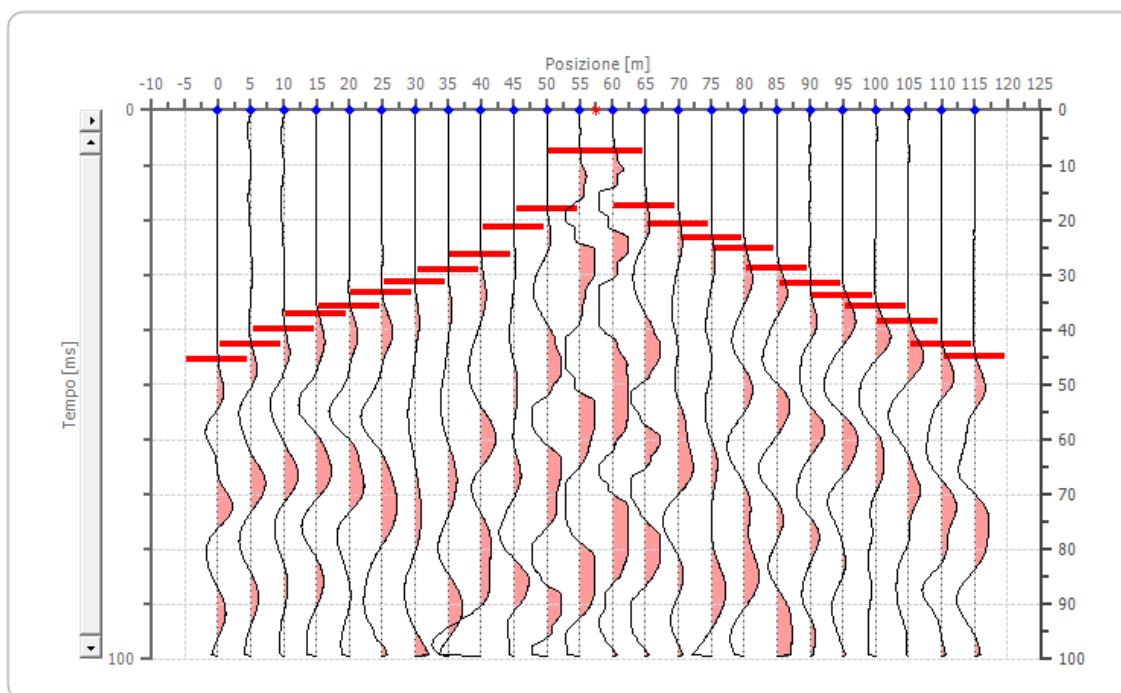
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	32.6870
5.0	31.3020
10.0	29.9169
15.0	23.9760
20.0	20.9790
25.0	7.2022
30.0	6.9252
35.0	20.9790
40.0	27.1468
45.0	29.3629
50.0	31.9680
55.0	35.4571
60.0	37.6290
65.0	38.9610
70.0	40.9590
75.0	44.2890
80.0	47.2860
85.0	50.9490
90.0	54.8476
95.0	56.5097
100.0	58.6080
105.0	61.4958
110.0	65.2680
115.0	67.5990

---

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 57.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



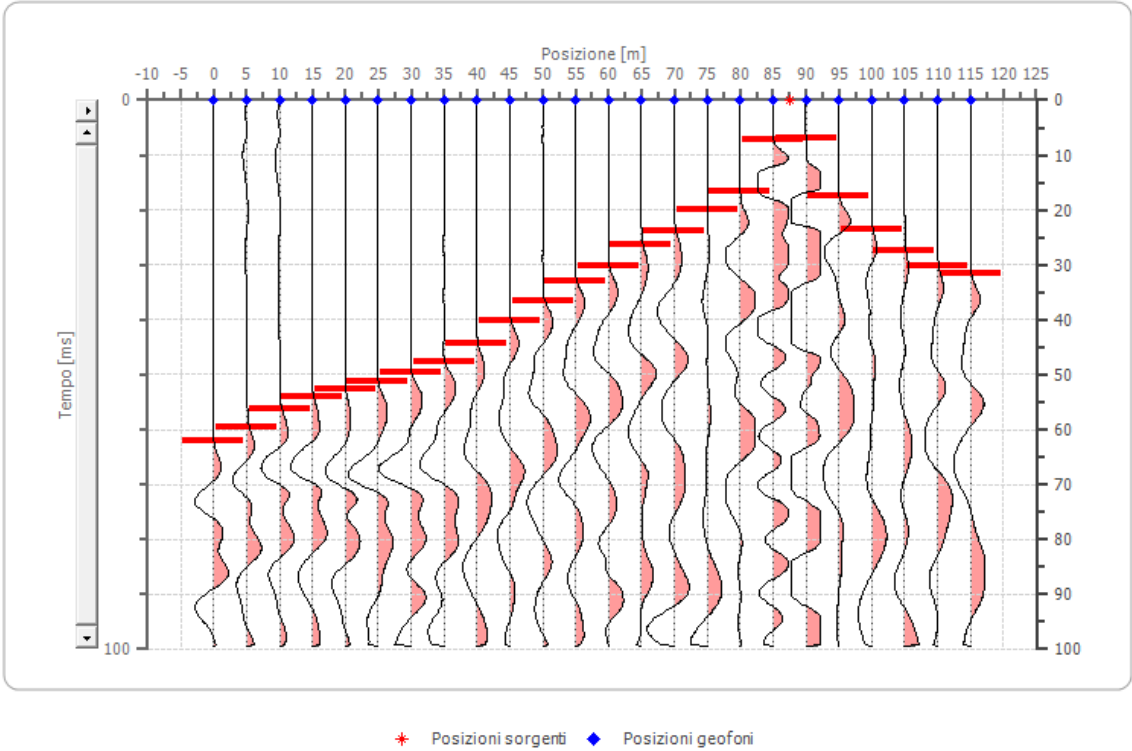
---

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	45.4294
5.0	42.6593
10.0	39.8892
15.0	37.1191
20.0	35.7341
25.0	33.2410
30.0	31.3019
35.0	29.0859
40.0	26.3070
45.0	21.3120
50.0	18.0055
55.0	7.4792
60.0	7.4792
65.0	17.4515
70.0	20.7756
75.0	23.2687
80.0	25.2078
85.0	28.8089
90.0	31.5789
95.0	33.7950
100.0	35.7341
105.0	38.6280
110.0	42.6593
115.0	44.9550

---

**Battuta 5**

Posizione sorgente X        87.5 [m]  
Posizione sorgente Z        0 [m]





---

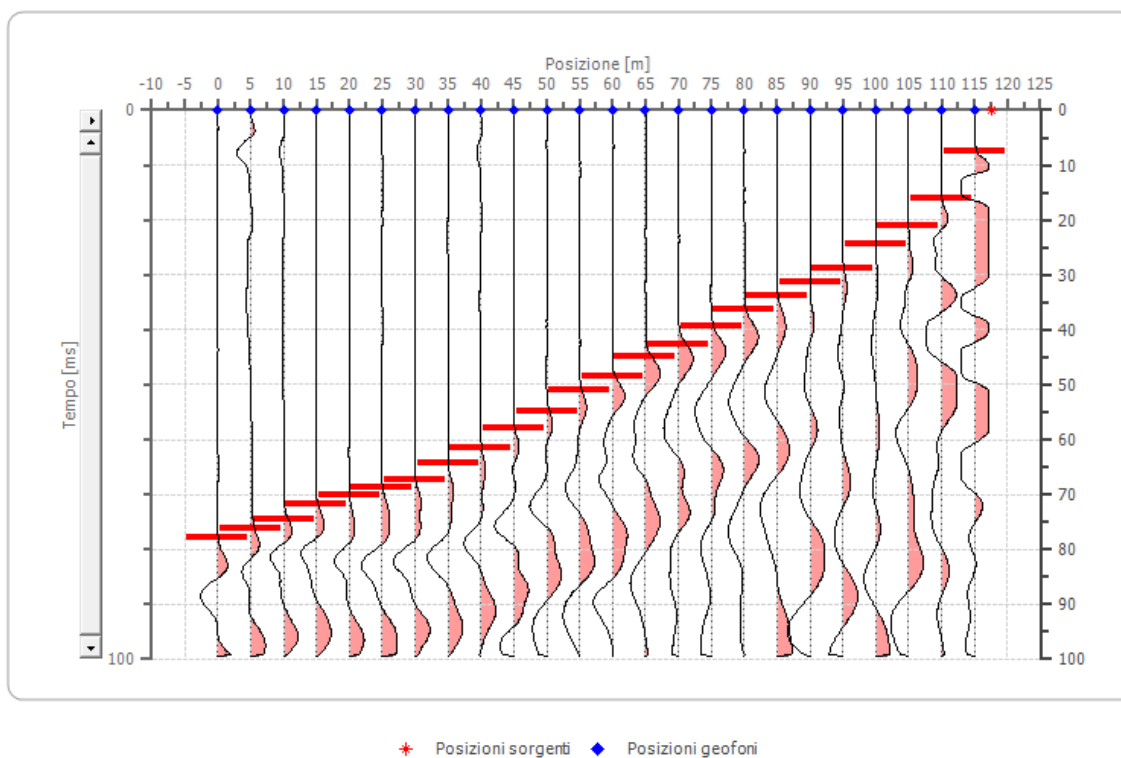
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	61.9380
5.0	59.5568
10.0	56.2327
15.0	54.0166
20.0	52.6316
25.0	51.2820
30.0	49.6170
35.0	47.6190
40.0	44.2890
45.0	40.1662
50.0	36.5651
55.0	32.9640
60.0	30.1939
65.0	26.3158
70.0	23.8227
75.0	19.9800
80.0	16.6205
85.0	7.2022
90.0	6.9252
95.0	17.4515
100.0	23.5457
105.0	27.4238
110.0	30.1939
115.0	31.5789

---

## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



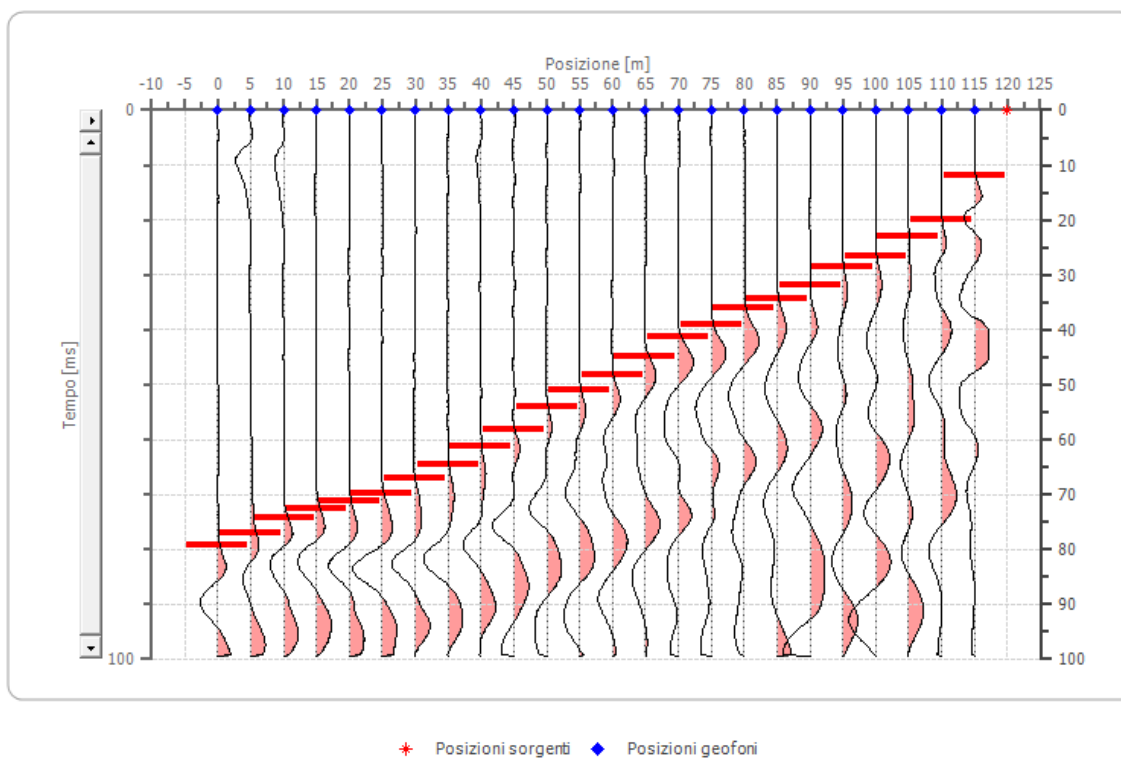
---

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	77.9220
5.0	76.1773
10.0	74.5152
15.0	71.7452
20.0	70.0831
25.0	68.5980
30.0	67.2660
35.0	64.2690
40.0	61.6050
45.0	57.8947
50.0	54.8476
55.0	50.9695
60.0	48.4765
65.0	44.8753
70.0	42.6593
75.0	39.3352
80.0	36.2881
85.0	33.7950
90.0	31.3019
95.0	28.8089
100.0	24.3090
105.0	20.9790
110.0	16.0665
115.0	7.4792

---

## Battuta 7

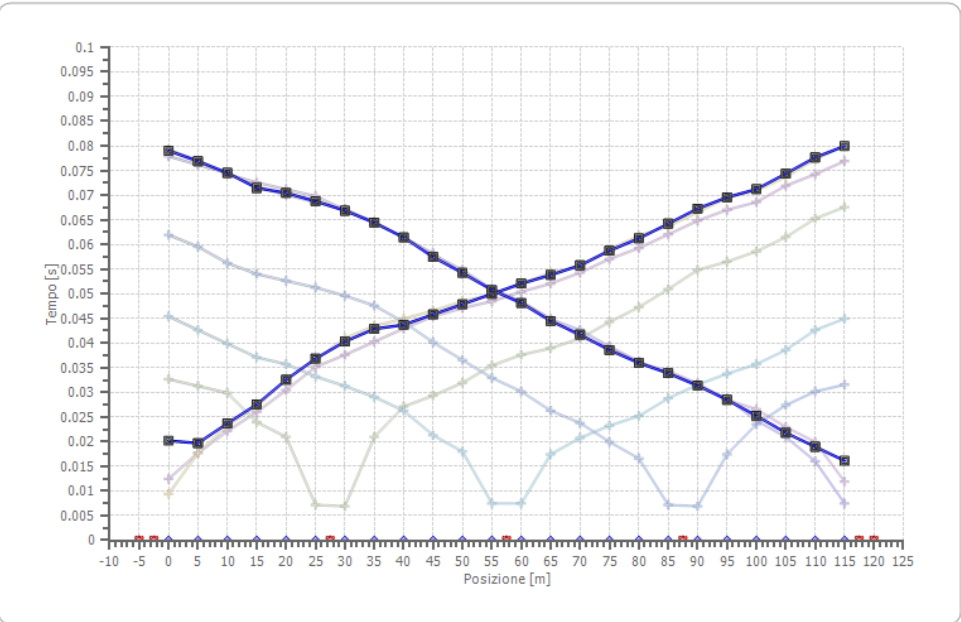
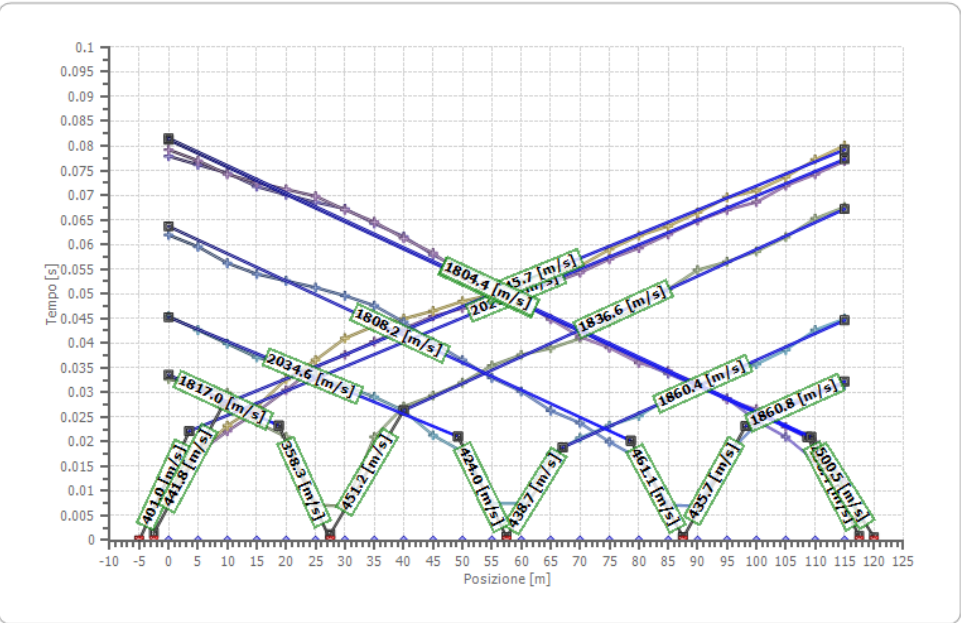
Posizione sorgente X      120 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]



---

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	79.2244
5.0	77.0083
10.0	74.2382
15.0	72.5762
20.0	71.1911
25.0	69.8061
30.0	67.0360
35.0	64.6020
40.0	61.2720
45.0	58.2750
50.0	53.9460
55.0	50.9490
60.0	48.2850
65.0	44.8753
70.0	41.2742
75.0	39.0582
80.0	36.0111
85.0	34.3490
90.0	31.8560
95.0	28.5319
100.0	26.5928
105.0	22.9917
110.0	19.9800
115.0	11.9114

---



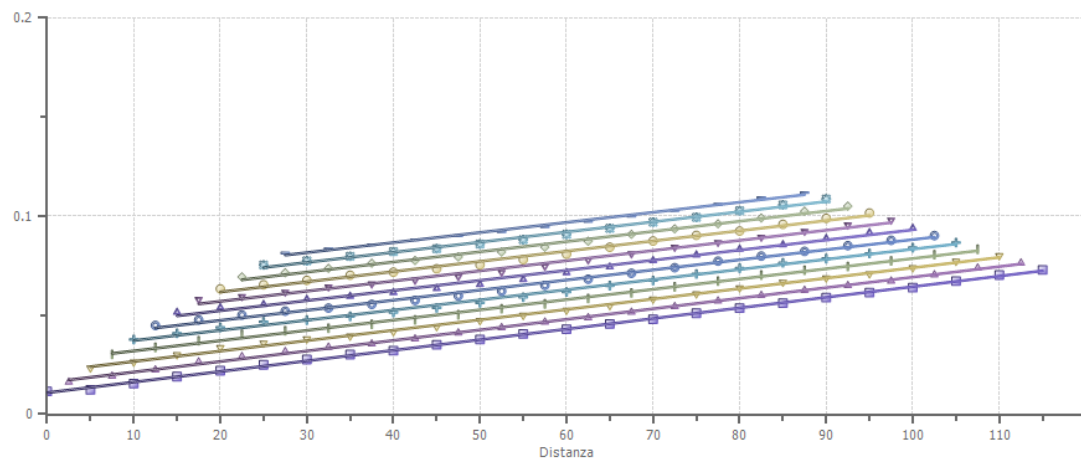
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

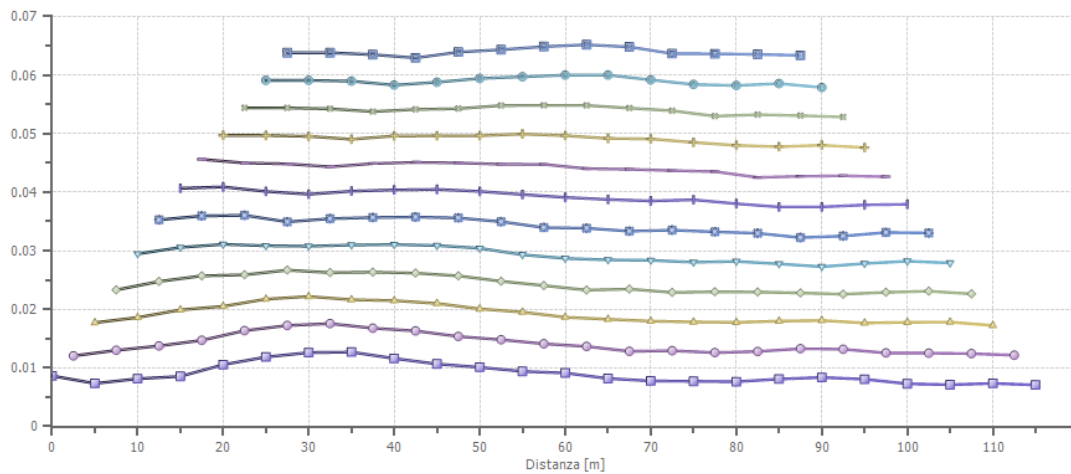
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	3.9	--
G= 5.0 [m]	3.3	--
G= 10.0 [m]	3.7	--
G= 15.0 [m]	3.9	--
G= 20.0 [m]	4.8	--
G= 25.0 [m]	5.4	--
G= 30.0 [m]	5.7	--
G= 35.0 [m]	5.7	--
G= 40.0 [m]	5.2	--
G= 45.0 [m]	4.8	--
G= 50.0 [m]	4.6	--
G= 55.0 [m]	4.3	--
G= 60.0 [m]	4.1	--
G= 65.0 [m]	3.7	--
G= 70.0 [m]	3.5	--
G= 75.0 [m]	3.5	--
G= 80.0 [m]	3.5	--
G= 85.0 [m]	3.7	--
G= 90.0 [m]	3.8	--
G= 95.0 [m]	3.6	--
G= 100.0 [m]	3.3	--
G= 105.0 [m]	3.2	--
G= 110.0 [m]	3.3	--
G= 115.0 [m]	3.2	--
Velocità [m/sec]	439.3	1869.8
Descrizione		

---



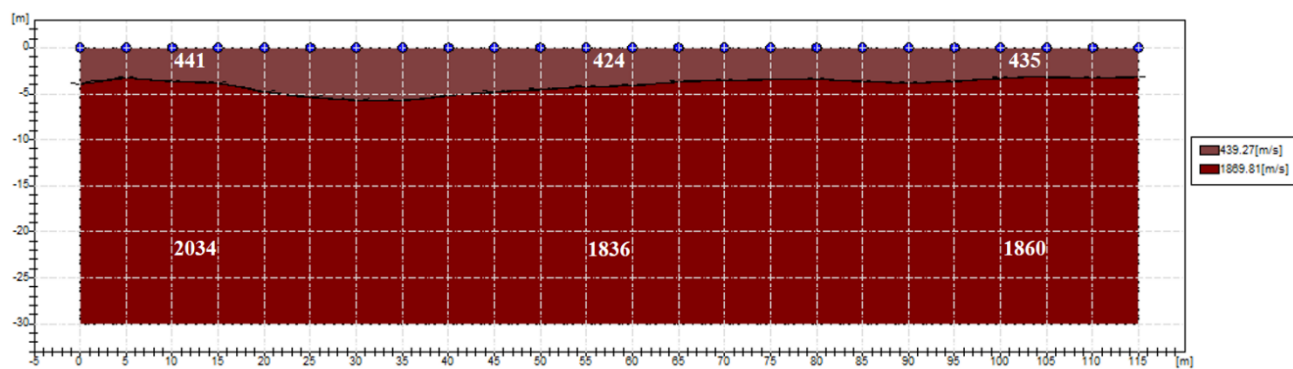
- XY = 0, Deviazione standard = 0.01851
- XY = 5, Deviazione standard = 0.01766
- XY = 10, Deviazione standard = 0.01666
- XY = 15, Deviazione standard = 0.01569
- XY = 20, Deviazione standard = 0.01477
- XY = 25, Deviazione standard = 0.01396
- XY = 30, Deviazione standard = 0.01323
- XY = 35, Deviazione standard = 0.01256
- XY = 40, Deviazione standard = 0.01187
- XY = 45, Deviazione standard = 0.0111
- XY = 50, Deviazione standard = 0.01032
- XY = 55, Deviazione standard = 0.00951



- XY = 0, Rugosità = 0.001469
- XY = 5, Rugosità = 0.001466
- XY = 10, Rugosità = 0.001422
- XY = 15, Rugosità = 0.001342
- XY = 20, Rugosità = 0.001237
- XY = 25, Rugosità = 0.001168
- XY = 30, Rugosità = 0.001016
- XY = 35, Rugosità = 0.000845
- XY = 40, Rugosità = 0.000662
- XY = 45, Rugosità = 0.000563
- XY = 50, Rugosità = 0.00053
- XY = 55, Rugosità = 0.000521



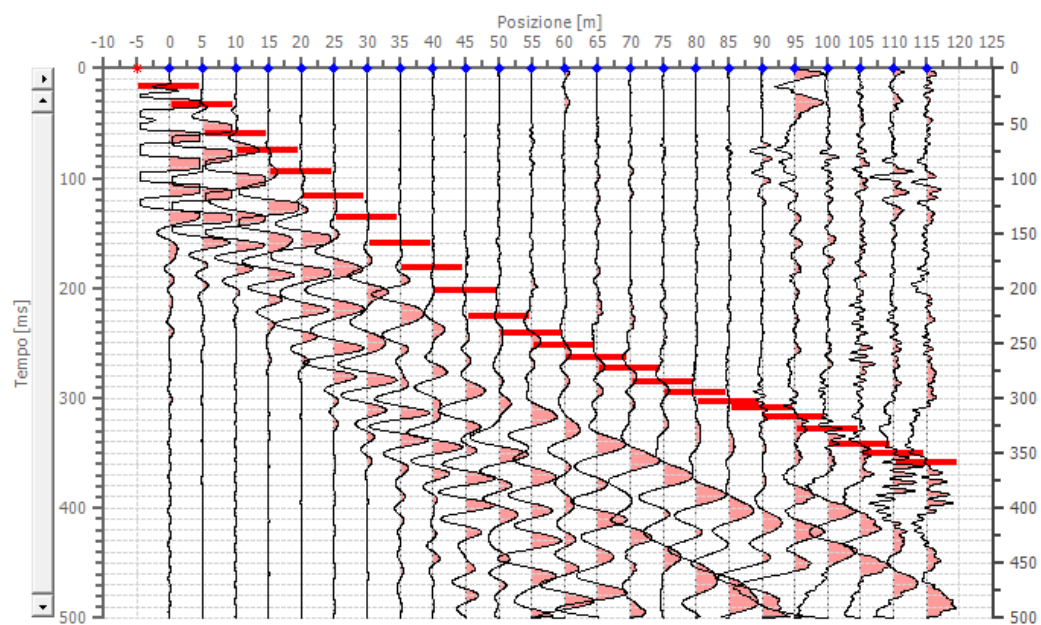
## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P



## Dati battute

### Battuta 1

Posizione sorgente X      -5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]



\* Posizioni sorgenti   ♦ Posizioni geofoni

---

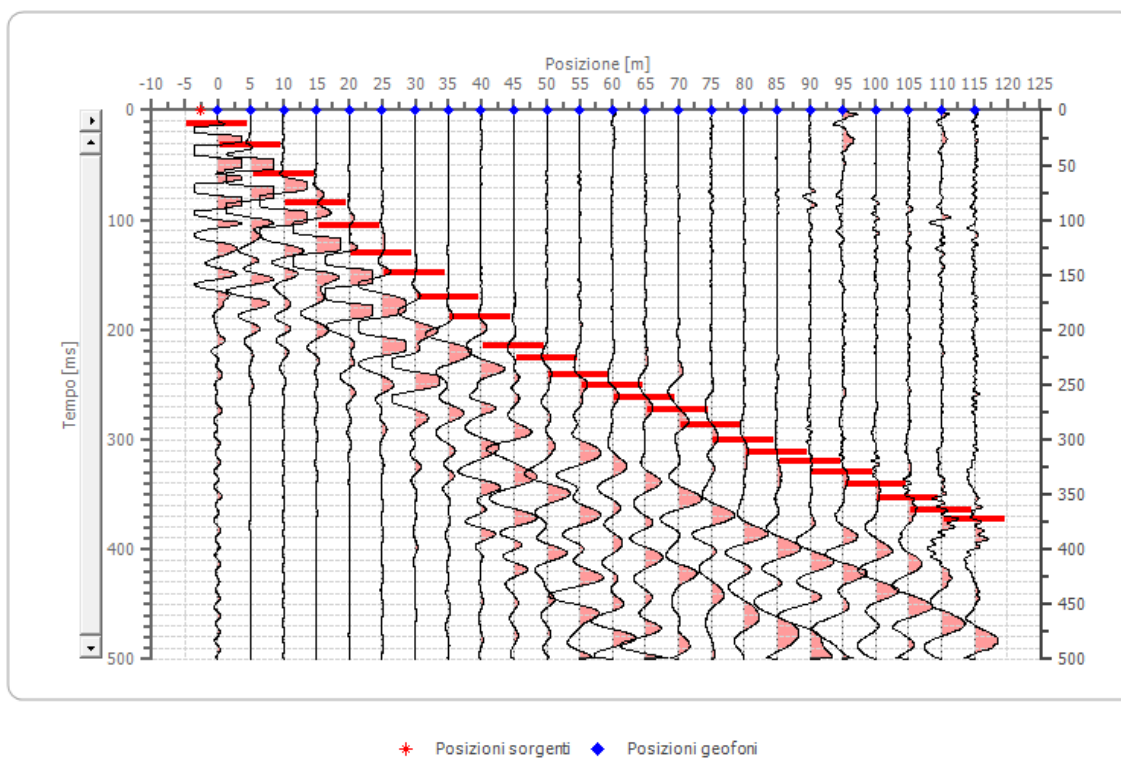
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	16.6260
5.0	33.2520
10.0	59.5766
15.0	74.8171
20.0	94.2141
25.0	116.3821
30.0	135.7791
35.0	159.3327
40.0	181.5007
45.0	202.2832
50.0	225.8367
55.0	241.0772
60.0	252.1613
65.0	263.2453
70.0	272.9438
75.0	285.4133
80.0	295.1118
85.0	303.4248
90.0	308.9668
95.0	317.2798
100.0	328.3638
105.0	342.2188
110.0	350.5318
115.0	358.8449

---

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



---

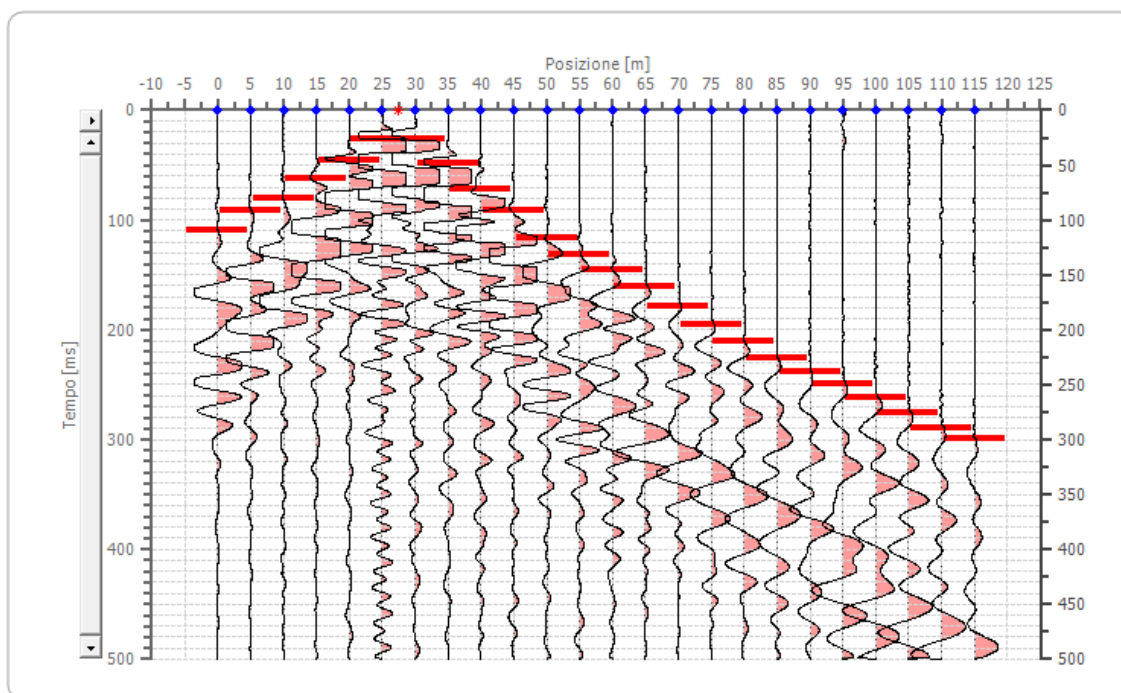
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	12.4695
5.0	31.8665
10.0	58.1911
15.0	84.5156
20.0	105.2981
25.0	130.2371
30.0	148.2486
35.0	170.4167
40.0	188.4282
45.0	214.7527
50.0	225.8367
55.0	241.0772
60.0	250.7758
65.0	261.8598
70.0	272.9438
75.0	286.7988
80.0	300.6538
85.0	311.7378
90.0	320.0508
95.0	329.7493
100.0	340.8333
105.0	353.3029
110.0	364.3869
115.0	372.6999

---

### Battuta 3

Posizione sorgente X 27.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



\* Posizioni sorgenti ♦ Posizioni geofoni

---

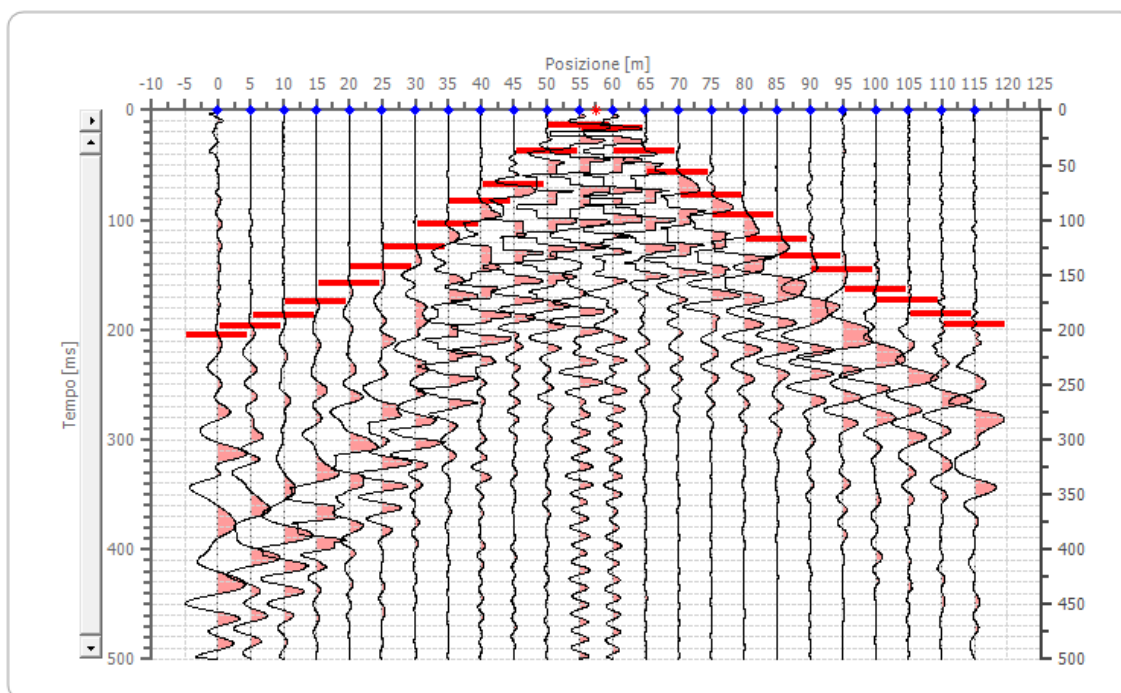
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	109.4546
5.0	91.4431
10.0	80.3591
15.0	62.3476
20.0	45.7215
25.0	26.3245
30.0	26.3245
35.0	48.4925
40.0	72.0461
45.0	91.4431
50.0	116.3821
55.0	131.6226
60.0	145.4776
65.0	160.7182
70.0	178.7297
75.0	195.3557
80.0	210.5962
85.0	225.8367
90.0	238.3062
95.0	249.3902
100.0	261.8598
105.0	275.7148
110.0	289.5698
115.0	299.2683

---

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 57.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



★ Posizioni sorgenti ◆ Posizioni geofoni



---

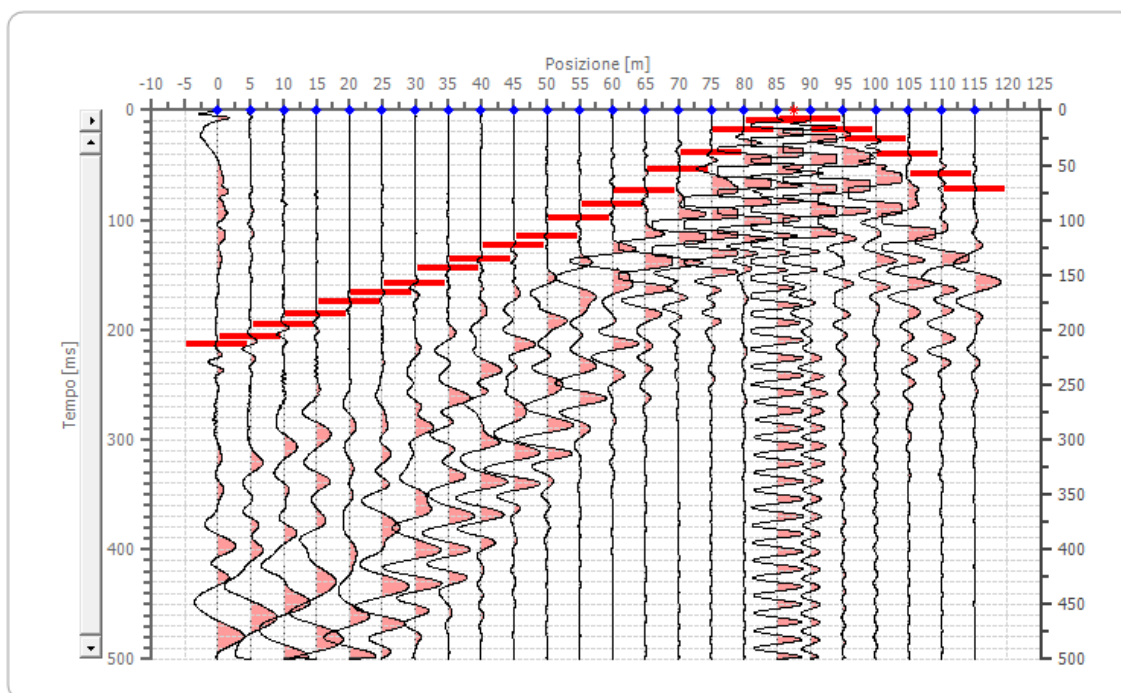
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	205.0542
5.0	196.7412
10.0	187.0427
15.0	174.5732
20.0	157.9472
25.0	142.7066
30.0	124.6951
35.0	103.9126
40.0	83.1301
45.0	67.8896
50.0	37.4085
55.0	13.8550
60.0	16.6260
65.0	37.4085
70.0	56.8056
75.0	77.5881
80.0	95.5996
85.0	117.7676
90.0	133.0081
95.0	145.4776
100.0	163.4892
105.0	173.1877
110.0	185.6572
115.0	195.3557

---

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



★ Posizioni sorgenti ◆ Posizioni geofoni

---

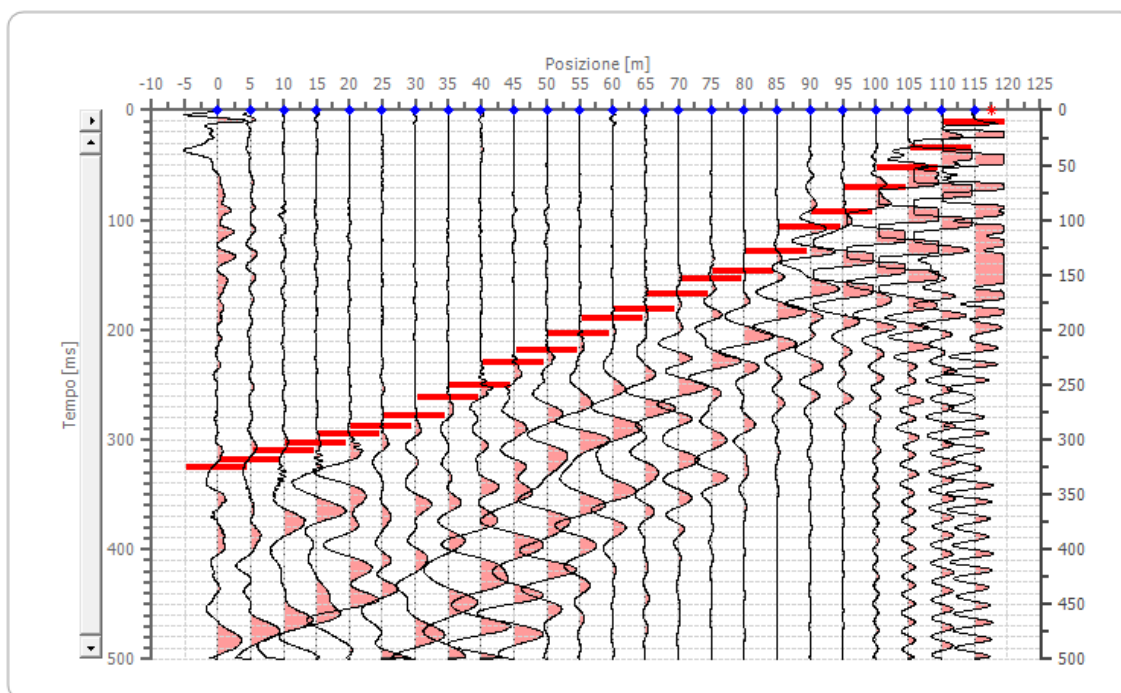
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	281.2568
5.0	270.1728
10.0	257.7033
15.0	249.3902
20.0	236.9207
25.0	225.8367
30.0	210.5962
35.0	192.5847
40.0	174.5732
45.0	157.9472
50.0	142.7066
55.0	126.0806
60.0	114.9966
65.0	101.1416
70.0	77.5881
75.0	59.5766
80.0	31.8665
85.0	9.6985
90.0	8.3130
95.0	18.0115
100.0	26.3245
105.0	40.1795
110.0	58.1911
115.0	72.0461

---

## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



★ Posizioni sorgenti ◆ Posizioni geofoni

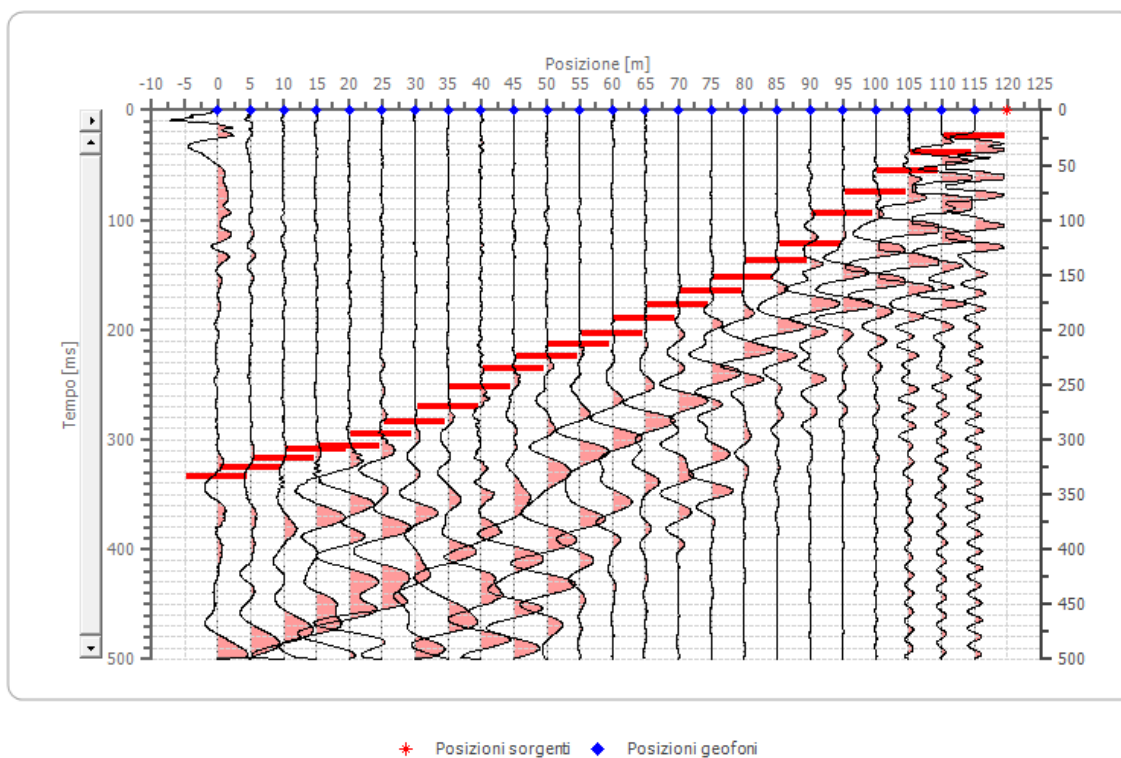
---

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	325.5928
5.0	318.6653
10.0	310.3523
15.0	303.4248
20.0	295.1118
25.0	288.1843
30.0	278.4858
35.0	261.8598
40.0	250.7758
45.0	229.9932
50.0	218.9092
55.0	203.6687
60.0	189.8137
65.0	181.5007
70.0	167.6457
75.0	153.7907
80.0	146.8631
85.0	128.8516
90.0	106.6836
95.0	92.8286
100.0	70.6606
105.0	52.6491
110.0	34.6375
115.0	11.0840

---

## Battuta 7

Posizione sorgente X      120 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]

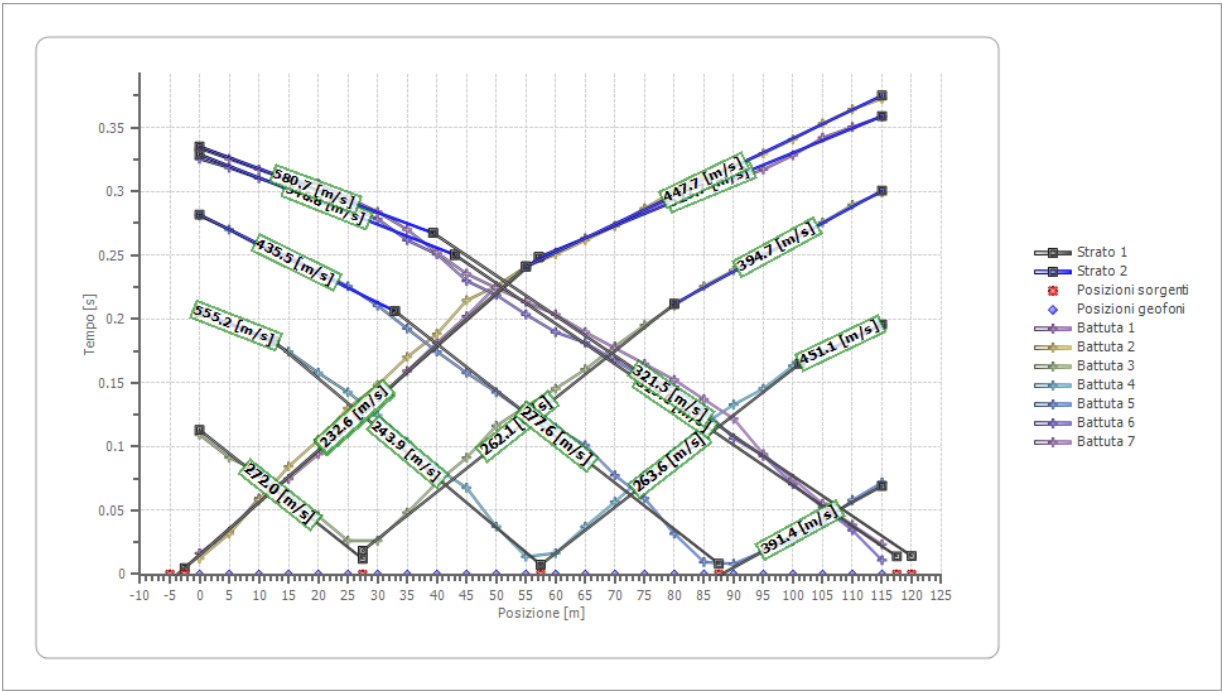


---

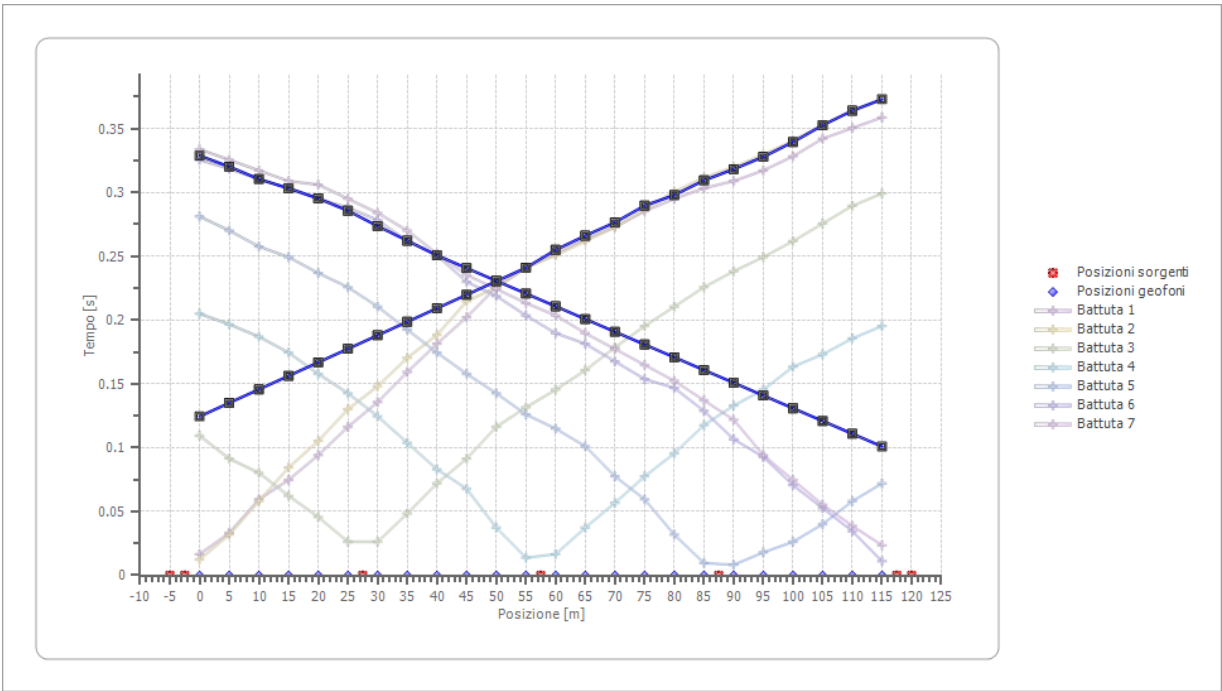
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	333.9058
5.0	325.5928
10.0	317.2798
15.0	308.9668
20.0	306.1958
25.0	295.1118
30.0	284.0278
35.0	270.1728
40.0	252.1613
45.0	235.5352
50.0	224.4512
55.0	213.3672
60.0	203.6687
65.0	189.8137
70.0	177.3442
75.0	164.8747
80.0	152.4052
85.0	137.1646
90.0	121.9241
95.0	94.2141
100.0	74.8171
105.0	55.4201
110.0	38.7940
115.0	23.5535

---

# Dromocrone



# Dromocrone traslate





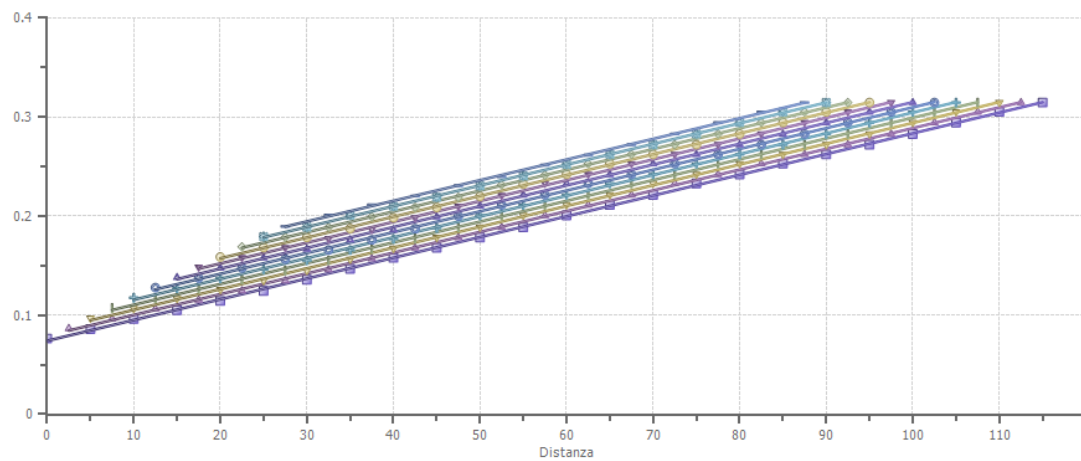
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

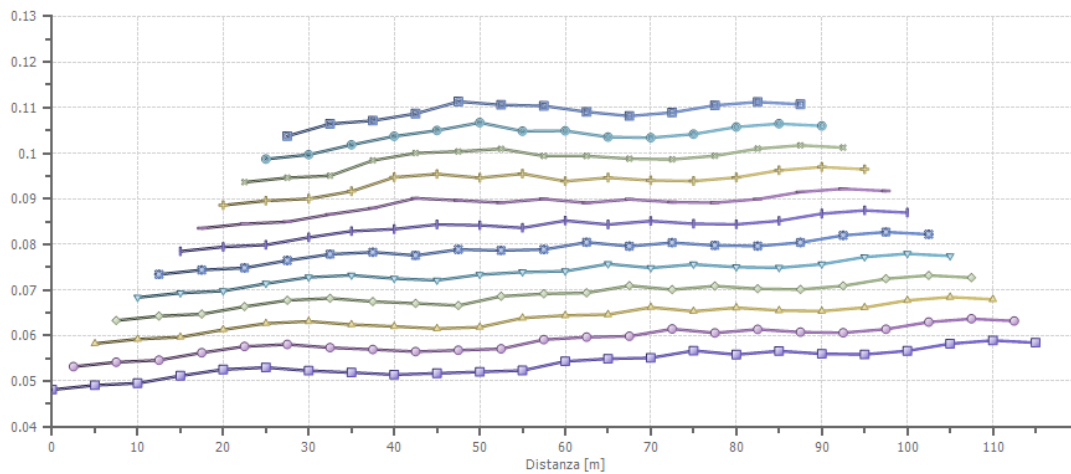
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	16.9	--
G= 5.0 [m]	17.2	--
G= 10.0 [m]	17.4	--
G= 15.0 [m]	17.9	--
G= 20.0 [m]	18.4	--
G= 25.0 [m]	18.6	--
G= 30.0 [m]	18.3	--
G= 35.0 [m]	18.2	--
G= 40.0 [m]	18.0	--
G= 45.0 [m]	18.1	--
G= 50.0 [m]	18.2	--
G= 55.0 [m]	18.3	--
G= 60.0 [m]	19.0	--
G= 65.0 [m]	19.2	--
G= 70.0 [m]	19.3	--
G= 75.0 [m]	19.9	--
G= 80.0 [m]	19.6	--
G= 85.0 [m]	19.8	--
G= 90.0 [m]	19.6	--
G= 95.0 [m]	19.6	--
G= 100.0 [m]	19.8	--
G= 105.0 [m]	20.4	--
G= 110.0 [m]	20.7	--
G= 115.0 [m]	20.5	--
Velocità [m/sec]	282.7	477.6
Descrizione		

---

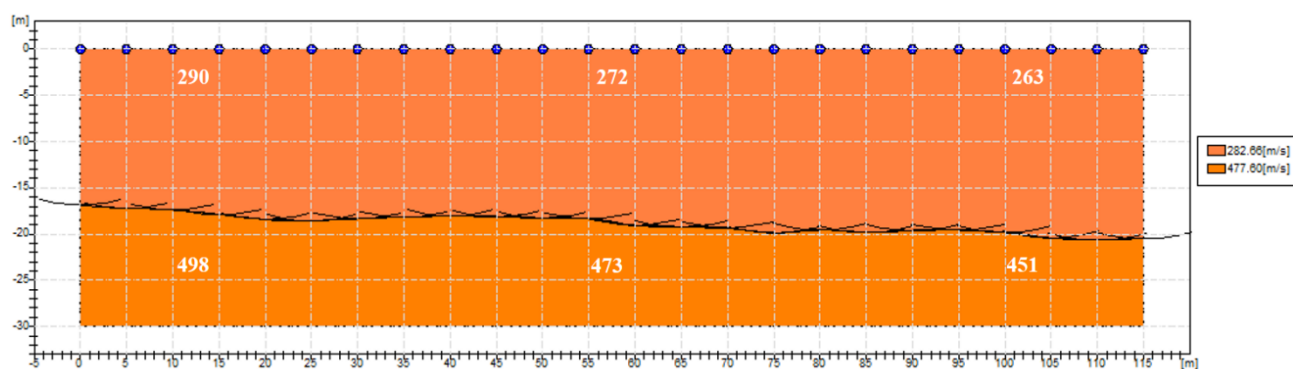


- |  |  |  |
|--|--|--|
| XY = 0, Deviazione standard = 0.07247  | XY = 5, Deviazione standard = 0.0695   | XY = 10, Deviazione standard = 0.06652 |
| XY = 15, Deviazione standard = 0.06354 | XY = 20, Deviazione standard = 0.06055 | XY = 25, Deviazione standard = 0.05755 |
| XY = 30, Deviazione standard = 0.05453 | XY = 35, Deviazione standard = 0.0515  | XY = 40, Deviazione standard = 0.04844 |
| XY = 45, Deviazione standard = 0.04534 | XY = 50, Deviazione standard = 0.0422  | XY = 55, Deviazione standard = 0.039   |

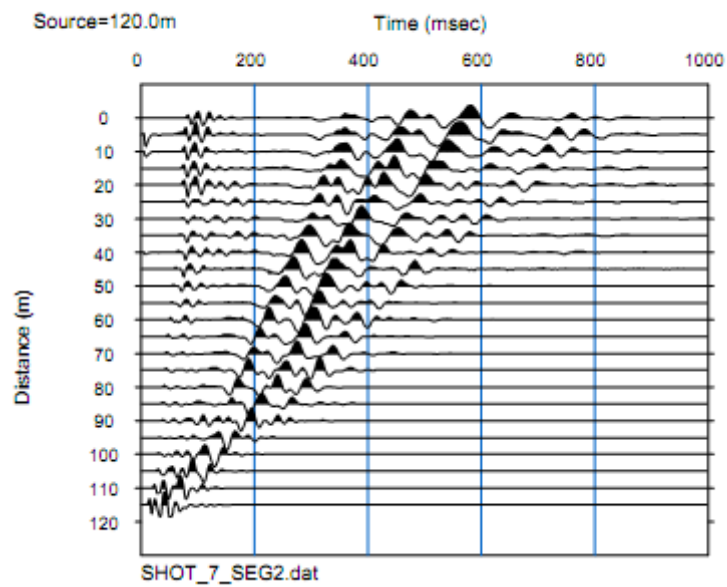
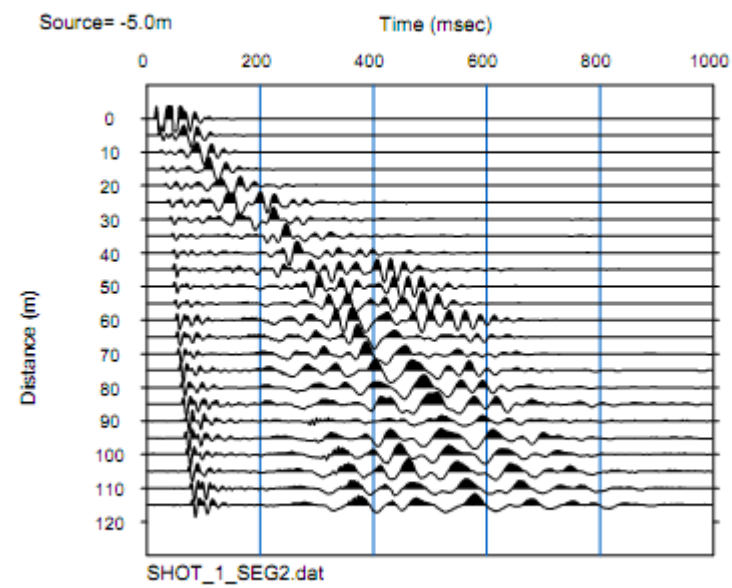


- |                              |                              |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| XY = 0, Rugosità = 0.0026    | XY = 5, Rugosità = 0.002492  | XY = 10, Rugosità = 0.002368 | XY = 15, Rugosità = 0.002242 |
| XY = 20, Rugosità = 0.0021   | XY = 25, Rugosità = 0.001957 | XY = 30, Rugosità = 0.001903 | XY = 35, Rugosità = 0.001925 |
| XY = 40, Rugosità = 0.001928 | XY = 45, Rugosità = 0.001854 | XY = 50, Rugosità = 0.001798 | XY = 55, Rugosità = 0.001674 |

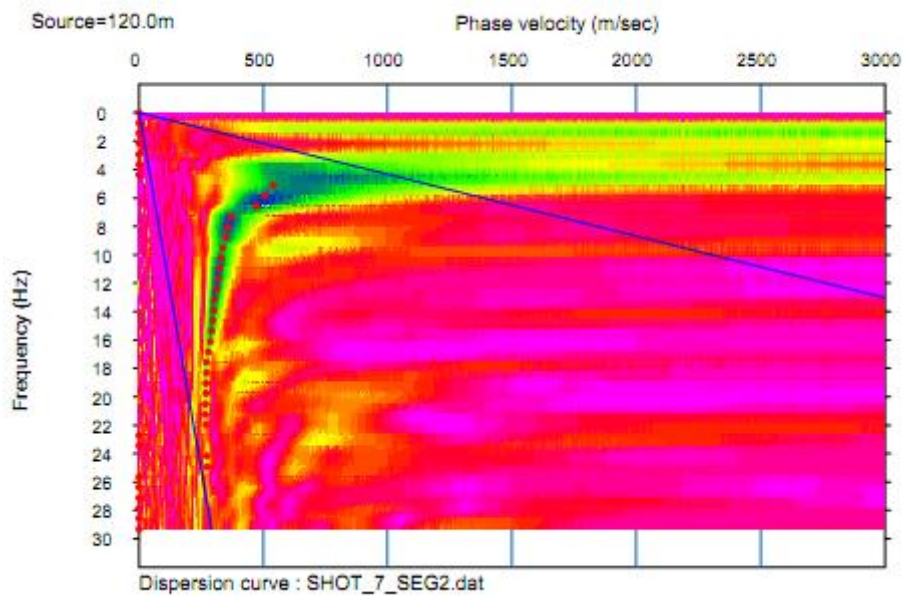
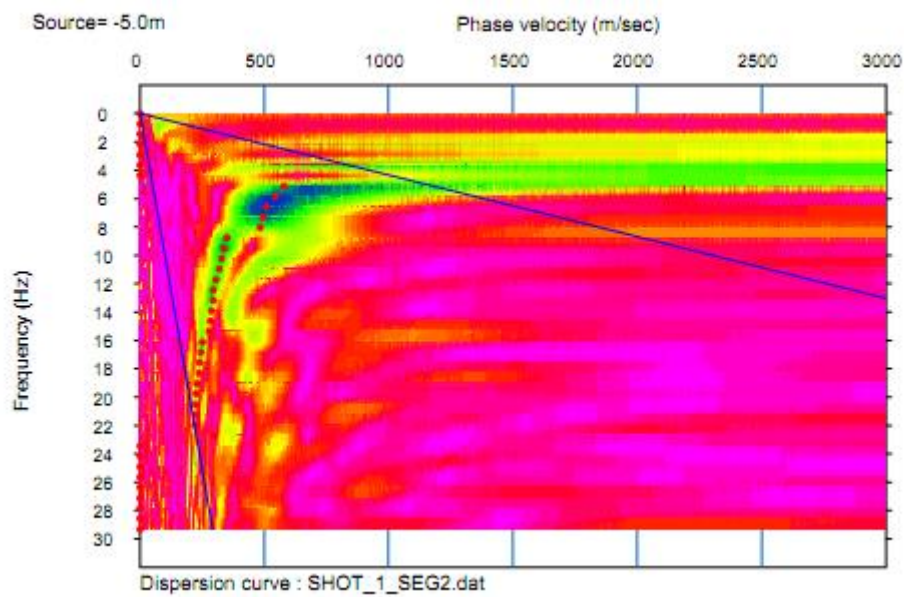
## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH



**Sismogramma MASW 1**



**Curva Dispersione MASW 1**



---

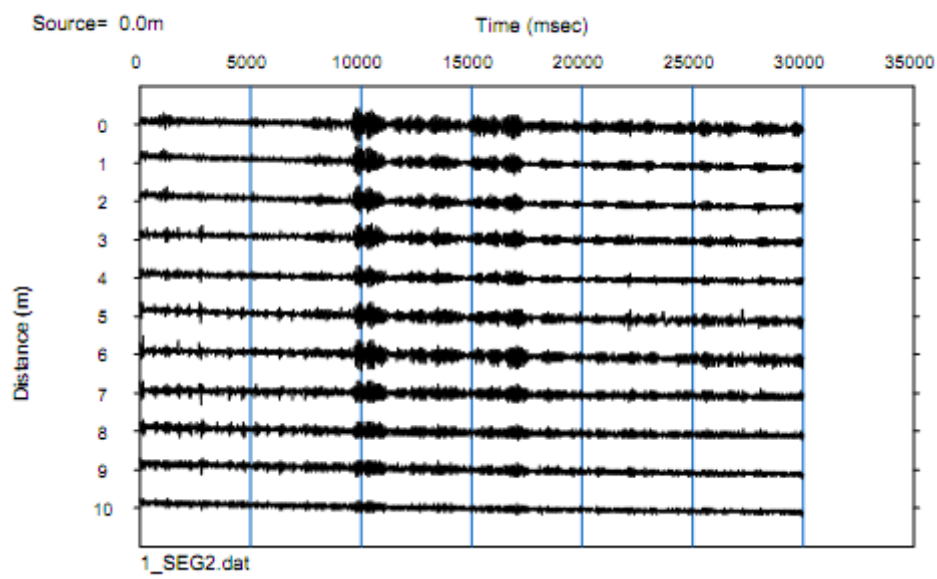
**Geometria dello stendimento ESAC 1**

Geometria Stendimento: L  
Numero Geofoni: 11  
Intervallo (m): 5 m  
Lunghezza Stendimento (m): 25 m  
Quota (m.s.l.m.): 460

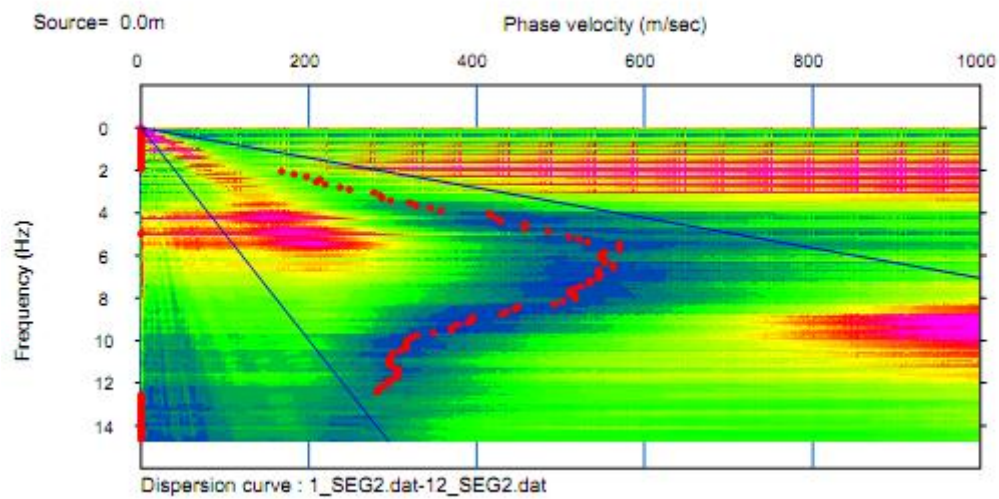
**Coordinate (WGS84 UTM33N)**

Longitudine	Latitudine
133872	4891781

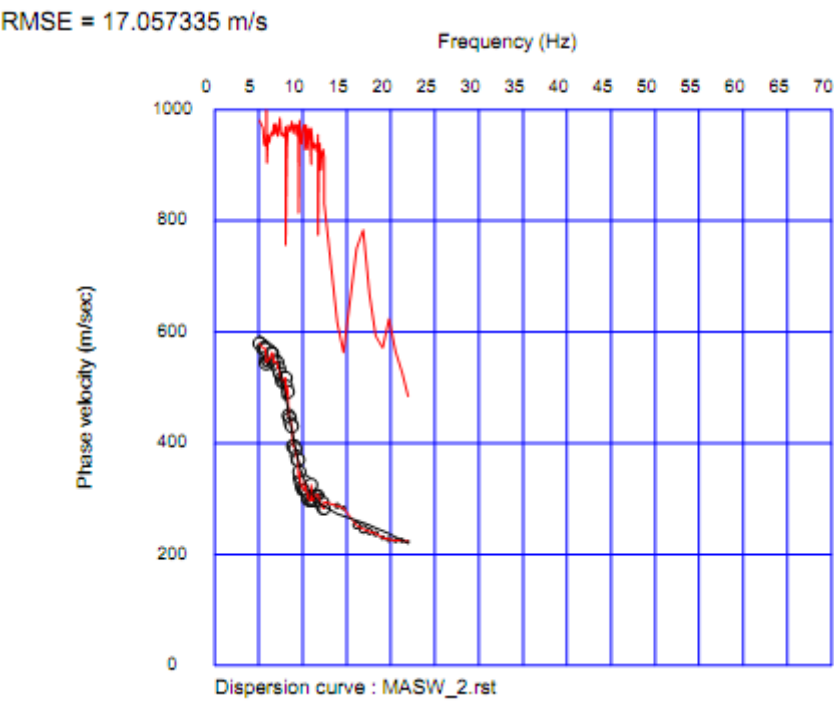
**MAM 2D ESAC 1**



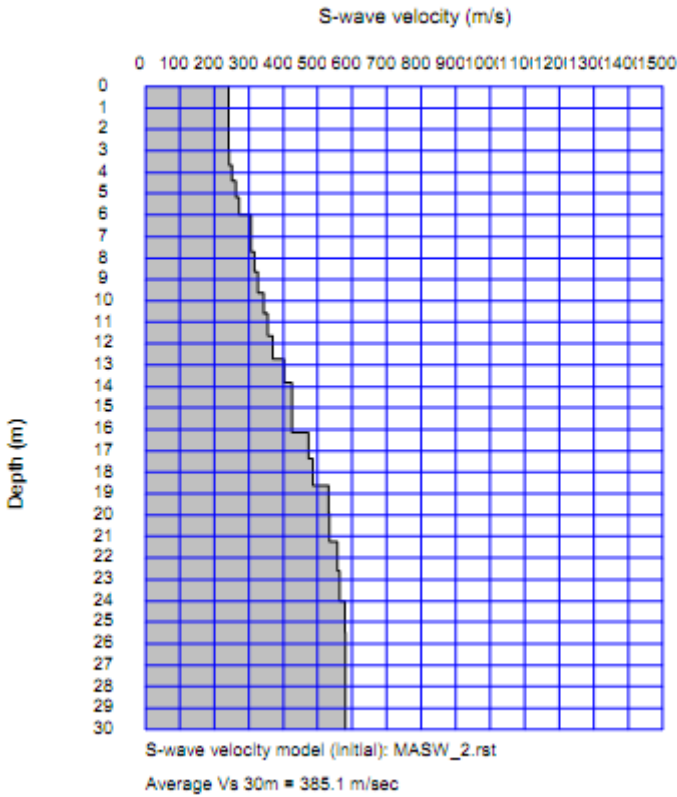
**Curva Dispersione ESAC 1**



**Curva Teorica e Sperimentale MASW 1 + ESAC 1**



**Profilo Vs MASW 1 + ESAC 1**





- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI DOWN - HOLE**

**DH\_1: DOWN-HOLE 1\_CASCIO**

---

**Geometria indagine DH 1**

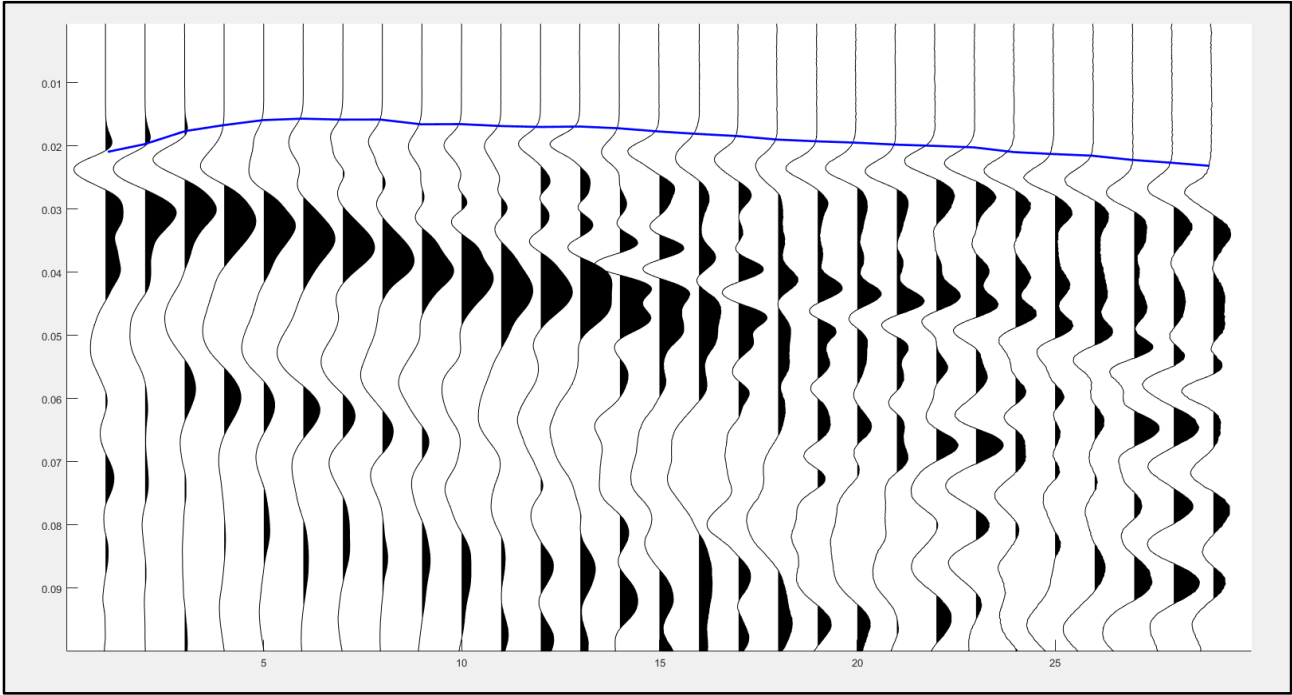
Intervallo (m): 1 m  
Profondità raggiunta (m): 30 m  
Quota (m.s.l.m.): 459

**Coordinate (WGS84 UTM33N)**

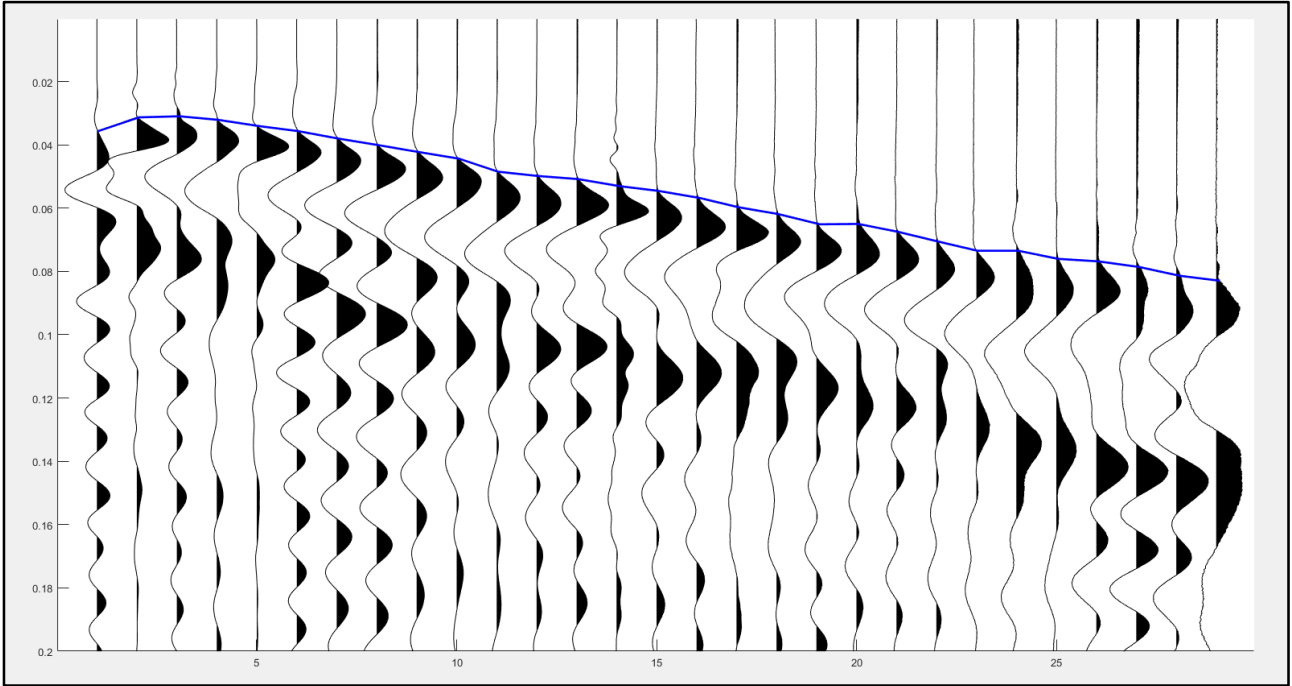
Longitudine	Latitudine
133873	4891723

Tracce assemblate Onde P e SH

Onde P



Onde SH



---

**Tempi di arrivo Onde P e SH (Distanza Shot – Bocca Foro: 4m)**

Sensore	Sdx	Ssx	P	Corr Sdx da sottrarre	Corr Ssx da sottrarre	CorrP da sottrarre
1	0.018013	0.016195	0.01772	0.000444	-0.001374	0.000151
2	0.017726	0.017039	0.018125	0.000157	-0.000530	0.000556
3	0.017822	0.017883	0.017476	0.000253	0.000314	-0.000093
4	0.017630	0.016512	0.018491	0.000061	-0.001057	0.000922
5	0.018013	0.016723	0.018572	0.000444	-0.000846	0.001003
6	0.017917	0.017039	0.016746	0.000348	-0.000530	-0.000823
7	0.017917	0.017989	0.017354	0.000348	0.000420	-0.000215
8	0.017822	0.016934	0.017963	0.000253	-0.000635	0.000394
9	0.016960	0.018200	0.017598	-0.000609	0.000631	0.000029
10	0.017630	0.016301	0.019181	0.000061	-0.001268	0.001612
11	0.013132	0.017145	0.016949	-0.004437	-0.000424	-0.000620
12	0.013802	0.016617	0.018653	-0.003767	-0.000952	0.001084
13	0.017822	0.017250	0.018775	0.000253	-0.000319	0.001206
14	0.019832	0.015984	0.018125	0.002263	-0.001585	0.000556
15	0.017630	0.019254	0.018815	0.000061	0.001685	0.001246
16	0.017535	0.018410	0.017314	-0.000034	0.000841	-0.000255
17	0.017152	0.016090	0.017517	-0.000417	-0.001479	-0.000052
18	0.016769	0.015668	0.018085	-0.000800	-0.001901	0.000516
19	0.016482	0.015773	0.018328	-0.001087	-0.001796	0.000759
20	0.019449	0.017461	0.015772	0.001880	-0.000108	-0.001797
21	0.019066	0.016512	0.018613	0.001497	-0.001057	0.001044
22	0.017152	0.017145	0.020276	-0.000417	-0.000424	0.002707
23	0.017726	0.016406	0.020682	0.000157	-0.001163	0.003113
24	0.013419	0.016195	0.019952	-0.004150	-0.001374	0.002383
25	0.017535	0.019043	0.019992	-0.000034	0.001474	0.002423
26	0.018683	0.019887	0.020236	0.001114	0.002318	0.002667
27	0.012941	0.017778	0.018653	-0.004628	0.000209	0.001084
28	0.017343	0.017250	0.018288	-0.000226	-0.000319	0.000719
29	0.014726	0.014091	0.017801	-0.005144	-0.005779	-0.002069
Medie	0.017091	0.017061	0.018347			
MediaTot	0.0175					
ValoreRif	0.017569					

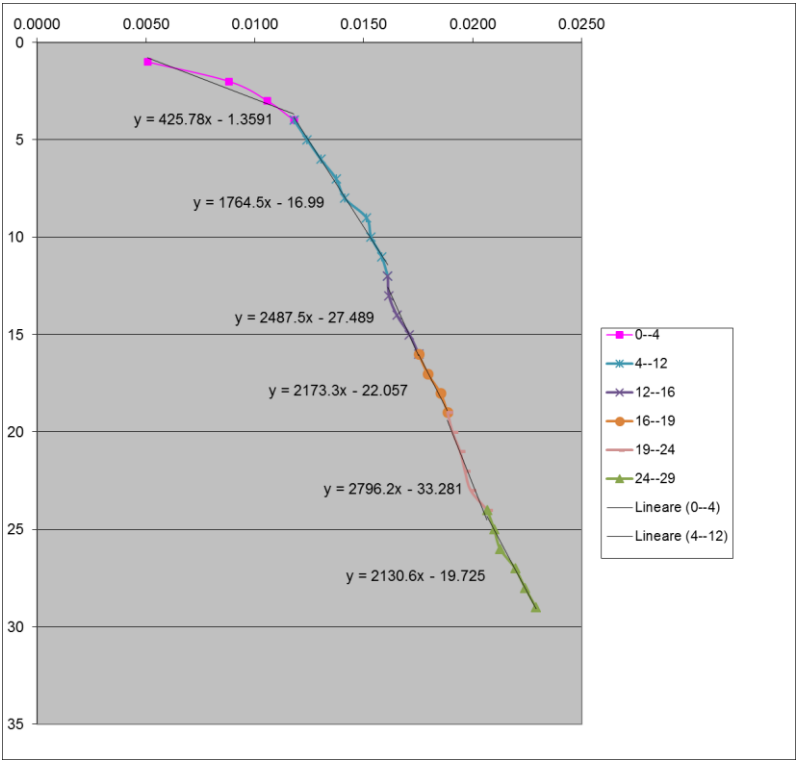
---

---

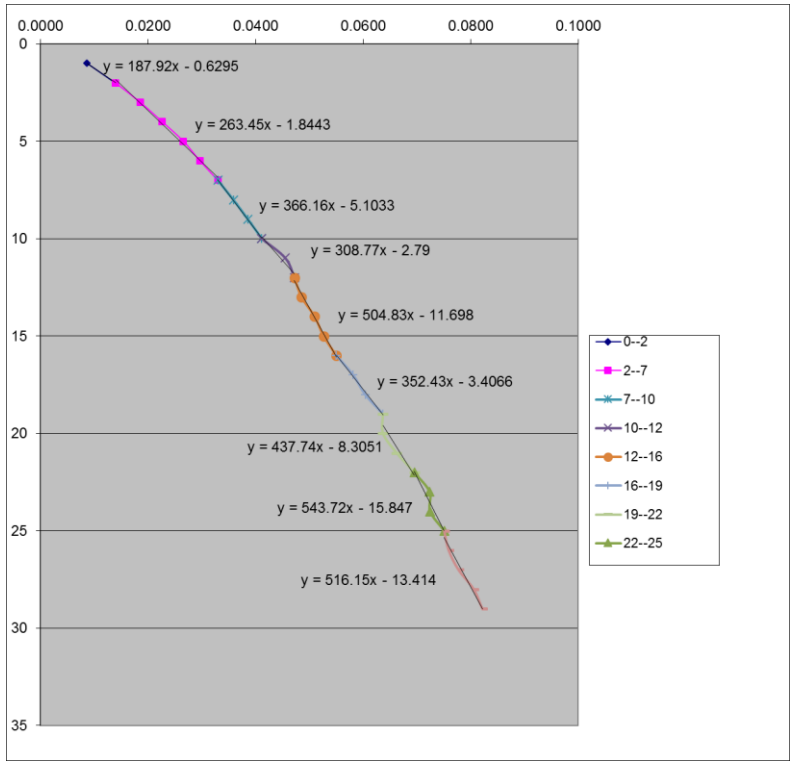
Tempi di arrivo corretti			
Onde SH		Onde P	
1	0.0087	1	0.0051
2	0.0140	2	0.0088
3	0.0186	3	0.0106
4	0.0227	4	0.0118
5	0.0266	5	0.0124
6	0.0297	6	0.0130
7	0.0330	7	0.0137
8	0.0359	8	0.0141
9	0.0386	9	0.0151
10	0.0412	10	0.0153
11	0.0456	11	0.0158
12	0.0473	12	0.0161
13	0.0486	13	0.0162
14	0.0510	14	0.0165
15	0.0527	15	0.0171
16	0.0550	16	0.0175
17	0.0582	17	0.0179
18	0.0604	18	0.0185
19	0.0637	19	0.0188
20	0.0637	20	0.0191
21	0.0663	21	0.0194
22	0.0695	22	0.0196
23	0.0724	23	0.0199
24	0.0725	24	0.0207
25	0.0751	25	0.0210
26	0.0759	26	0.0213
27	0.0778	27	0.0219
28	0.0806	28	0.0224
29	0.0822	29	0.0229

---

# Onde P

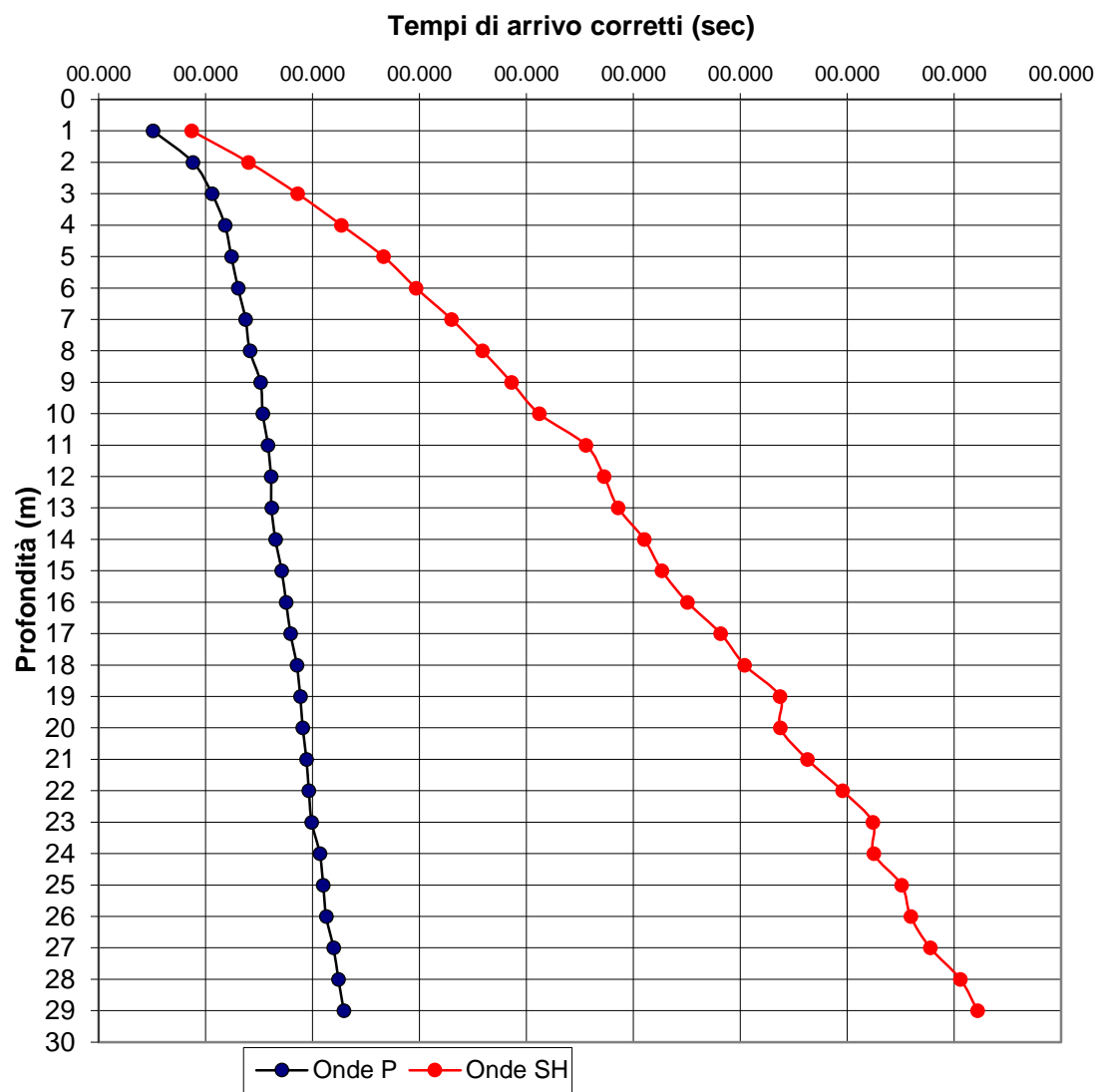


# Onde SH



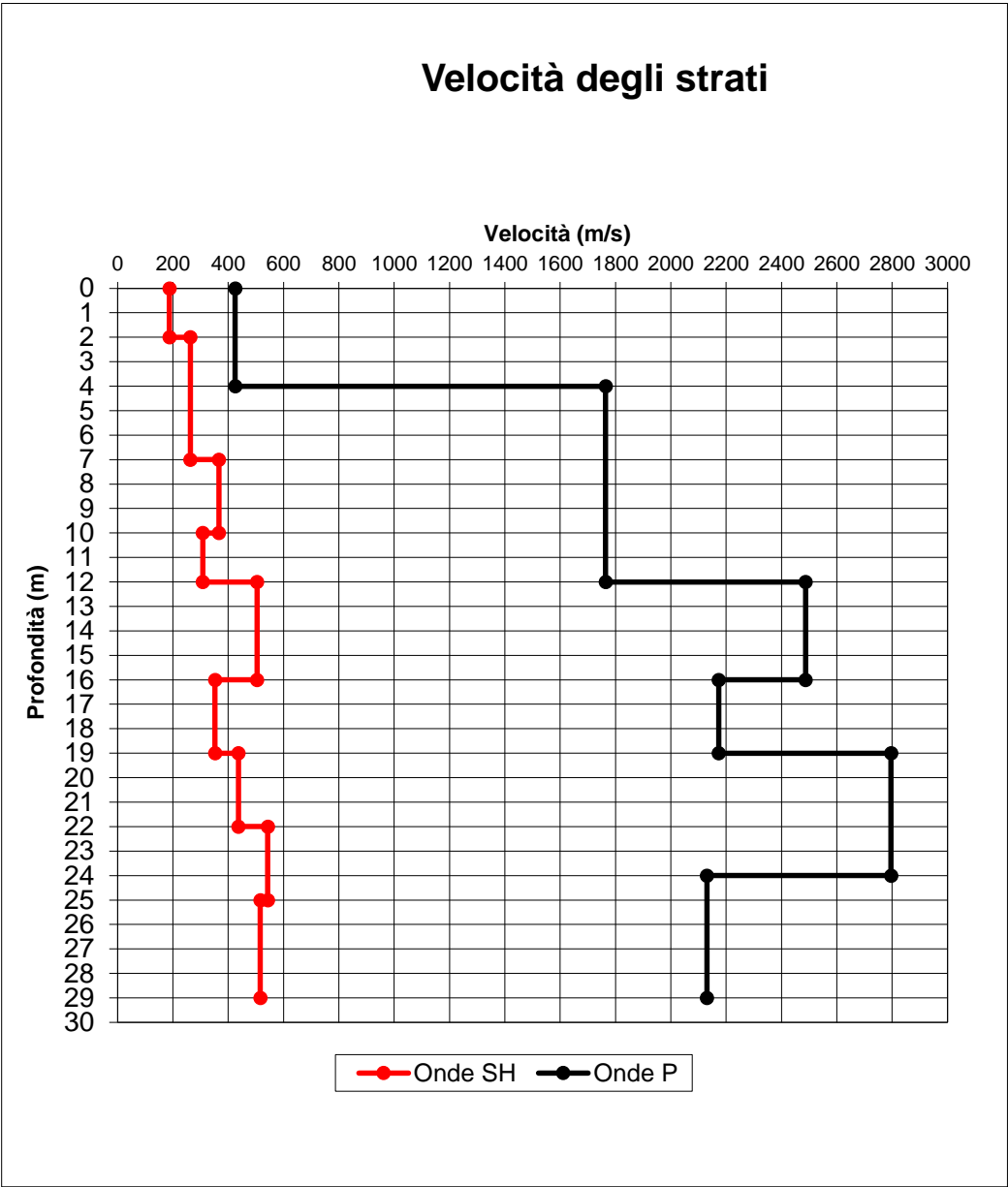
Dromocrone Onde P e SH

Dromocrone





**Profilo di velocità Onde P e SH**



Profondità (m dal p.c.)	Vel Onde SH (m/sec)	Profondità (m dal p.c.)	Vel Onde P (m/sec)
0.00-2.00	187	0.00-4.00	425
2.00-7.00	263	4.00-12.00	1764
7.00-10.00	366	12.00-16.00	2487
10.00-12.00	308	16.00-19.00	2173
12.00-16.00	504	19.00-24.00	2796
16.00-19.00	352	24.00-29.00	2130
19.00-22.00	437		
22.00-25.00	543		
25.00-29.00	516		

**DH\_2: DOWN-HOLE 2\_MOLAZZANA**

---

**Geometria indagine DH 2**

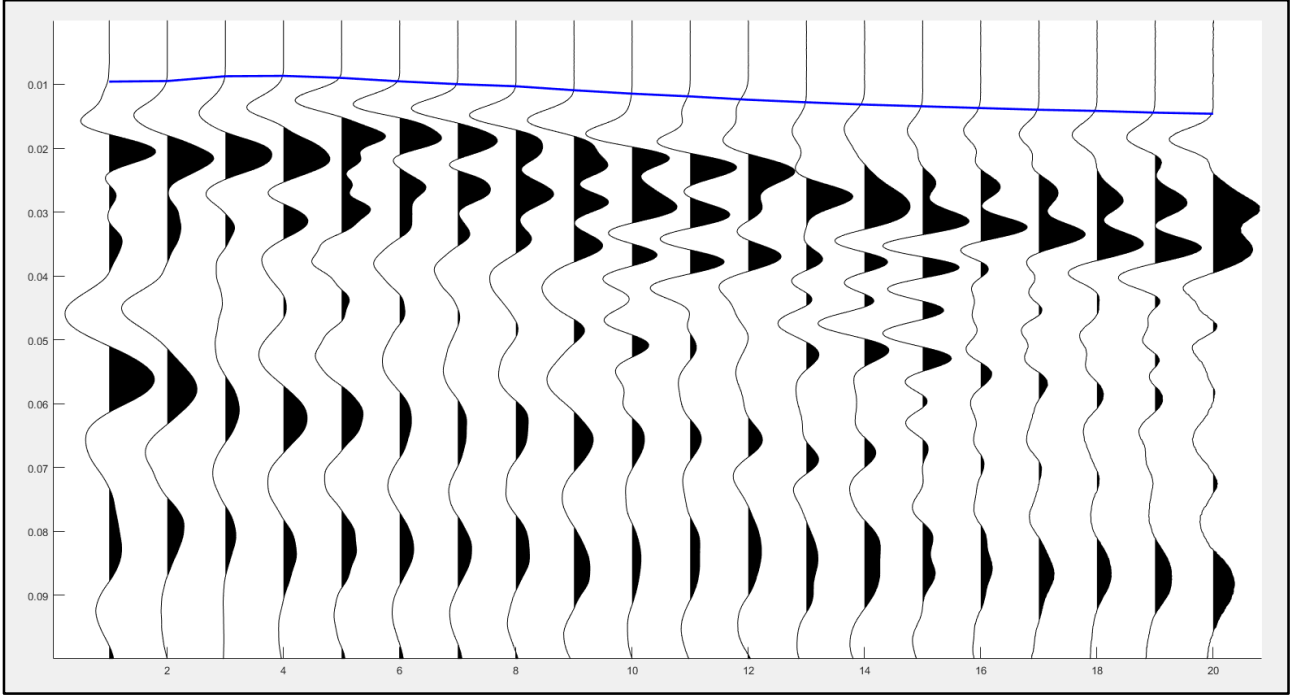
Intervallo (m): 1 m  
Profondità raggiunta (m): 20 m  
Quota (m.s.l.m.): 420

**Coordinate (WGS84 UTM33N)**

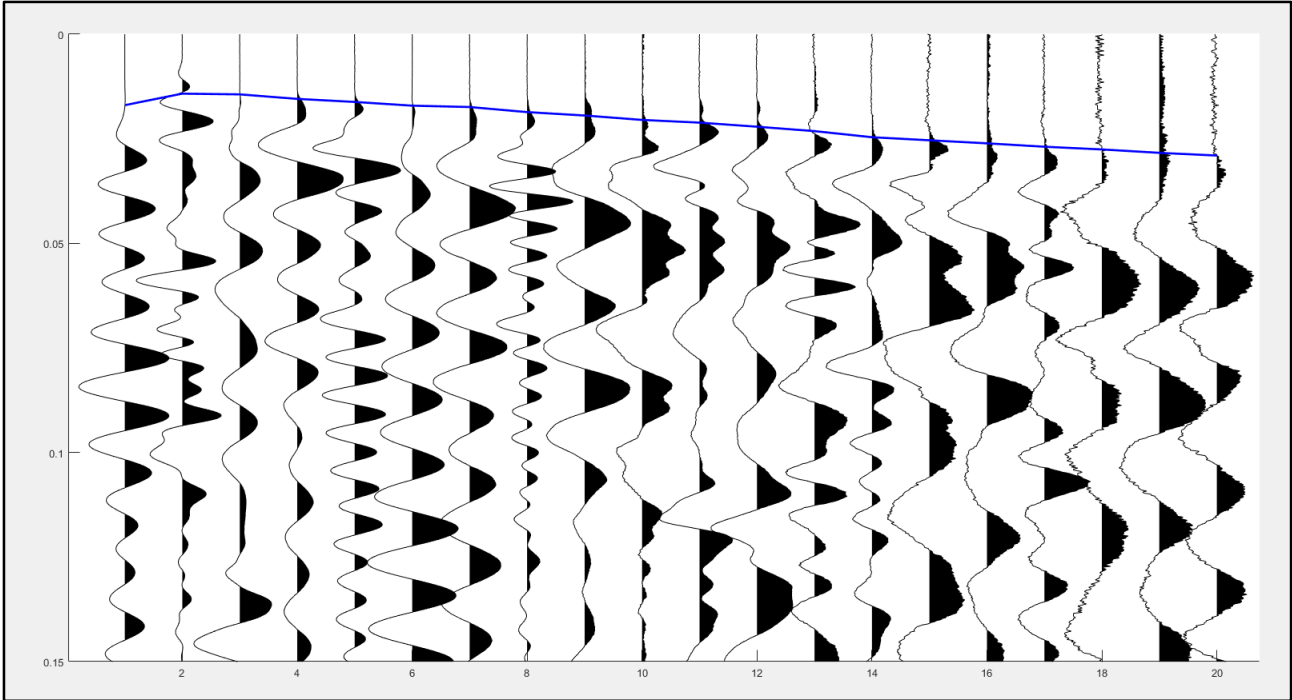
Longitudine	Latitudine
133306	4889832

Tracce assemblate Onde P e SH

Onde P



Onde SH



---

**Tempi di arrivo Onde P e SH (Distanza Shot – Bocca Foro: 4m)**

Sensore	Sdx	Ssx	P	Corr Sdx DA SOTTRARRE	Corr Ssx DA SOTTRARRE	CorrP DA SOTTRARRE
1	0.013184	0.015357	0.014348	0.0002894833333333	0.0024624833333333	0.0014534833333333
2	0.013069	0.017820	0.014348	0.0001744833333333	0.0049254833333333	0.0014534833333333
3	0.013261	0.011782	0.014593	0.0003664833333333	-0.0011125166666667	0.0016984833333333
4	0.013261	0.010868	0.014716	0.0003664833333333	-0.0020265166666667	0.0018214833333333
5	0.013107	0.011623	0.014839	0.0002124833333333	-0.0012715166666667	0.0019444833333333
6	0.012762	0.011345	0.014961	-0.0001325166666667	-0.0015495166666667	0.0020664833333333
7	0.013146	0.011146	0.014716	0.0002514833333333	-0.0017485166666667	0.0018214833333333
8	0.012685	0.011226	0.014348	-0.0002095166666667	-0.0016685166666667	0.0014534833333333
9	0.012954	0.011186	0.014716	0.0000594833333333	-0.0017085166666667	0.0018214833333333
10	0.012416	0.010670	0.014000	-0.0004785166666667	-0.0022245166666667	0.0011054833333333
11	0.012569	0.010392	0.014225	-0.0003255166666667	-0.0025025166666667	0.0013304833333333
12	0.012685	0.011504	0.014348	-0.0002095166666667	-0.0013905166666667	0.0014534833333333
13	0.012493	0.011107	0.014471	-0.0004015166666667	-0.0017875166666667	0.0015764833333333
14	0.012147	0.011186	0.014348	-0.0007475166666667	-0.0017085166666667	0.0014534833333333
15	0.012838	0.011266	0.014471	-0.0000565166666667	-0.0016285166666667	0.0015764833333333
16	0.012108	0.011146	0.013980	-0.0007865166666667	-0.0017485166666667	0.0010854833333333
17	0.012685	0.010590	0.013367	-0.0002095166666667	-0.0023045166666667	0.0004724833333333
18	0.012454	0.010273	0.014103	-0.0004405166666667	-0.0026215166666667	0.0012084833333333
19	0.012685	0.010511	0.014103	-0.0002095166666667	-0.0023835166666667	0.0012084833333333
20	0.012300	0.010392	0.014471	-0.0005945166666667	-0.0025025166666667	0.0015764833333333
Medie	0.01274	0.01157	0.014374			
MediaTot	0.012895					
ValoreRif	0.012895					

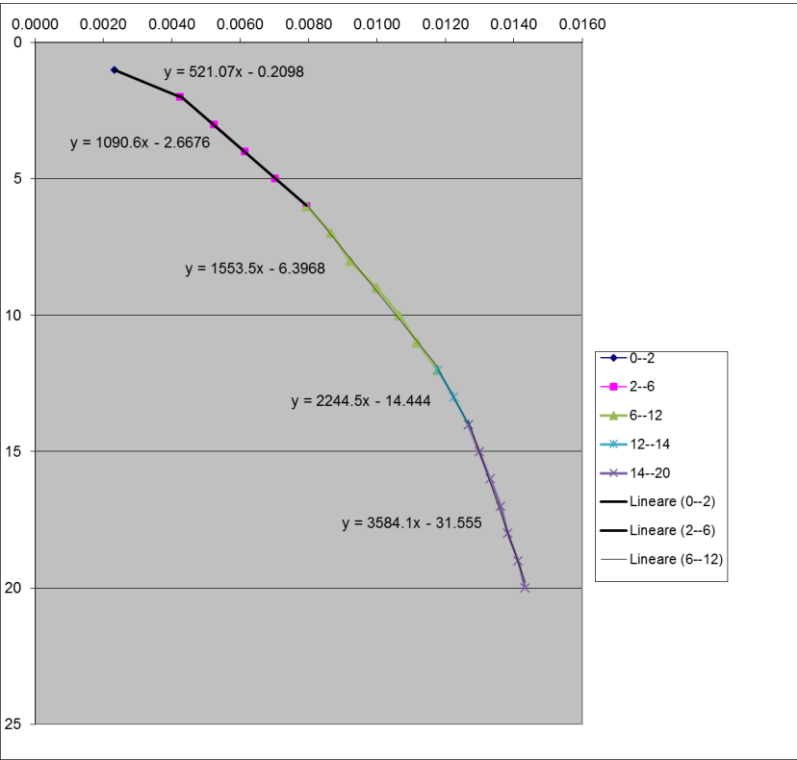
---

---

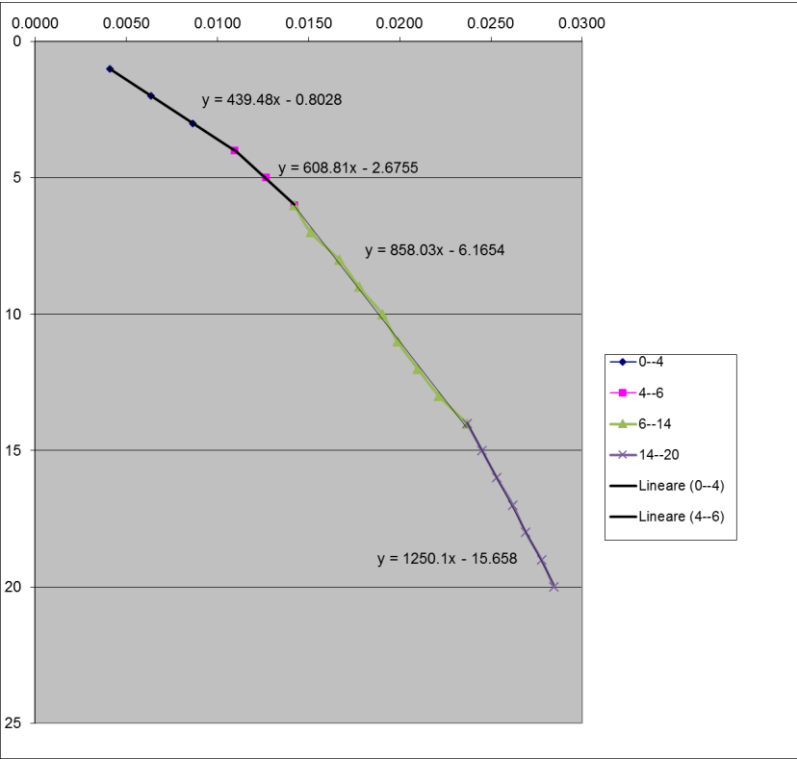
Tempi di arrivo corretti			
Onde SH		Onde P	
1	0.0041	1	0.002322
2	0.0064	2	0.004241
3	0.0086	3	0.005240
4	0.0109	4	0.006133
5	0.0127	5	0.007022
6	0.0142	6	0.007932
7	0.0151	7	0.008659
8	0.0167	8	0.009214
9	0.0178	9	0.009981
10	0.0190	10	0.010642
11	0.0199	11	0.011175
12	0.0210	12	0.011774
13	0.0222	13	0.012244
14	0.0237	14	0.012664
15	0.0245	15	0.012987
16	0.0253	16	0.013302
17	0.0262	17	0.013609
18	0.0269	18	0.013823
19	0.0278	19	0.014120
20	0.0285	20	0.014326

---

Onde P

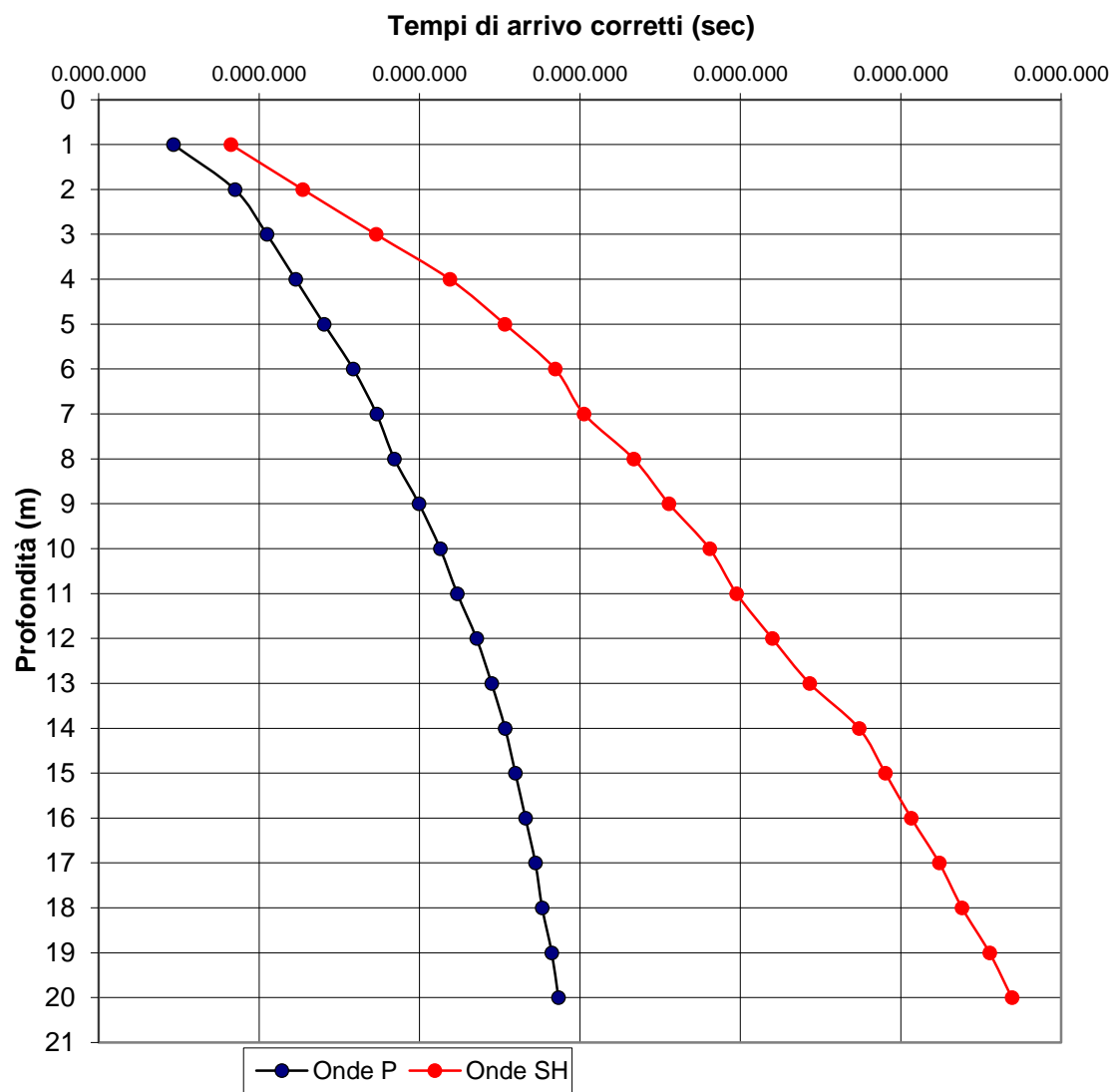


Onde SH



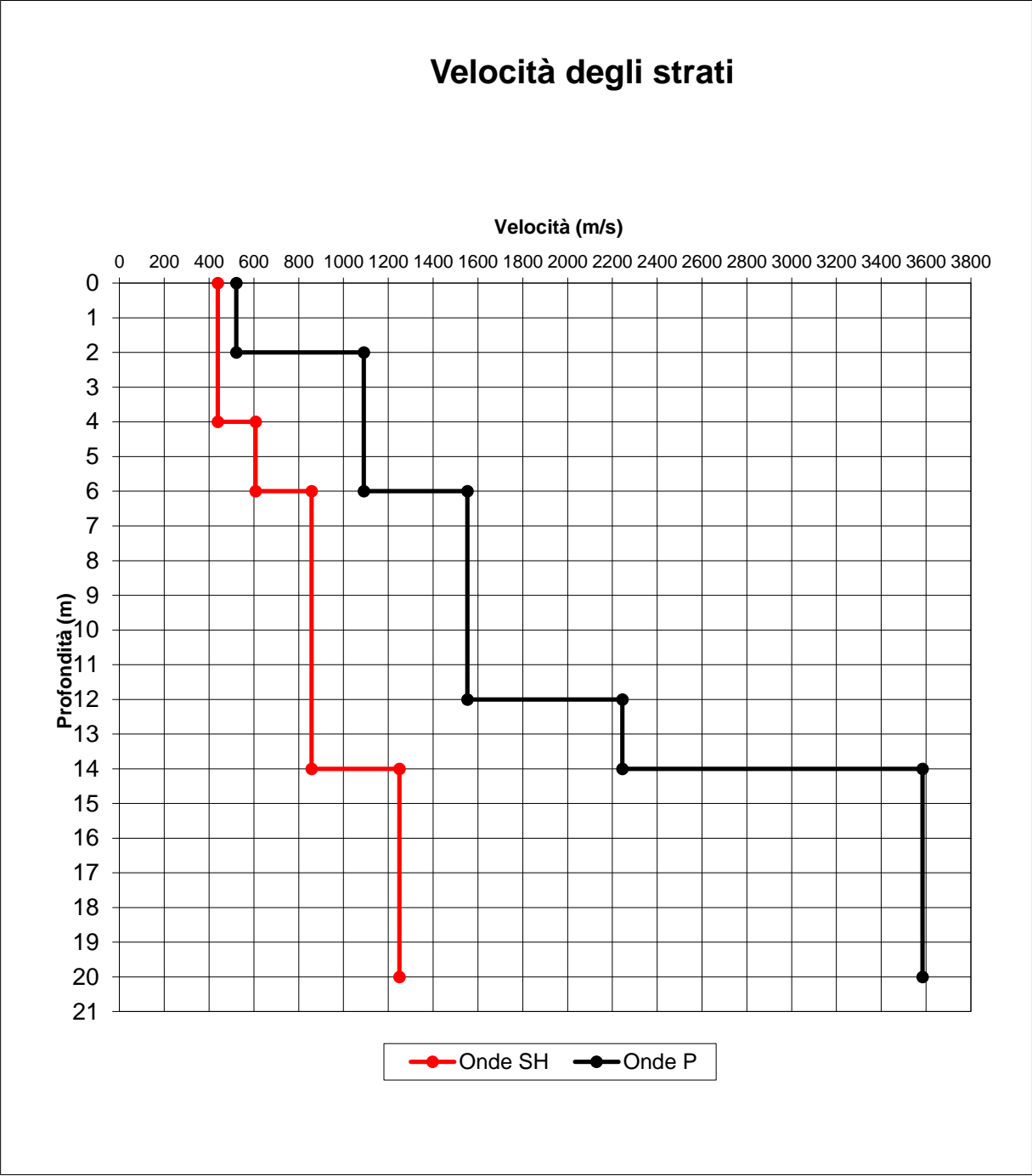
Dromocrone Onde P e SH

Dromocrone





**Profilo di velocità Onde P e SH**



Profondità	Vel Onde SH	Profondità	Vel Onde P
(m dal p.c.)	(m/sec)	(m dal p.c.)	(m/sec)
0.00-4.00	439	0.00-2.00	521
4.00-6.00	608	2.00-6.00	1090
6.00-14.00	858	6.00-12.00	1553
14.00-20.00	1250	12.00-14.00	2244
		14.00-20.00	3584

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI GEOELETTRICHE**

**ERT\_1: INDAGINE GEOELETTRICA 1\_CASCIO**

This is a detailed topographic map of a mountainous region. The map features numerous contour lines indicating elevation, with labels such as 450, 460, 470, 480, 490, 500, 510, 520, 530, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000, 1010, 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, 1100, 1110, 1120, 1130, 1140, 1150, 1160, 1170, 1180, 1190, 1200, 1210, 1220, 1230, 1240, 1250, 1260, 1270, 1280, 1290, 1300, 1310, 1320, 1330, 1340, 1350, 1360, 1370, 1380, 1390, 1400, 1410, 1420, 1430, 1440, 1450, 1460, 1470, 1480, 1490, 1500, 1510, 1520, 1530, 1540, 1550, 1560, 1570, 1580, 1590, 1600, 1610, 1620, 1630, 1640, 1650, 1660, 1670, 1680, 1690, 1700, 1710, 1720, 1730, 1740, 1750, 1760, 1770, 1780, 1790, 1800, 1810, 1820, 1830, 1840, 1850, 1860, 1870, 1880, 1890, 1900, 1910, 1920, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090, 2100, 2110, 2120, 2130, 2140, 2150, 2160, 2170, 2180, 2190, 2200, 2210, 2220, 2230, 2240, 2250, 2260, 2270, 2280, 2290, 2300, 2310, 2320, 2330, 2340, 2350, 2360, 2370, 2380, 2390, 2400, 2410, 2420, 2430, 2440, 2450, 2460, 2470, 2480, 2490, 2500, 2510, 2520, 2530, 2540, 2550, 2560, 2570, 2580, 2590, 2600, 2610, 2620, 2630, 2640, 2650, 2660, 2670, 2680, 2690, 2700, 2710, 2720, 2730, 2740, 2750, 2760, 2770, 2780, 2790, 2800, 2810, 2820, 2830, 2840, 2850, 2860, 2870, 2880, 2890, 2900, 2910, 2920, 2930, 2940, 2950, 2960, 2970, 2980, 2990, 3000, 3010, 3020, 3030, 3040, 3050, 3060, 3070, 3080, 3090, 3100, 3110, 3120, 3130, 3140, 3150, 3160, 3170, 3180, 3190, 3200, 3210, 3220, 3230, 3240, 3250, 3260, 3270, 3280, 3290, 3300, 3310, 3320, 3330, 3340, 3350, 3360, 3370, 3380, 3390, 3400, 3410, 3420, 3430, 3440, 3450, 3460, 3470, 3480, 3490, 3500, 3510, 3520, 3530, 3540, 3550, 3560, 3570, 3580, 3590, 3600, 3610, 3620, 3630, 3640, 3650, 3660, 3670, 3680, 3690, 3700, 3710, 3720, 3730, 3740, 3750, 3760, 3770, 3780, 3790, 3800, 3810, 3820, 3830, 3840, 3850, 3860, 3870, 3880, 3890, 3900, 3910, 3920, 3930, 3940, 3950, 3960, 3970, 3980, 3990, 4000, 4010, 4020, 4030, 4040, 4050, 4060, 4070, 4080, 4090, 4100, 4110, 4120, 4130, 4140, 4150, 4160, 4170, 4180, 4190, 4200, 4210, 4220, 4230, 4240, 4250, 4260, 4270, 4280, 4290, 4300, 4310, 4320, 4330, 4340, 4350, 4360, 4370, 4380, 4390, 4400, 4410, 4420, 4430, 4440, 4450, 4460, 4470, 4480, 4490, 4500, 4510, 4520, 4530, 4540, 4550, 4560, 4570, 4580, 4590, 4600, 4610, 4620, 4630, 4640, 4650, 4660, 4670, 4680, 4690, 4700, 4710, 4720, 4730, 4740, 4750, 4760, 4770, 4780, 4790, 4800, 4810, 4820, 4830, 4840, 4850, 4860, 4870, 4880, 4890, 4900, 4910, 4920, 4930, 4940, 4950, 4960, 4970, 4980, 4990, 5000, 5010, 5020, 5030, 5040, 5050, 5060, 5070, 5080, 5090, 5100, 5110, 5120, 5130, 5140, 5150, 5160, 5170, 5180, 5190, 5200, 5210, 5220, 5230, 5240, 5250, 5260, 5270, 5280, 5290, 5300, 5310, 5320, 5330, 5340, 5350, 5360, 5370, 5380, 5390, 5400, 5410, 5420, 5430, 5440, 5450, 5460, 5470, 5480, 5490, 5500, 5510, 5520, 5530, 5540, 5550, 5560, 5570, 5580, 5590, 5600, 5610, 5620, 5630, 5640, 5650, 5660, 5670, 5680, 5690, 5700, 5710, 5720, 5730, 5740, 5750, 5760, 5770, 5780, 5790, 5800, 5810, 5820, 5830, 5840, 5850, 5860, 5870, 5880, 5890, 5900, 5910, 5920, 5930, 5940, 5950, 5960, 5970, 5980, 5990, 6000, 6010, 6020, 6030, 6040, 6050, 6060, 6070, 6080, 6090, 6100, 6110, 6120, 6130, 6140, 6150, 6160, 6170, 6180, 6190, 6200, 6210, 6220, 6230, 6240, 6250, 6260, 6270, 6280, 6290, 6300, 6310, 6320, 6330, 6340, 6350, 6360, 6370, 6380, 6390, 6400, 6410, 6420, 6430, 6440, 6450, 6460, 6470, 6480, 6490, 6500, 6510, 6520, 6530, 6540, 6550, 6560, 6570, 6580, 6590, 6600, 6610, 6620, 6630, 6640, 6650, 6660, 6670, 6680, 6690, 6700, 6710, 6720, 6730, 6740, 6750, 6760, 6770, 6780, 6790, 6800, 6810, 6820, 6830, 6840, 6850, 6860, 6870, 6880, 6890, 6900, 6910, 6920, 6930, 6940, 6950, 6960, 6970, 6980, 6990, 7000, 7010, 7020, 7030, 7040, 7050, 7060, 7070, 7080, 7090, 7100, 7110, 7120, 7130, 7140, 7150, 7160, 7170, 7180, 7190, 7200, 7210, 7220, 7230, 7240, 72

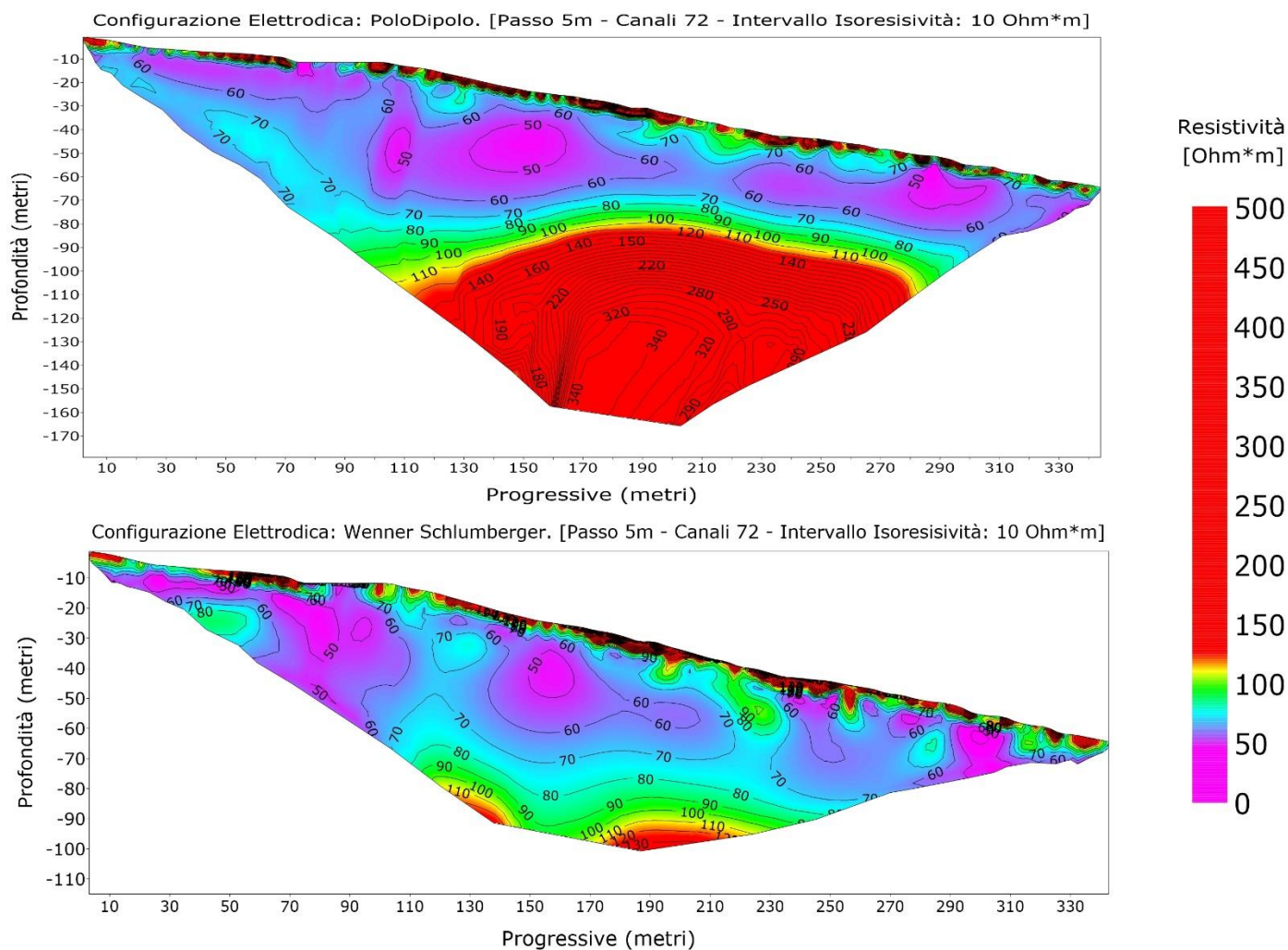
## Geometria dello stendimento

Numero Elettrodi: 72

Intervallo (m): 5 m

Lunghezza Stendimento (m): 355 m

## Sezione Geoelettrica: CASCIO



- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI E REPORT PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE SUI CAMPIONI**

REGIONE TOSCANA - DIREZIONE GENERALE POLITICHE TERRITORIALI E AMBIENTALI - SERVIZIO SISMICO REGIONALE  
 PROVINCIA DI LUCCA COMUNE DI MOLAZZANA

[illegible]

**NOTE**

Blocco arenaceo da 15.2m a 17.5m  
Installato pozzetto esterno

REGIONE TOSCANA - DIREZIONE GENERALE POLITICHE TERRITORIALI E AMBIENTALI - SERVIZIO SISMICO REGIONALE  
PROVINCIA DI LUCCA                      COMUNE DI MOLAZZANA

[illegible]

Terreno di riporto da 0.0 a 0.4 m dal p.c.; Coltre detritica da 0.4 a 3.0 m dal p.c.  
Coltre di alterazione del substrato da 9.5 a 14.5 m dal p.c.  
Installato pozzetto esterno





**CGT Spinoff Impresa Sociale srl**  
START-UP INNOVATIVA dal 07/07/2016

**Sede legale:**  
Via E. Vezzosi, 15  
52100, Arezzo (Ar)

**Sede Operativa 1:**  
Via Bruxelles, 10/24  
Via Strasburgo 7  
Zona Industriale  
Bomba  
52022, Cavriglia (Ar)

**Sede Operativa 2:**  
Via Vetri Vecchi  
52027, San Giovanni  
Valdarno (Ar)



P.Iva/C.F.: 02255510519 - PEC: cgtspinoffimpresasociale@legalmail.it - Contatti: 055.03.30.341/342, info@cgts.it

PROGETTO:

## Prove di laboratorio su campioni provenienti da località Molazzana (LU)

COMMITTENTE:



**Tecna S.r.l.**  
Via B. Ser Gorello, 11-A  
52100, Arezzo  
C.I. e P. Iva 01358250510

OGGETTO:

## Analisi di laboratorio e consulenza su campioni di terreno



DATA: 05/12/2019

ELABORATO: Report analisi di laboratorio e consulenza

FILE: Report\_PR486-VA034

PROTOCOLLO:

PROGETTO: 486

SCALA: ---

REVISIONE:	DESCRIZIONE:	ELABORATO:	VERIFICATO:	APPROVATO:	DATA:
0	Emissione	Dott.ssa Sfalanga	Dott.ssa Sfalanga	Prof. Carmignani	05/12/2019

Autorizzazione N. 253 del 23/05/2018 Art. 59 D.P.R. n. 380/2001, Circ. 7618/2010 Servizio Tecnico Centrale  
Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti



Le elaborazioni dei parametri riportate sono il risultato di considerazioni e osservazioni esclusivamente di laboratorio sui materiali sottoposti ad analisi.

Nelle schede di descrizione dei singoli campioni ed in ogni rapporto di prova vengono, di volta in volta, segnalate le caratteristiche peculiari e le eventuali anomalie riscontrate durante le fasi di lavorazione ed esecuzione.

Il settore geotecnico del Laboratorio, basandosi sulla classificazione della qualità dei campioni proposta nelle Raccomandazioni AGI (1977) e nell' UNI ENV 1997-2:2002 "Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 2: Progettazione assistita da prove di laboratorio" , ha definito una classe di qualità intermedia del campione tra Q4 e Q5. La necessità di tale classificazione è giustificata in molti casi dalla coesistenza di porzioni di carota Q4 e di porzioni Q5 in uno stesso campione. Evidentemente le prove meccaniche vengono effettuate nella porzione Q5, mentre i risultati della porzione Q4 possono essere assimilati a quelli che si ottengono da campioni rimaneggiati.

La più appropriata e completa valutazione dei risultati, in ogni caso, viene rimandata, come da normativa, al progettista che trova nelle certificazioni delle prove tutti i dati sorgente necessari.

## INDICE GENERALE

TABELLA RIASSUNTIVA CAMPIONI	Pag.	1
SONDAGGIO 1      CAMPIONE 1      m 14,00 - 14,50	Pag.	2
SONDAGGIO 2      CAMPIONE 1      m 7,00 - 7,40	Pag.	23
ELENCO ATTREZZATURA UTILIZZATA	Pag.	43

## TABELLA RIASSUNTIVA

SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITÀ	Contenuto d' acqua	Peso di volume	$\phi$ (*)	c (*)
N.	N.	(m)	%	kN/m <sup>3</sup>	°	kPa
1	1	14,00 – 14,50	13,9	20,9	29 <sup>CD</sup>	15 <sup>CD</sup>
2	1	7,00 – 7,40	14,4	20,7	30 <sup>CD</sup>	10 <sup>CD</sup>
<b>Committente:</b> Tecna S.r.l. per Regione Toscana <b>Località:</b> Molazzana (LU) <b>Data:</b> 05/12/2019 <b>Progetto N°:</b> 486 <b>Verbale accettazione:</b> 034						

(\*) = N.B. I valori riportati sono da considerarsi consulenza di laboratorio. La scelta definitiva dei parametri è di competenza del Committente.  
 CD = Prova di taglio diretto consolidata drenata

## DESCRIZIONE E RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA CAROTA ESTRUSA

**Committente:** Tecna Srl per Regione Toscana

**Cantiere/Località:** Molazzana (LU)

**Sondaggio:** 1

**Campione:** 1

**Profondità prelievo (m):** 14,00-14,50

**Data prelievo:** 26/09/2019

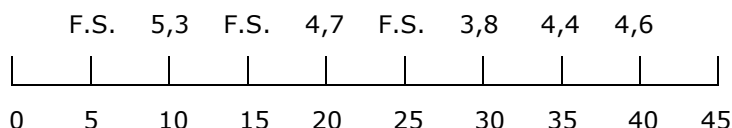
**Data apertura:** 11/11/2019

**Verbale accettazione n° 034**

**Descrizione:** Limo con sabbia argilloso debolmente ghiaioso (Raccomandazioni AGI 1977).  
Campione duro.

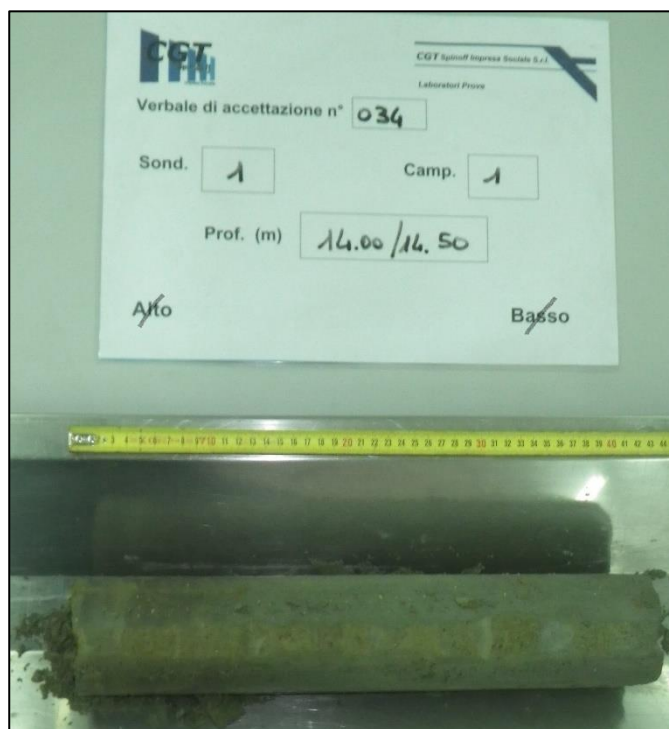
Colore: 5Y 4/3 – Olive (Munsell Soil Color Chart)

### Pocket (kg/cm<sup>2</sup>):



**Lunghezza carota: 43 cm**  
**Diametro carota: 88,9 mm**

PARAMETRI ALL'APERTURA	Valore
<b>W</b> - Contenuto naturale d'acqua (%)	13,9
<b>p<sub>w</sub></b> - Densità umida (g/cm <sup>3</sup> )	2,13
<b>p<sub>D</sub></b> - Densità secca (g/cm <sup>3</sup> )	1,87
<b>p<sub>sat</sub></b> - Densità satura (g/cm <sup>3</sup> )	2,18
<b>Ø</b> - Porosità (adim.)	0,31
<b>e</b> - Indice dei vuoti (adim.)	0,44
<b>S<sub>r</sub></b> - Grado di saturazione (%)	85



**Modalità di prelievo:** Sondaggio a rotazione

**Tipo di fustella:** Plastica

**Classe di qualità del campione:** Q4/Q5 (Raccomandazioni AGI 1977)

C2/C1 (Eurocode 7)

### Prove eseguite:

Cont. Acqua <b>W</b>	<b>X</b>	Granulom. <b>Gr</b>	-	Limite di ritiro <b>LR</b>	-
Peso Volume <b>γ</b>	<b>X</b>	Compress. <b>ELL</b>	-	Sostanza Organica <b>SO</b>	-
Peso Specifico <b>Gs</b>	-	Edometria <b>Ed</b>	-	Taglio torsionale ciclico <b>TTC</b>	-
Limiti Cons. <b>LL</b>	-	T. Diretto <b>TD</b>	<b>X</b>	Triassiale <b>TXCD</b>	-



Committente Tecna Srl  
Cantiere Molazzana (LU)

Data prova 11/11/2019  
Data certificato 22/11/2019  
Verb. Accettazione 034  
N. Certificato 438/2019

Sondaggio 1 Campione 1 Profondità (m) 14,00-14,50

### CONTENUTO D'ACQUA ALLO STATO NATURALE

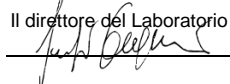
Numero Prova	1	2	3
P <sub>T</sub> - Massa Contenitore (g)	17,66	17,48	17,54
P <sub>1</sub> - Massa Campione Umido + Contenitore (g)	70,26	94,81	70,99
P <sub>2</sub> - Massa Campione Secco + Contenitore (g)	63,60	85,97	64,29
W - Contenuto d'Acqua %	14,5	12,9	14,3
Valore medio %	13,9		

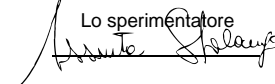
#### Procedimento di calcolo

$$W = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_2 - P_T)} \cdot 100$$

Norme di riferimento:  
ASTM D2216  
BS 1377 : Part 2 : 1990  
ISO 17892-1

Note:

Il direttore del Laboratorio  


Lo sperimentatore  




Committente Tecna Srl  
Cantiere Molazzana (LU)

Data prova 11/11/2019  
Data certificato 22/11/2019  
Verb. Accettazione 034  
N. Certificato 439/2019

Sondaggio 1 Campione 1 Profondità (m) 14,00-14,50

### PESO DELL'UNITÀ DI VOLUME

Numero Prova	1	2	3
P - Massa Terra Umida + Fustella (g)	216,59	214,84	216,78
P <sub>T</sub> - Massa Fustella (g)	62,63	62,63	62,63
P <sub>n</sub> - Massa Terra Umida (g)	153,96	152,21	154,15
V <sub>m</sub> - Volume Fustella (cm <sup>3</sup> )	72,00	72,00	72,00
γ <sub>n</sub> - Peso di Volume (g/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,11	2,14
γ <sub>n</sub> - Peso di Volume (kN/m <sup>3</sup> )	21,0	20,7	21,0
Valore medio γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,13		
Valore medio γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	20,9		

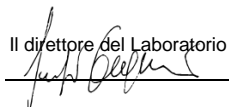
### Procedimento di calcolo

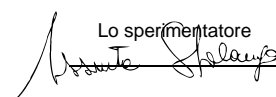
$$\gamma_n (g / cm^3) = \frac{P_n}{V_m}$$

$$\gamma_n (kN / m^3) = \frac{P_n}{V_m} \cdot 9,81$$

Norme di riferimento:  
BS 1377 : Part 2 : 1990  
ISO 17892-2

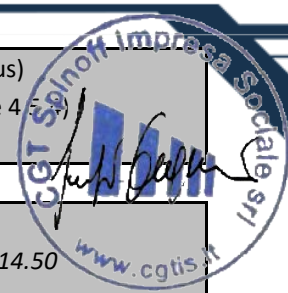
Note:

Il direttore del Laboratorio  


Lo sperimentatore  


DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.3)

### TEST REPORT - SUMMARY



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Toscana	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical
Sample description	Limo con sabbia argilloso debolmente ghiaioso		
Particle density (Mg/m <sup>3</sup> )	2,70 (Measured)		Specimens tested dry

INITIAL CONDITIONS	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Specimen depth (m)	14.00/14.20	14.00/14.20	14.00/14.20
Height (mm)	20,0	20,0	20,0
Length (mm)	60,0	60,0	60,0
Width (mm)	60,0	60,0	60,0
Area (mm <sup>2</sup> )	3600,0	3600,0	3600,0
Moisture content (measured) (%)	14	15	14
Moisture content (trimmings) (%)	14	13	14
Bulk density (Mg/m <sup>3</sup> )	2,14	2,11	2,14
Dry density (Mg/m <sup>3</sup> )	1,87	1,84	1,87
Voids ratio	0,441	0,468	0,444
Degree of saturation (%)	86	86	88

Voids ratio at the end of consolidation	0,380	0,388	0,245
---	-------	-------	-------

SHEARING			
Rate of displacement (mm/min)	0,412123	0,667392	0,539518
<b>Conditions at peak shear stress</b>			
Normal stress (kPa)	100	200	401
Shear stress (kPa)	78	122	245
Horizontal displacement (mm)	3,63	4,11	3,68
Vertical deformation (mm)	0,179	0,459	0,573

--

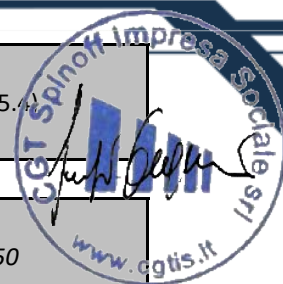
Comments / variations from procedures:  
*Strumento utilizzato: Taglio N° 4.*  
*Verbale di accettazione N. 034*  
*Il presente certificato è costituito da 17 pagine.*

Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	22/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019

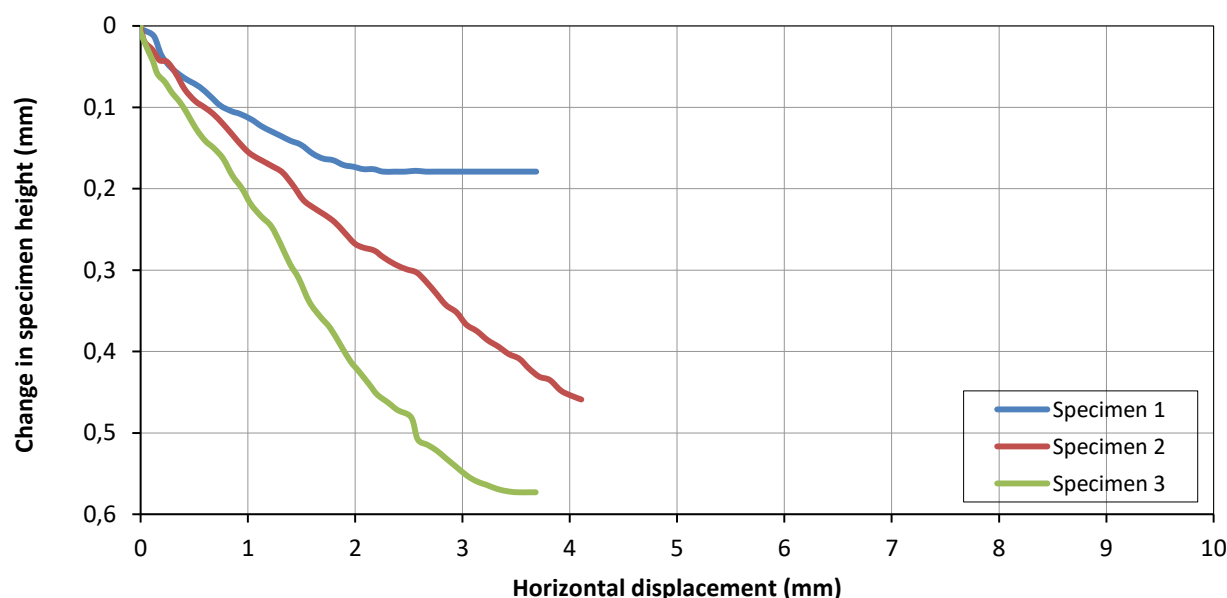
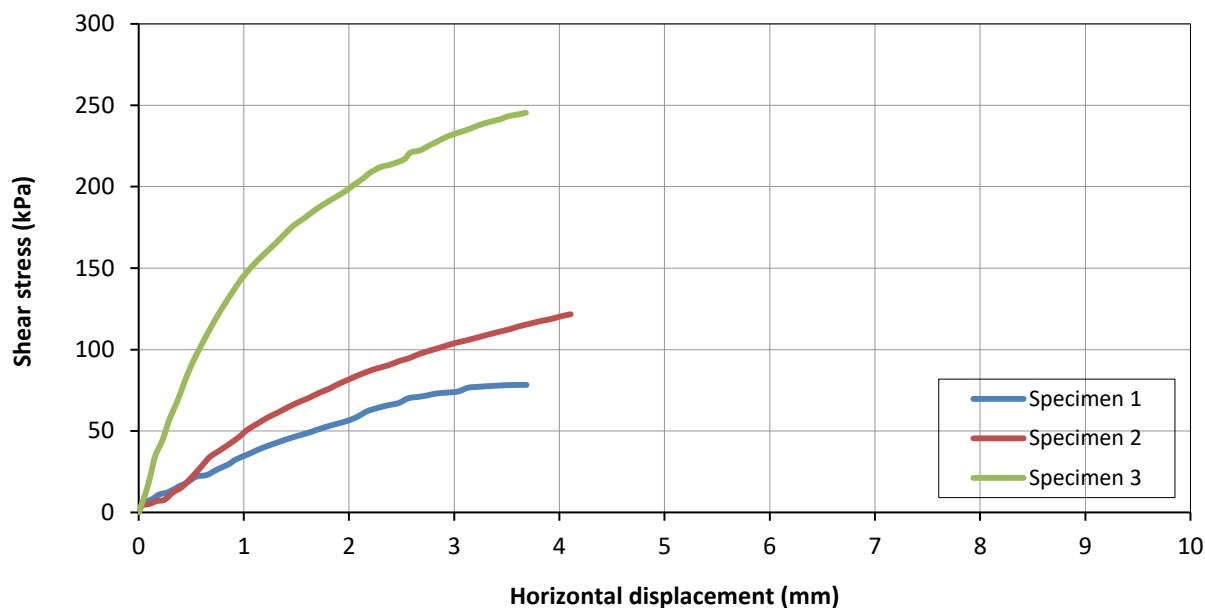


DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

### TEST REPORT - SHEARING



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical



Tested Date	Checked Date	Dott.ssa Sfalanga	Approved Date	Prof. Carmignani
	22/11/2019			Cert. N. 442/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**



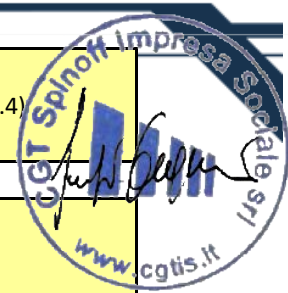
Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Toscana</i>	Sample depth (m)	<i>14.00/14.50</i>
Borehole number	<i>1</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

<b>SPECIMEN 1</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>100</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,05	0,028	0,2	0,028
0,08	0,235	0,3	0,235
0,13	0,613	0,4	0,613
0,20	0,650	0,4	0,650
0,32	0,664	0,6	0,664
0,51	0,690	0,7	0,690
0,81	0,703	0,9	0,703
1,29	0,722	1,1	0,722
2,05	0,732	1,4	0,732
3,25	0,748	1,8	0,748
5,17	0,765	2,3	0,765
8,21	0,780	2,9	0,780
13,06	0,789	3,6	0,789
20,76	0,798	4,6	0,798
33,00	0,802	5,7	0,802
52,47	0,806	7,2	0,806
83,43	0,811	9,1	0,811
132,66	0,814	11,5	0,814
210,92	0,819	14,5	0,819
335,36	0,822	18,3	0,822
533,23	0,825	23,1	0,825
847,83	0,832	29,1	0,832
1058,89	0,836	32,5	0,836

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

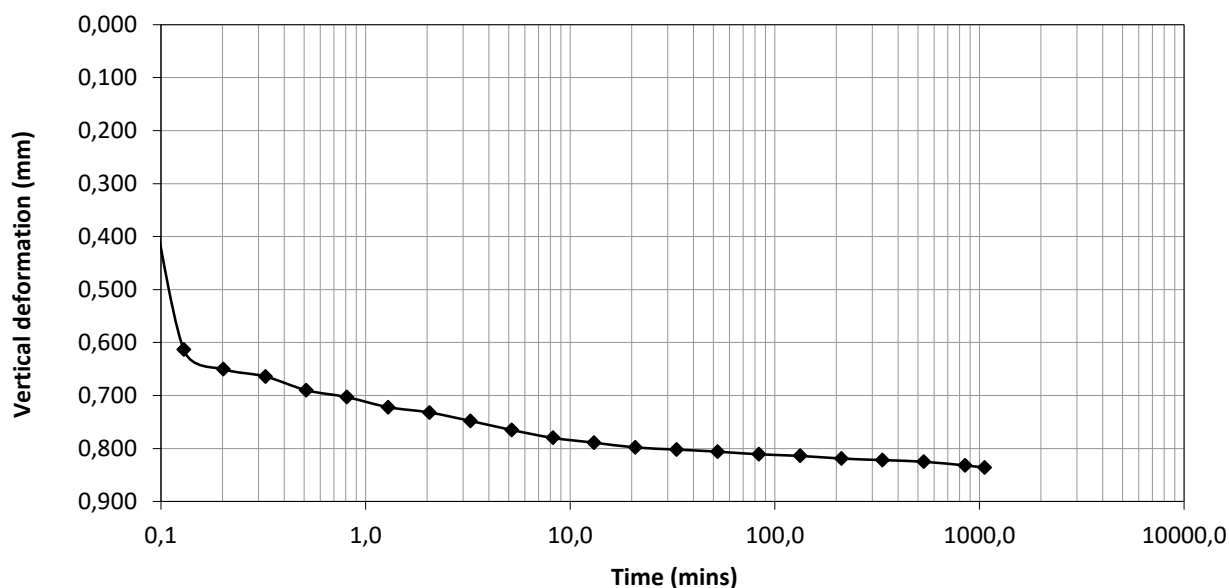
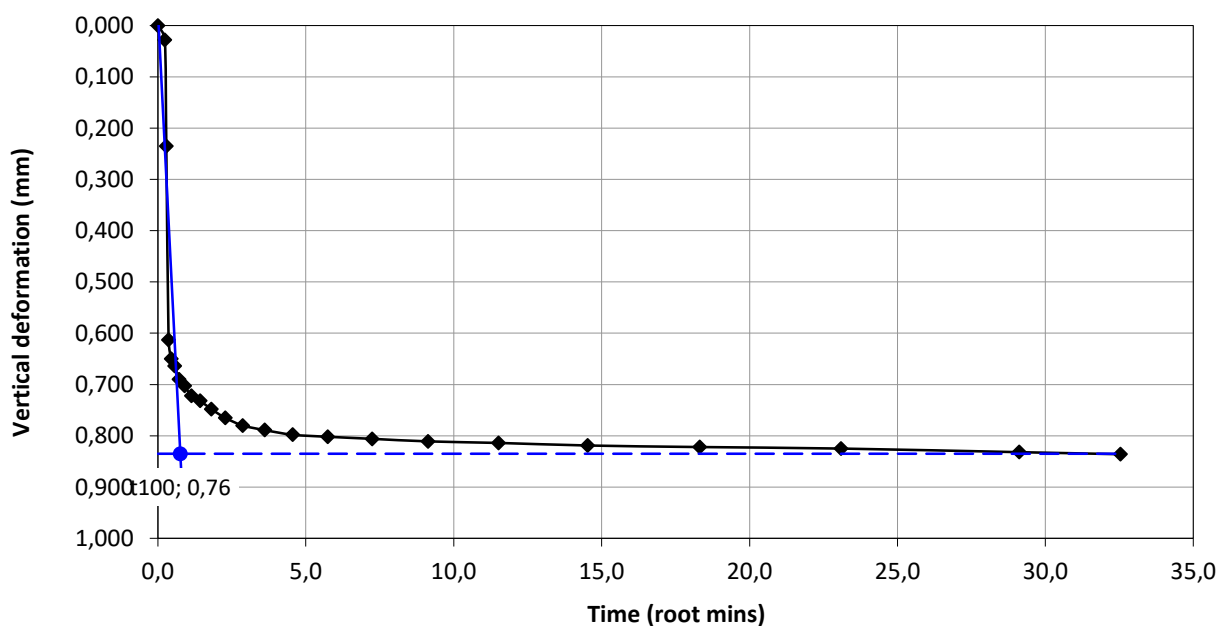
### TEST DATA - CONSOLIDATION



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

### SPECIMEN 1

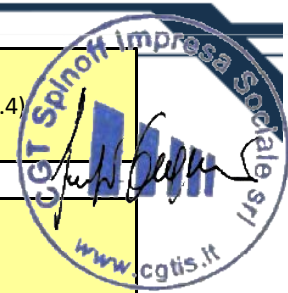
Normal stress (kPa) 100



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	11/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 1</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>100</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
0,01	0,002	-0,01	0,3	0,002	-0,01	0,3	0,1
10,00	0,005	0,03	15,4	0,005	0,03	15,4	4,3
20,00	0,006	0,04	21,3	0,006	0,04	21,3	5,9
30,00	0,013	0,13	29,2	0,013	0,13	29,2	8,1
40,00	0,036	0,19	39,4	0,036	0,19	39,4	10,9
50,00	0,051	0,28	44,9	0,051	0,28	44,9	12,5
60,00	0,062	0,39	57,8	0,062	0,39	57,8	16,1
70,00	0,068	0,46	65,9	0,068	0,46	65,9	18,3
80,00	0,075	0,55	79,4	0,075	0,55	79,4	22,1
90,00	0,086	0,65	82,6	0,086	0,65	82,6	22,9
100,00	0,098	0,74	94,7	0,098	0,74	94,7	26,3
110,00	0,105	0,85	105,9	0,105	0,85	105,9	29,4
120,00	0,108	0,92	117,1	0,108	0,92	117,1	32,5
130,00	0,115	1,03	127,9	0,115	1,03	127,9	35,5
140,00	0,123	1,12	137,3	0,123	1,12	137,3	38,1
150,00	0,129	1,21	145,7	0,129	1,21	145,7	40,5
160,00	0,135	1,30	153,3	0,135	1,30	153,3	42,6
170,00	0,141	1,40	160,8	0,141	1,40	160,8	44,7
180,00	0,146	1,49	168,1	0,146	1,49	168,1	46,7
190,00	0,157	1,61	175,5	0,157	1,61	175,5	48,8
200,00	0,163	1,70	182,9	0,163	1,70	182,9	50,8
210,00	0,165	1,79	189,9	0,165	1,79	189,9	52,8
220,00	0,171	1,89	196,5	0,171	1,89	196,5	54,6
230,00	0,173	1,98	202,3	0,173	1,98	202,3	56,2
240,00	0,176	2,08	211,1	0,176	2,08	211,1	58,6
250,00	0,176	2,17	223,6	0,176	2,17	223,6	62,1
260,00	0,179	2,26	230,1	0,179	2,26	230,1	63,9
270,00	0,179	2,37	236,8	0,179	2,37	236,8	65,8
280,00	0,179	2,47	241,7	0,179	2,47	241,7	67,1
290,00	0,178	2,56	252,3	0,178	2,56	252,3	70,1
300,00	0,179	2,65	255,3	0,179	2,65	255,3	70,9
310,00	0,179	2,74	258,5	0,179	2,74	258,5	71,8
320,00	0,179	2,84	263,2	0,179	2,84	263,2	73,1
330,00	0,179	2,95	265,1	0,179	2,95	265,1	73,6

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Tc</i>	Sample depth (m)	<i>14.00/14.50</i>
Borehole number	<i>1</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

<b>SPECIMEN 1</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>100</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
340,00	0,179	3,04	267,6	0,179	3,04	267,6	74,3
350,00	0,179	3,13	275,7	0,179	3,13	275,7	76,6
360,00	0,179	3,23	277,8	0,179	3,23	277,8	77,2
370,00	0,179	3,34	279,3	0,179	3,34	279,3	77,6
380,00	0,179	3,43	280,6	0,179	3,43	280,6	77,9
390,00	0,179	3,54	281,6	0,179	3,54	281,6	78,2
400,00	0,179	3,63	281,9	0,179	3,63	281,9	78,3
406,70	0,179	3,69	281,8	0,179	3,69	281,8	78,3

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

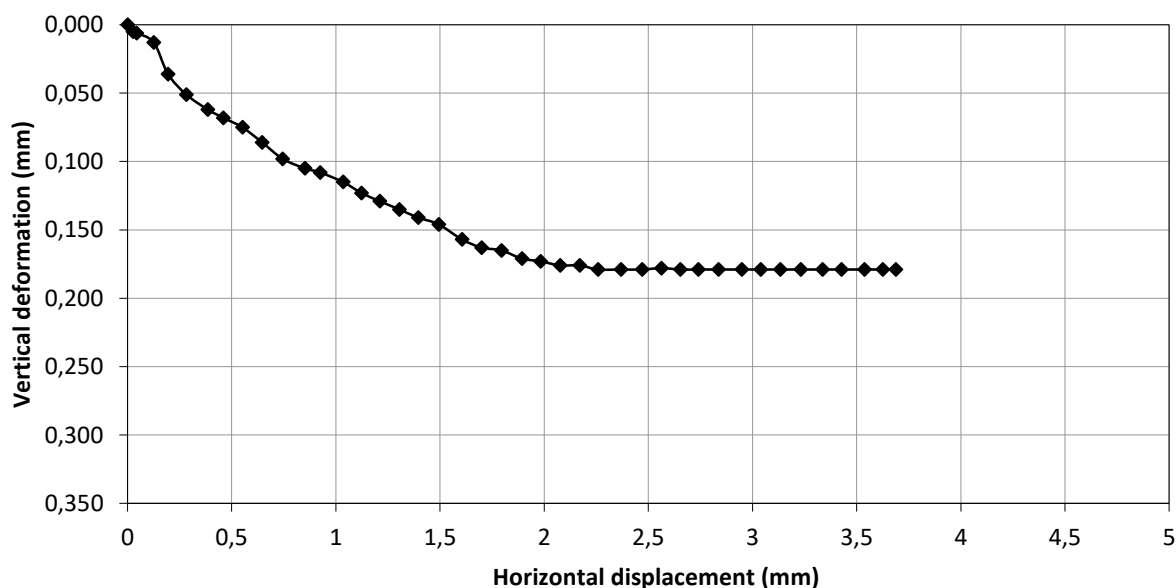
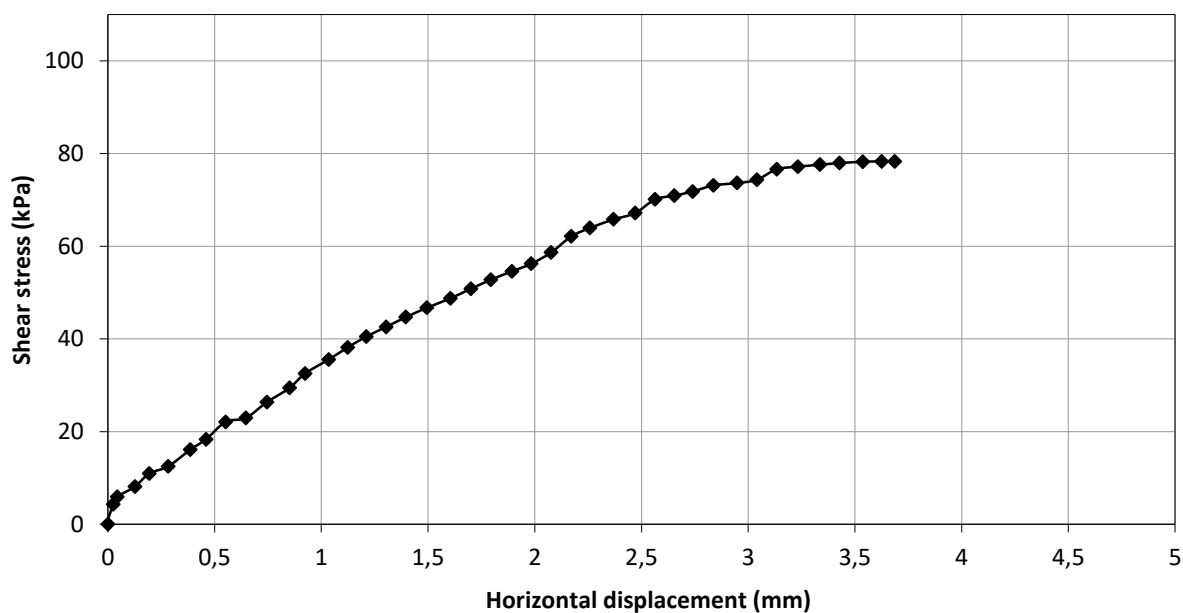
### TEST DATA - SHEARING



Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Tc</i>	Sample depth (m)	<i>14.00/14.50</i>
Borehole number	<i>1</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

### SPECIMEN 1

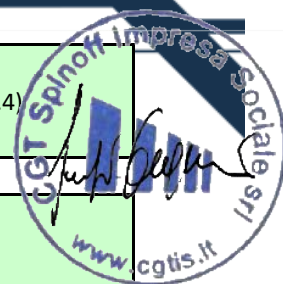
Normal stress (kPa) **100**



Tested	Checked	<i>Dott.ssa Sfalanga</i>	Approved	<i>Prof. Carmignani</i>
Date	Date	<i>11/11/2019</i>	Date	<i>Cert. N. 442/2019</i>

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**

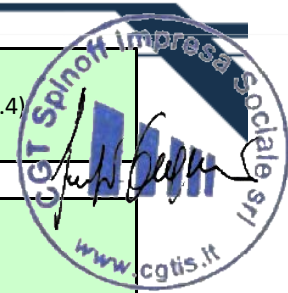


Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 2</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>200</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,05	0,785	0,2	0,785
0,08	0,907	0,3	0,907
0,13	0,923	0,4	0,923
0,21	0,947	0,5	0,947
0,32	0,976	0,6	0,976
0,51	0,989	0,7	0,989
0,81	1,000	0,9	1,000
1,29	1,021	1,1	1,021
2,04	1,040	1,4	1,040
3,25	1,047	1,8	1,047
5,16	1,053	2,3	1,053
8,21	1,057	2,9	1,057
13,05	1,064	3,6	1,064
20,76	1,068	4,6	1,068
33,00	1,071	5,7	1,071
52,47	1,074	7,2	1,074
83,43	1,079	9,1	1,079
132,66	1,084	11,5	1,084
210,92	1,084	14,5	1,084
335,37	1,091	18,3	1,091
533,23	1,090	23,1	1,090
847,83	1,089	29,1	1,089
961,47	1,089	31,0	1,089





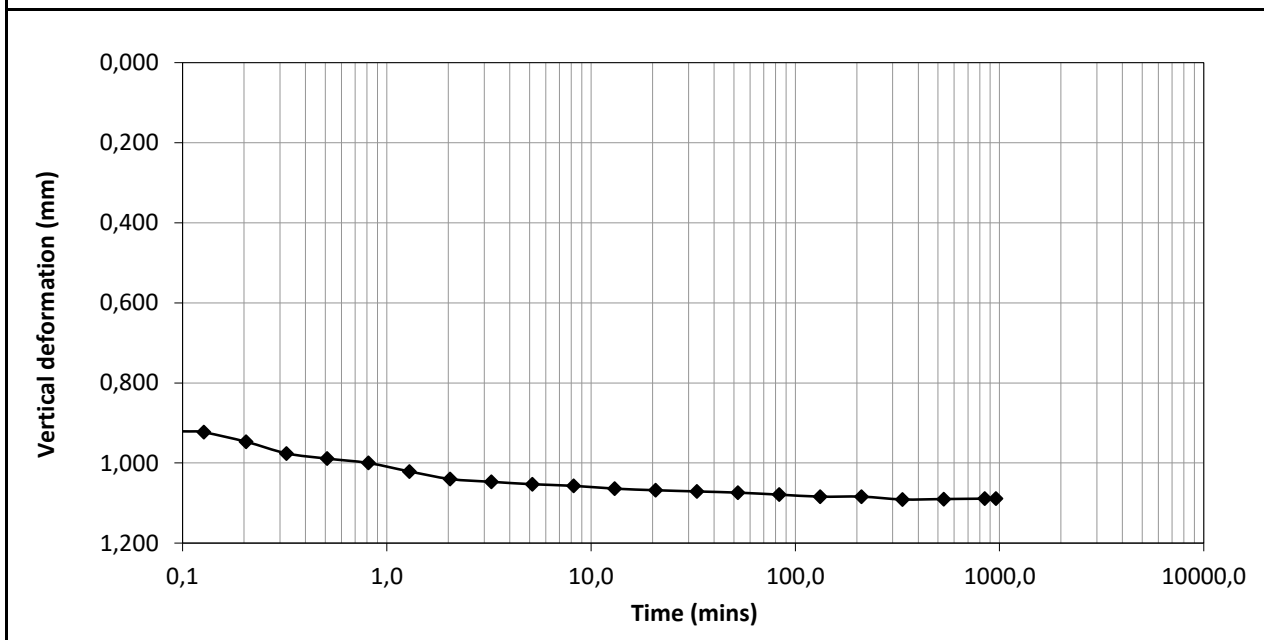
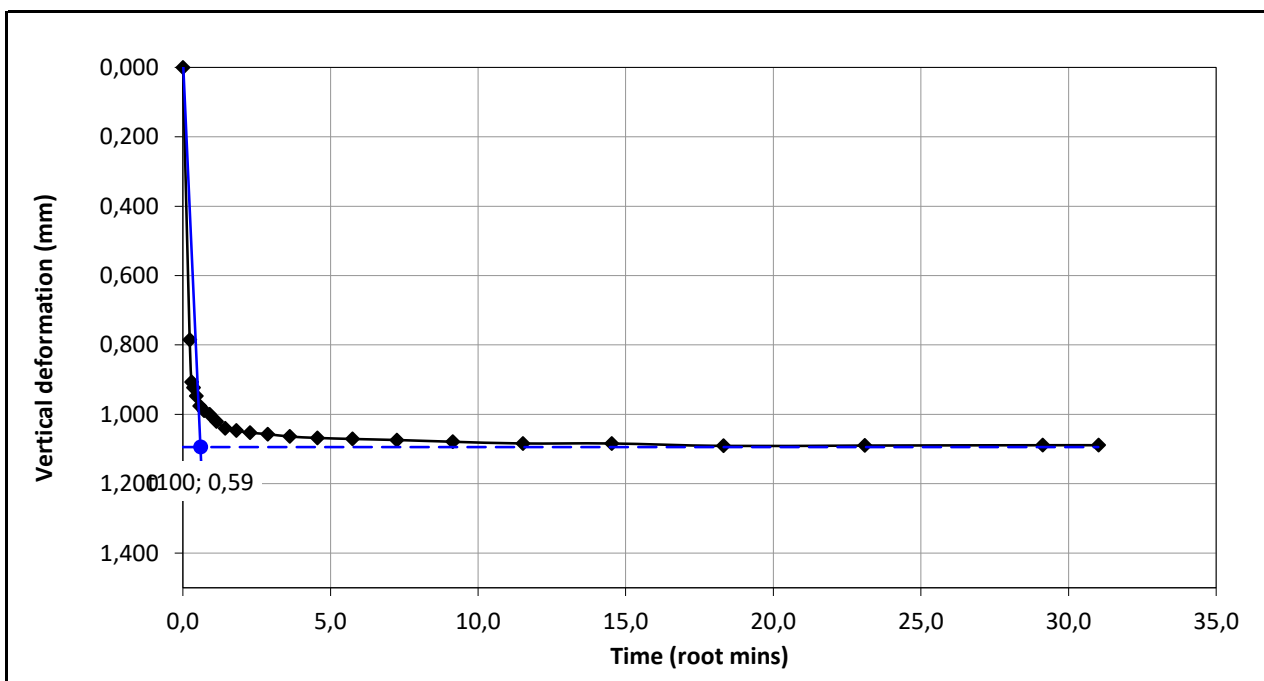
DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**

Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 2**

Normal stress (kPa) **200**

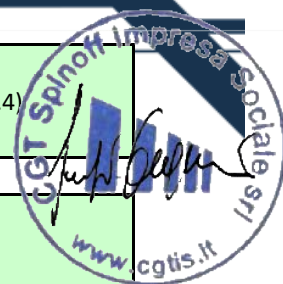


Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	12/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



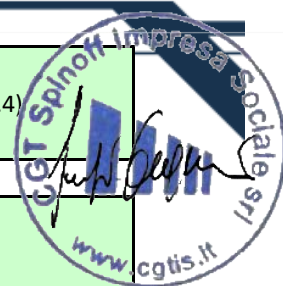
Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 2</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>200</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
0,02	0,000	0,00	0,9	0,000	0,00	0,9	0,2
10,00	0,019	0,04	15,2	0,019	0,04	15,2	4,2
20,00	0,029	0,11	19,2	0,029	0,11	19,2	5,3
30,00	0,042	0,18	25,3	0,042	0,18	25,3	7,0
40,00	0,044	0,25	28,1	0,044	0,25	28,1	7,8
50,00	0,058	0,33	44,2	0,058	0,33	44,2	12,3
60,00	0,078	0,41	56,3	0,078	0,41	56,3	15,6
70,00	0,092	0,51	78,1	0,092	0,51	78,1	21,7
80,00	0,100	0,60	101,2	0,100	0,60	101,2	28,1
90,00	0,108	0,68	122,5	0,108	0,68	122,5	34,0
100,00	0,120	0,77	136,2	0,120	0,77	136,2	37,8
110,00	0,133	0,85	149,5	0,133	0,85	149,5	41,5
120,00	0,149	0,96	167,0	0,149	0,96	167,0	46,4
130,00	0,158	1,03	182,5	0,158	1,03	182,5	50,7
140,00	0,166	1,14	197,6	0,166	1,14	197,6	54,9
150,00	0,172	1,22	209,1	0,172	1,22	209,1	58,1
160,00	0,180	1,32	220,6	0,180	1,32	220,6	61,3
170,00	0,196	1,42	232,6	0,196	1,42	232,6	64,6
180,00	0,214	1,52	243,4	0,214	1,52	243,4	67,6
190,00	0,224	1,62	253,2	0,224	1,62	253,2	70,3
200,00	0,232	1,72	264,3	0,232	1,72	264,3	73,4
210,00	0,241	1,81	273,1	0,241	1,81	273,1	75,9
220,00	0,253	1,89	283,3	0,253	1,89	283,3	78,7
230,00	0,267	1,99	293,3	0,267	1,99	293,3	81,5
240,00	0,272	2,07	301,2	0,272	2,07	301,2	83,7
250,00	0,276	2,18	311,4	0,276	2,18	311,4	86,5
260,00	0,284	2,26	318,0	0,284	2,26	318,0	88,3
270,00	0,293	2,37	325,2	0,293	2,37	325,2	90,3
280,00	0,299	2,48	334,6	0,299	2,48	334,6	92,9
290,00	0,303	2,57	341,1	0,303	2,57	341,1	94,8
300,00	0,314	2,66	349,5	0,314	2,66	349,5	97,1
310,00	0,328	2,75	356,3	0,328	2,75	356,3	99,0
320,00	0,343	2,85	363,0	0,343	2,85	363,0	100,8
330,00	0,352	2,95	370,1	0,352	2,95	370,1	102,8

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



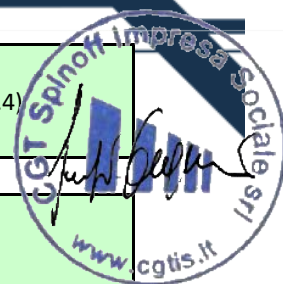
Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 2</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>200</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
340,00	0,367	3,04	376,0	0,367	3,04	376,0	104,4
350,00	0,375	3,13	381,3	0,375	3,13	381,3	105,9
360,00	0,386	3,23	387,5	0,386	3,23	387,5	107,6
370,00	0,394	3,33	393,8	0,394	3,33	393,8	109,4
380,00	0,403	3,43	399,4	0,403	3,43	399,4	110,9
390,00	0,409	3,53	405,2	0,409	3,53	405,2	112,6
400,00	0,421	3,62	411,6	0,421	3,62	411,6	114,3
410,00	0,431	3,72	417,0	0,431	3,72	417,0	115,8
420,00	0,435	3,81	422,6	0,435	3,81	422,6	117,4
430,00	0,448	3,92	427,3	0,448	3,92	427,3	118,7
440,00	0,454	4,01	433,1	0,454	4,01	433,1	120,3
450,00	0,459	4,11	438,1	0,459	4,11	438,1	121,7

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

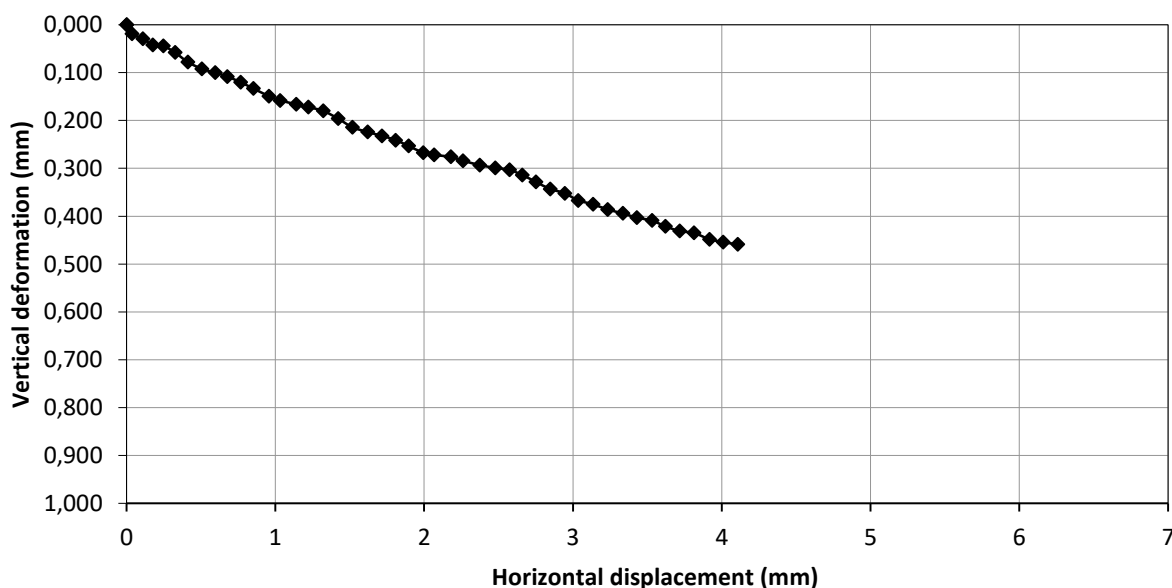
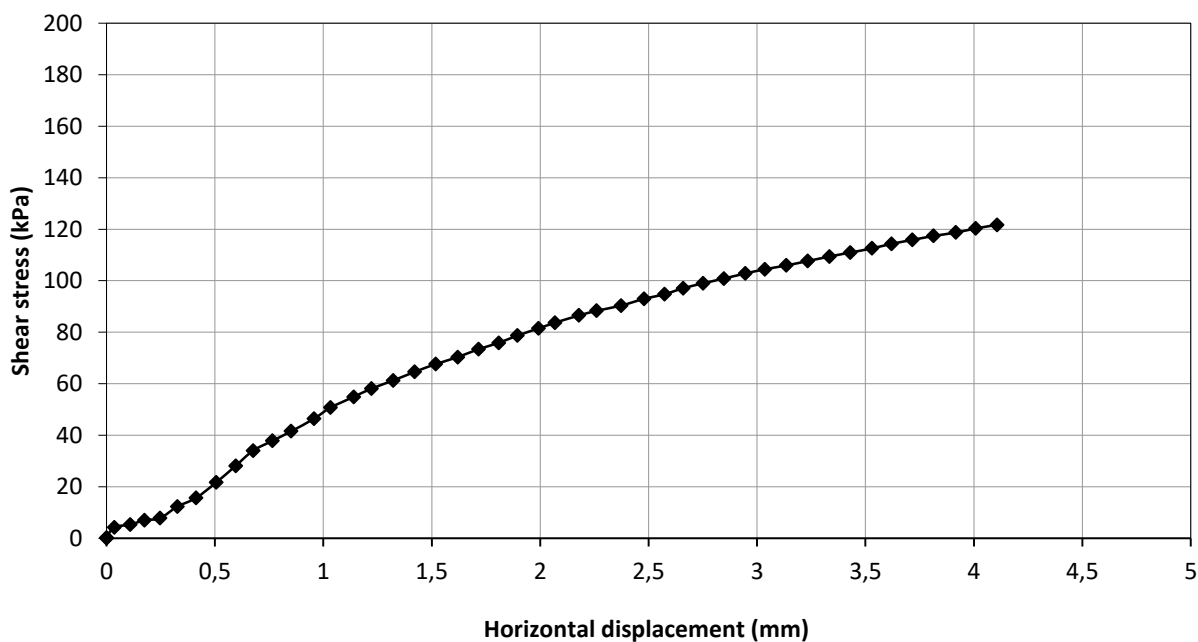
**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 2**

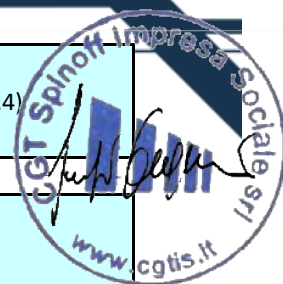
Normal stress (kPa) **200**



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	12/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**



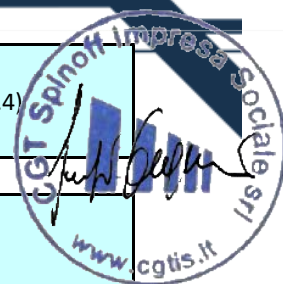
Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Tos</i>	Sample depth (m)	<i>14.00/14.50</i>
Borehole number	<i>1</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

<b>SPECIMEN 3</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>401</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,05	0,574	0,2	0,574
0,08	0,898	0,3	0,898
0,13	1,622	0,4	1,622
0,20	2,386	0,4	2,386
0,32	2,466	0,6	2,466
0,51	2,521	0,7	2,521
0,81	2,563	0,9	2,563
1,29	2,592	1,1	2,592
2,04	2,623	1,4	2,623
3,25	2,648	1,8	2,648
5,17	2,671	2,3	2,671
8,21	2,686	2,9	2,686
13,05	2,700	3,6	2,700
20,76	2,708	4,6	2,708
33,00	2,715	5,7	2,715
52,47	2,723	7,2	2,723
83,43	2,730	9,1	2,730
132,66	2,736	11,5	2,736
210,92	2,740	14,5	2,740
335,37	2,746	18,3	2,746
533,23	2,750	23,1	2,750
847,83	2,756	29,1	2,756
980,95	2,756	31,3	2,756

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

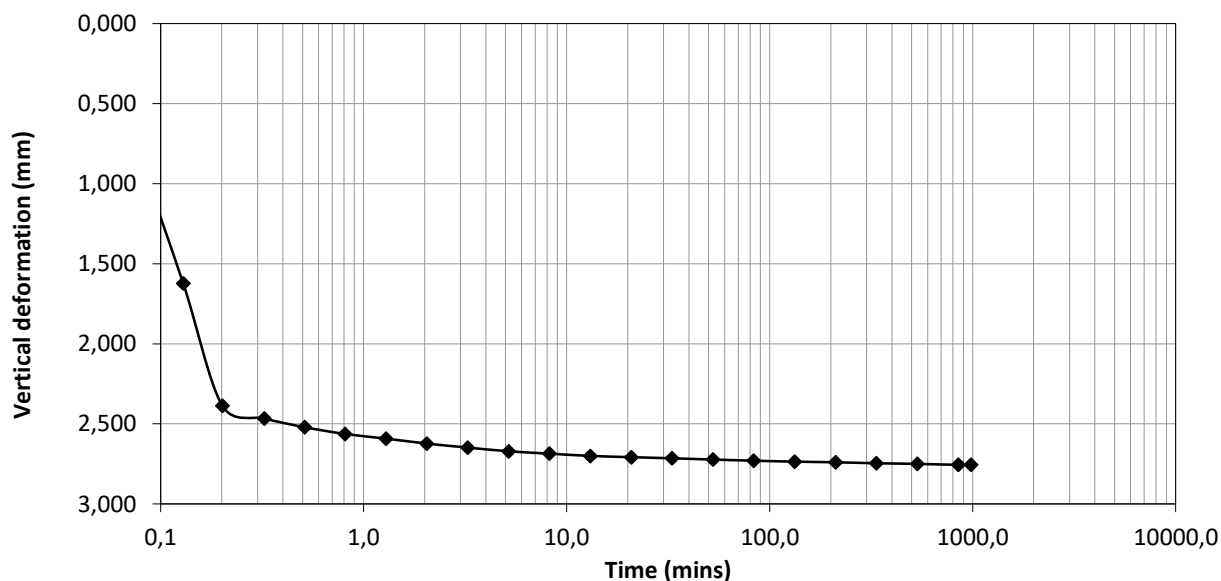
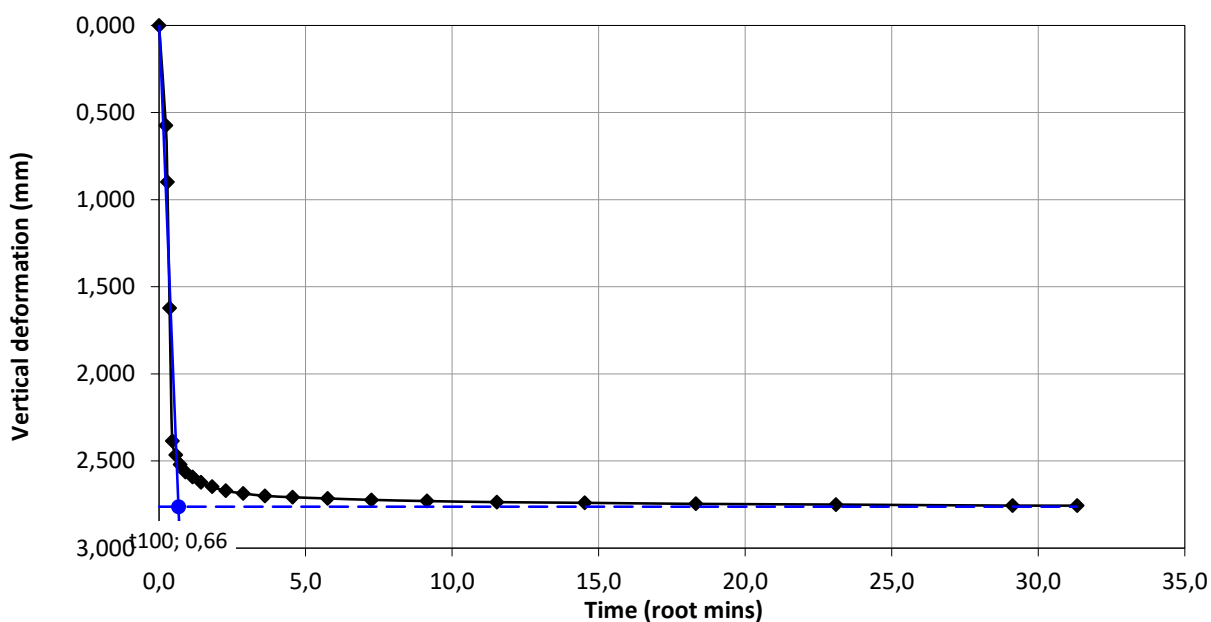
### TEST DATA - CONSOLIDATION



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

### SPECIMEN 3

Normal stress (kPa) 401



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	13/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**

Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos.	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical



**SPECIMEN 3** **Normal stress (kPa) 401**

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
0,02	0,007	0,00	-0,3	0,007	0,00	-0,3	-0,1
10,00	0,030	0,07	44,5	0,030	0,07	44,5	12,4
20,00	0,043	0,11	83,3	0,043	0,11	83,3	23,1
30,00	0,059	0,16	124,3	0,059	0,16	124,3	34,5
40,00	0,069	0,23	160,3	0,069	0,23	160,3	44,5
50,00	0,082	0,29	205,3	0,082	0,29	205,3	57,0
60,00	0,094	0,37	245,9	0,094	0,37	245,9	68,3
70,00	0,108	0,44	288,6	0,108	0,44	288,6	80,2
80,00	0,126	0,52	332,5	0,126	0,52	332,5	92,4
90,00	0,141	0,60	371,8	0,141	0,60	371,8	103,3
100,00	0,150	0,68	406,7	0,150	0,68	406,7	113,0
110,00	0,163	0,77	442,6	0,163	0,77	442,6	122,9
120,00	0,184	0,86	474,3	0,184	0,86	474,3	131,8
130,00	0,200	0,95	506,2	0,200	0,95	506,2	140,6
140,00	0,219	1,03	530,9	0,219	1,03	530,9	147,5
150,00	0,234	1,12	555,3	0,234	1,12	555,3	154,3
160,00	0,246	1,22	576,4	0,246	1,22	576,4	160,1
170,00	0,267	1,30	594,7	0,267	1,30	594,7	165,2
180,00	0,292	1,39	615,6	0,292	1,39	615,6	171,0
190,00	0,310	1,47	634,2	0,310	1,47	634,2	176,2
200,00	0,339	1,57	650,1	0,339	1,57	650,1	180,6
210,00	0,357	1,67	667,9	0,357	1,67	667,9	185,5
220,00	0,371	1,77	682,0	0,371	1,77	682,0	189,4
230,00	0,392	1,86	695,9	0,392	1,86	695,9	193,3
240,00	0,412	1,96	708,6	0,412	1,96	708,6	196,8
250,00	0,425	2,04	722,9	0,425	2,04	722,9	200,8
260,00	0,441	2,13	738,4	0,441	2,13	738,4	205,1
270,00	0,453	2,21	751,7	0,453	2,21	751,7	208,8
280,00	0,463	2,31	764,2	0,463	2,31	764,2	212,3
290,00	0,472	2,40	769,0	0,472	2,40	769,0	213,6
300,00	0,481	2,52	780,3	0,481	2,52	780,3	216,8
310,00	0,508	2,58	795,3	0,508	2,58	795,3	220,9
320,00	0,515	2,68	800,6	0,515	2,68	800,6	222,4
330,00	0,522	2,76	811,1	0,522	2,76	811,1	225,3



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 3</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>401</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
340,00	0,531	2,84	820,3	0,531	2,84	820,3	227,9
350,00	0,541	2,94	831,1	0,541	2,94	831,1	230,9
360,00	0,553	3,05	840,0	0,553	3,05	840,0	233,3
370,00	0,560	3,14	847,3	0,560	3,14	847,3	235,4
380,00	0,564	3,23	855,3	0,564	3,23	855,3	237,6
390,00	0,569	3,33	862,6	0,569	3,33	862,6	239,6
400,00	0,572	3,43	868,7	0,572	3,43	868,7	241,3
410,00	0,573	3,52	875,9	0,573	3,52	875,9	243,3
420,00	0,573	3,63	880,6	0,573	3,63	880,6	244,6
430,00	0,573	3,68	883,6	0,573	3,68	883,6	245,4

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

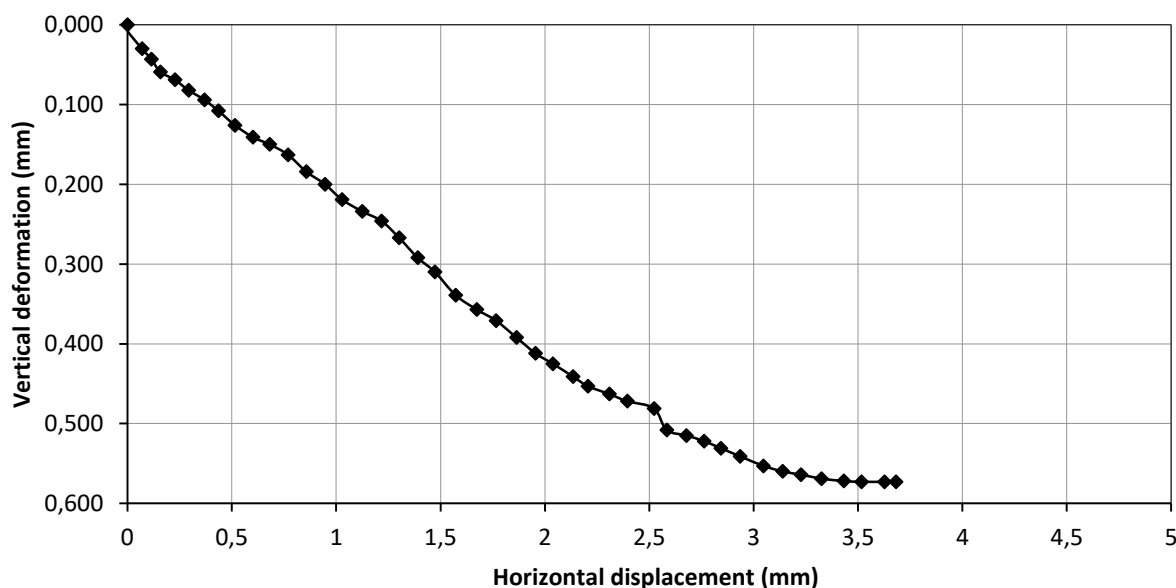
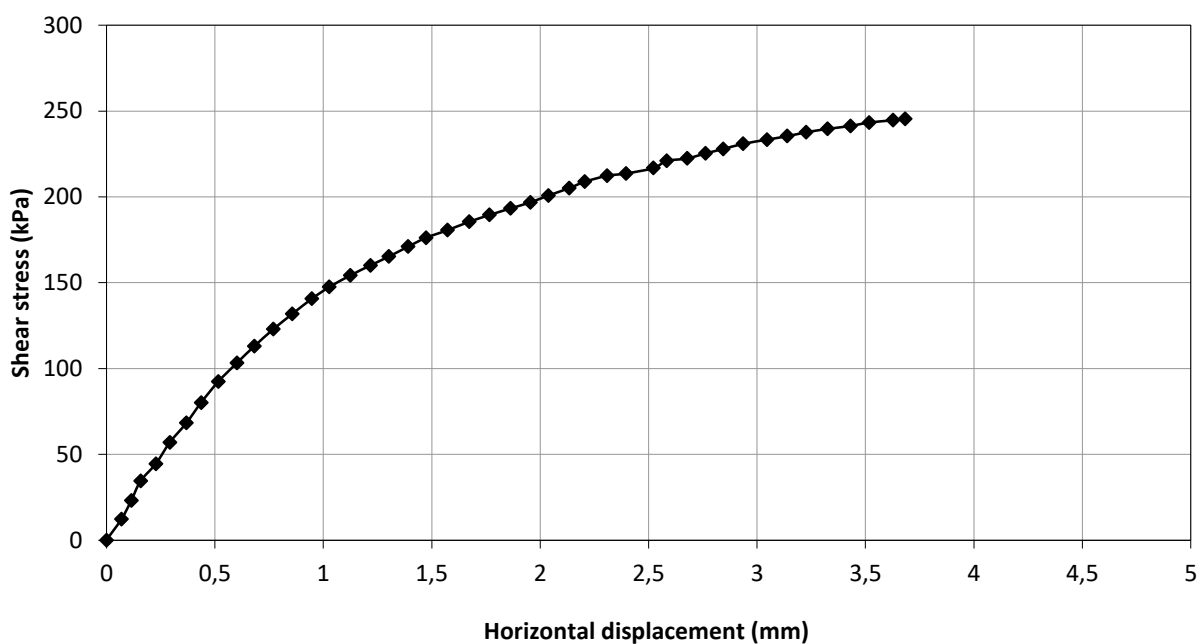
**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 3**

Normal stress (kPa) **401**



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	13/11/2019	Date	Cert. N. 442/2019

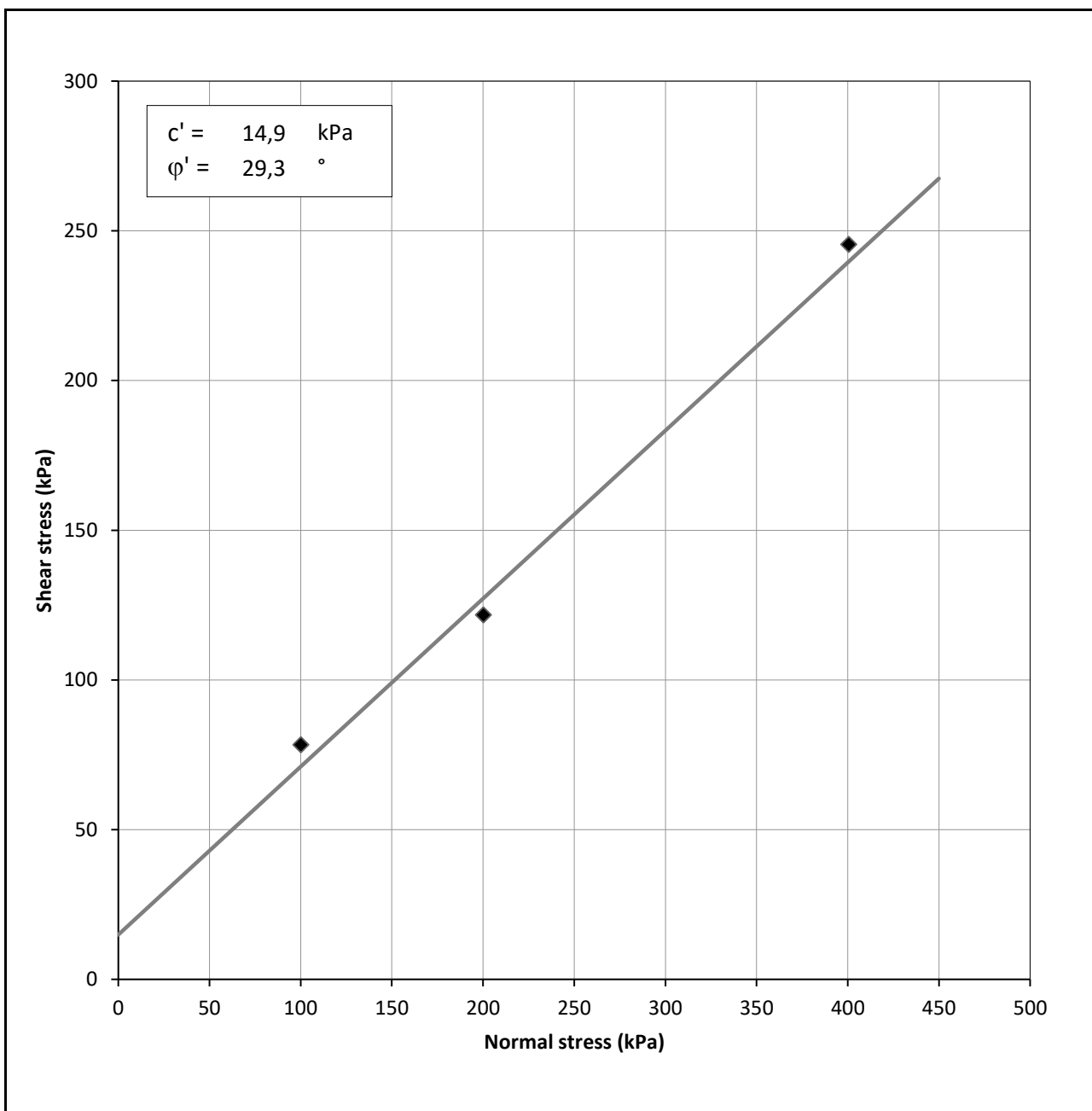


DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

### TEST REPORT - SHEARING

Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	14.00/14.50
Borehole number	1	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

### CONSULENZA DI LABORATORIO



Tested Date	Checked Date	Dott.ssa Sfalanga
	22/11/2019	

## DESCRIZIONE E RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA CAROTA ESTRUSA

**Committente:** Tecna Srl per Regione Toscana

**Cantiere/Località:** Molazzana (LU)

**Sondaggio:** 2

**Campione:** 1

**Profondità prelievo (m):** 7,00-7,40

**Data prelievo:** 08/10/2019

**Data apertura:** 11/11/2019

**Verbale accettazione n° 034**

**Descrizione:** Limo con sabbia argilloso ghiaioso (Raccomandazioni AGI 1977).  
Campione duro.

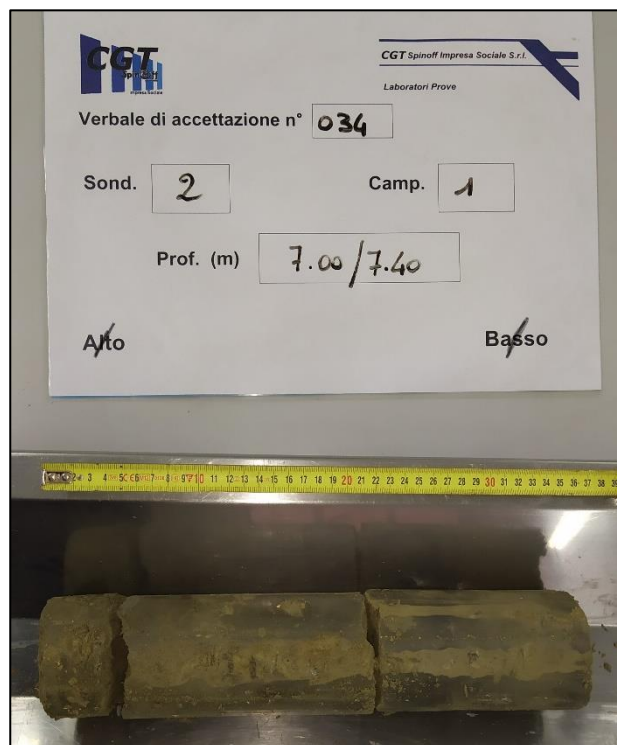
Colore: 2.5Y 5/6 – Light olive brown (Munsell Soil Color Chart)

### Pocket (kg/cm<sup>2</sup>):

	N.D.	F.S.	F.S.	N.D.	F.S.	F.S.	F.S.	
0	5	10	15	20	25	30	35	40

**Lunghezza carota: 37 cm**  
**Diametro carota: 88,9 mm**

PARAMETRI ALL'APERTURA	Valore
<b>W</b> - Contenuto naturale d'acqua (%)	14,4
<b>p<sub>w</sub></b> - Densità umida (g/cm <sup>3</sup> )	2,11
<b>p<sub>D</sub></b> - Densità secca (g/cm <sup>3</sup> )	1,84
<b>p<sub>sat</sub></b> - Densità satura (g/cm <sup>3</sup> )	2,15
<b>Ø</b> - Porosità (adim.)	0,31
<b>e</b> - Indice dei vuoti (adim.)	0,45
<b>S<sub>r</sub></b> - Grado di saturazione (%)	85



**Modalità di prelievo:** Sondaggio a rotazione

**Tipo di fustella:** Plastica

**Classe di qualità del campione:** Q4/Q5 (Raccomandazioni AGI 1977)  
C2/C1 (Eurocode 7)

### Prove eseguite:

Cont. Acqua <b>W</b>	<b>X</b>	Granulom. <b>Gr</b>	-	Limite di ritiro <b>LR</b>	-
Peso Volume <b>γ</b>	<b>X</b>	Compress. <b>ELL</b>	-	Sostanza Organica <b>SO</b>	-
Peso Specifico <b>Gs</b>	-	Edometria <b>Ed</b>	-	Taglio torsionale ciclico <b>TTC</b>	-
Limiti Cons. <b>LL</b>	-	T. Diretto <b>TD</b>	<b>X</b>	Triassiale <b>TXCD</b>	-



**Committente** Tecna Srl  
**Cantiere** Molazzana (LU)

**Data prova** 11/11/2019  
**Data certificato** 22/11/2019  
**Verb. Accettazione** 034  
**N. Certificato** 440/2019

**Sondaggio** 2 **Campione** 1 **Profondità (m)** 7,00-7,40

### CONTENUTO D'ACQUA ALLO STATO NATURALE

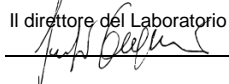
Numero Prova	1	2	3
P <sub>T</sub> - Massa Contenitore (g)	17,58	17,60	17,82
P <sub>1</sub> - Massa Campione Umido + Contenitore (g)	54,48	77,53	81,00
P <sub>2</sub> - Massa Campione Secco + Contenitore (g)	49,53	70,19	73,39
W - Contenuto d'Acqua %	15,5	14,0	13,7
<b>Valore medio %</b>	<b>14,4</b>		

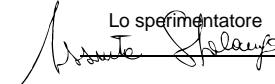
#### Procedimento di calcolo

$$W = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_2 - P_T)} \cdot 100$$

Norme di riferimento:  
ASTM D2216  
BS 1377 : Part 2 : 1990  
ISO 17892-1

Note:

Il direttore del Laboratorio  


Lo sperimentatore  




Committente Tecna Srl  
Cantiere Molazzana (LU)

Data prova 11/11/2019  
Data certificato 22/11/2019  
Verb. Accettazione 034  
N. Certificato 441/2019

Sondaggio 2 Campione 1 Profondità (m) 7,00-7,40

### PESO DELL'UNITÀ DI VOLUME

Numero Prova	1	2	3
P - Massa Terra Umida + Fustella (g)	214,04	213,94	214,66
P <sub>T</sub> - Massa Fustella (g)	62,63	62,63	62,63
P <sub>n</sub> - Massa Terra Umida (g)	151,41	151,31	152,03
V <sub>m</sub> - Volume Fustella (cm <sup>3</sup> )	72,00	72,00	72,00
γ <sub>n</sub> - Peso di Volume (g/cm <sup>3</sup> )	2,10	2,10	2,11
γ <sub>n</sub> - Peso di Volume (kN/m <sup>3</sup> )	20,6	20,6	20,7
Valore medio γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,11		
Valore medio γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	20,7		

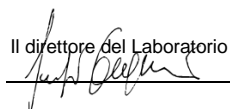
### Procedimento di calcolo

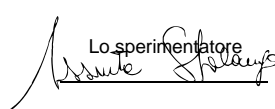
$$\gamma_n (g / cm^3) = \frac{P_n}{V_m}$$

$$\gamma_n (kN / m^3) = \frac{P_n}{V_m} \cdot 9,81$$

Norme di riferimento:  
BS 1377 : Part 2 : 1990  
ISO 17892-2

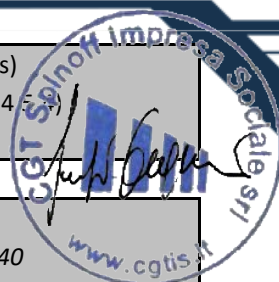
Note:

Il direttore del Laboratorio  


Lo sperimentatore  


DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.3)

### TEST REPORT - SUMMARY



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Toscana	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical
Sample description	Limo con sabbia argilloso ghiaioso		
Particle density (Mg/m <sup>3</sup> )	2.67 (Measured)	Specimens tested dry	

INITIAL CONDITIONS	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Specimen depth (m)	7.00/7.15	7.00/7.15	7.00/7.15
Height (mm)	20,0	20,0	20,0
Length (mm)	60,0	60,0	60,0
Width (mm)	60,0	60,0	60,0
Area (mm <sup>2</sup> )	3600,0	3600,0	3600,0
Moisture content (measured) (%)	15	17	15
Moisture content (trimmings) (%)	15	14	14
Bulk density (Mg/m <sup>3</sup> )	2,10	2,10	2,11
Dry density (Mg/m <sup>3</sup> )	1,82	1,80	1,83
Voids ratio	0,464	0,485	0,455
Degree of saturation (%)	88	93	89

Voids ratio at the end of consolidation	0,425	0,387	0,330
---	-------	-------	-------

SHEARING			
Rate of displacement (mm/min)	0,740412	1,198367	1,802571
<b>Conditions at peak shear stress</b>			
Normal stress (kPa)	101	200	401
Shear stress (kPa)	73	135	246
Horizontal displacement (mm)	1,94	2,78	3,57
Vertical deformation (mm)	0,205	0,365	0,733

--

Comments / variations from procedures:
Strumento utilizzato: taglio N° SH.
Verbale di accettazione N. 4.
Il presente certificato è costituito da 1 pagine.

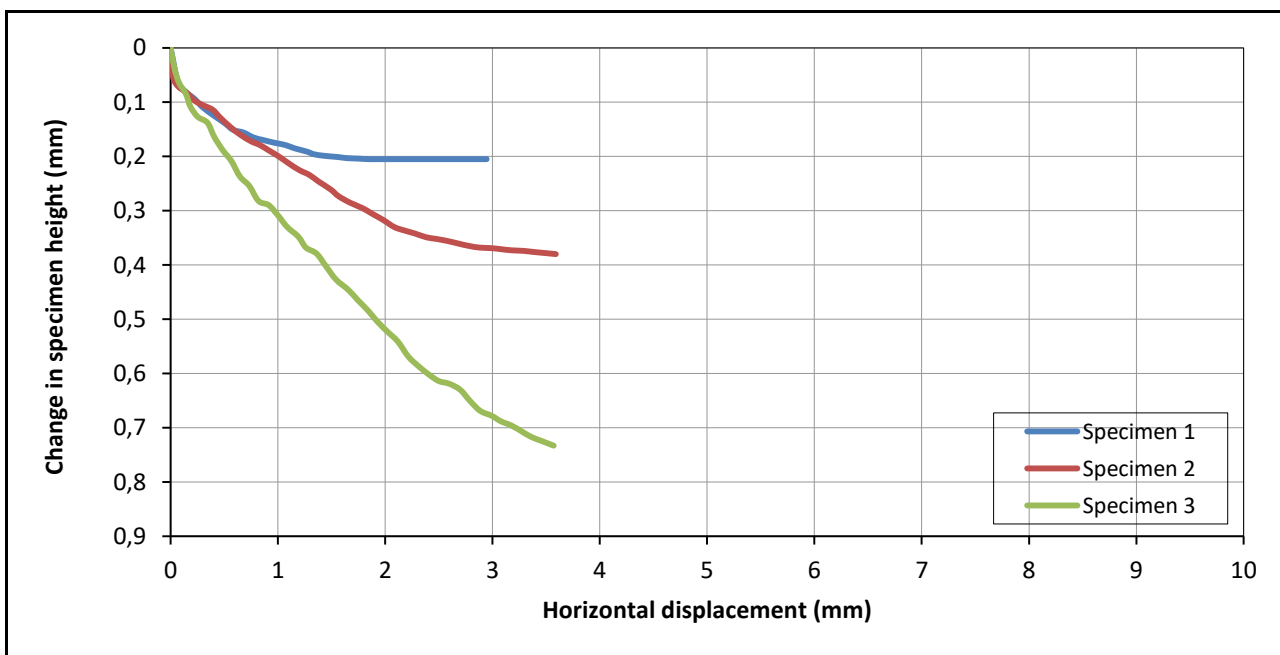
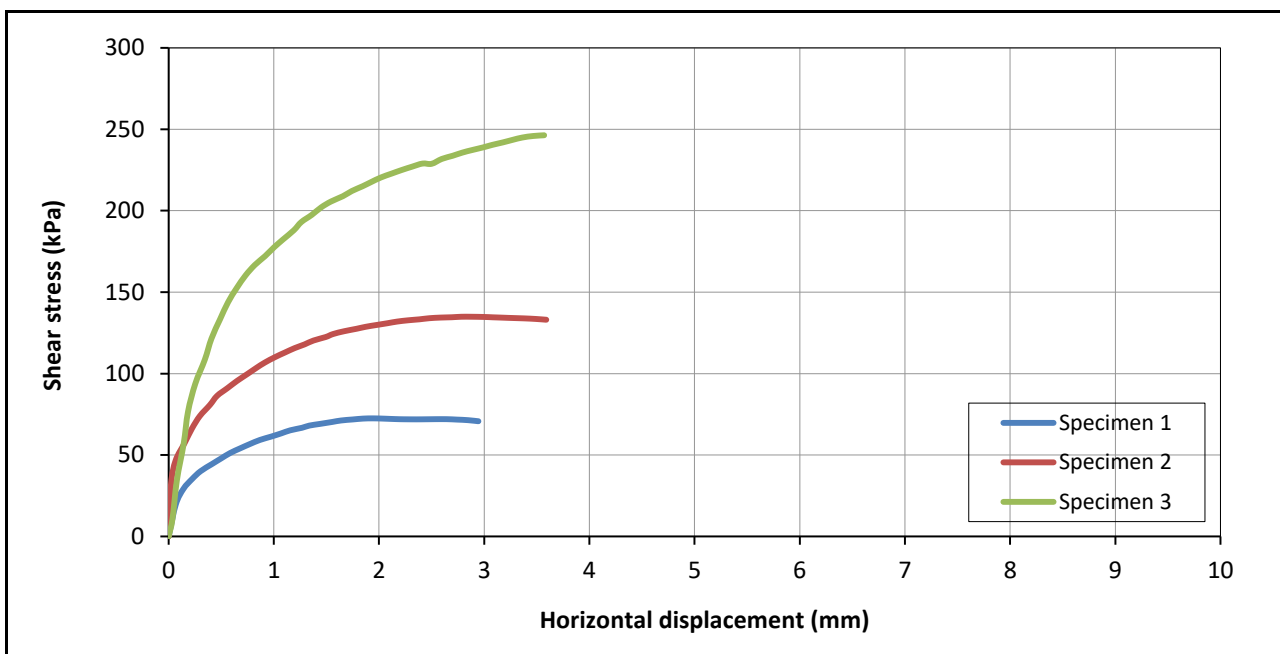
Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	22/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

### TEST REPORT - SHEARING



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical



Tested Date	Checked Date	Dott.ssa Sfalanga	Approved Date	Prof. Carmignani
	22/11/2019			Cert. N. 443/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**



Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Tos</i>	Sample depth (m)	<i>7.00/7.40</i>
Borehole number	<i>2</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

<b>SPECIMEN 1</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>101</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,07	0,380	0,3	0,380
0,12	0,396	0,3	0,396
0,20	0,403	0,4	0,403
0,32	0,411	0,6	0,411
0,50	0,420	0,7	0,420
0,80	0,428	0,9	0,428
1,28	0,435	1,1	0,435
2,03	0,443	1,4	0,443
3,23	0,466	1,8	0,466
5,15	0,478	2,3	0,478
8,20	0,487	2,9	0,487
13,05	0,492	3,6	0,492
20,75	0,498	4,6	0,498
33,00	0,506	5,7	0,506
52,47	0,518	7,2	0,518
83,42	0,520	9,1	0,520
132,65	0,523	11,5	0,523
210,92	0,526	14,5	0,526
335,35	0,528	18,3	0,528
533,22	0,532	23,1	0,532
847,82	0,533	29,1	0,533



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

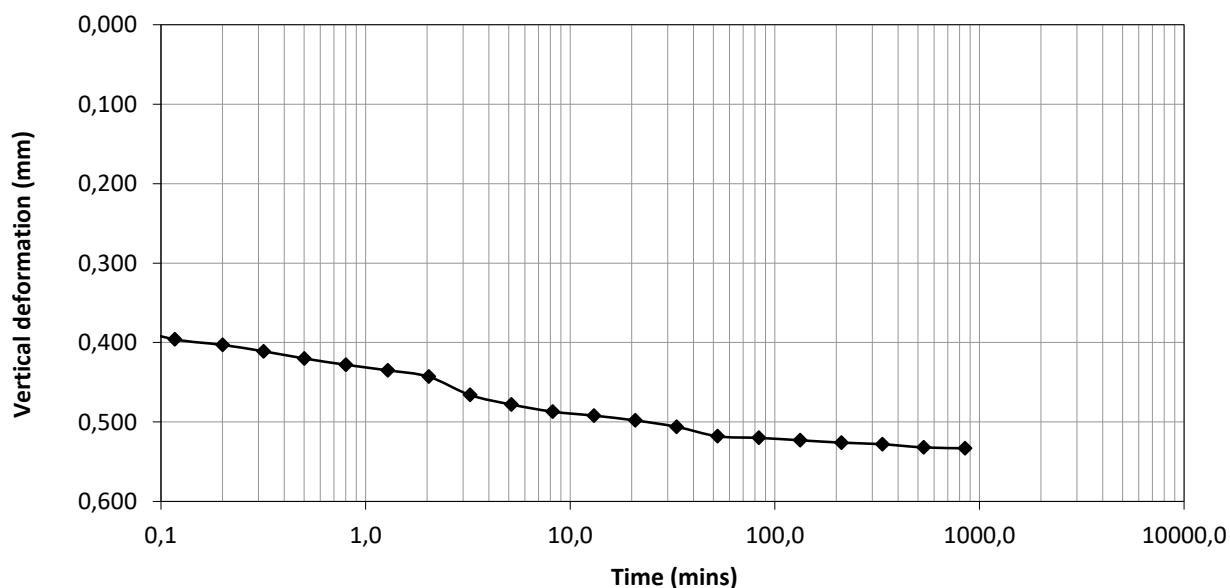
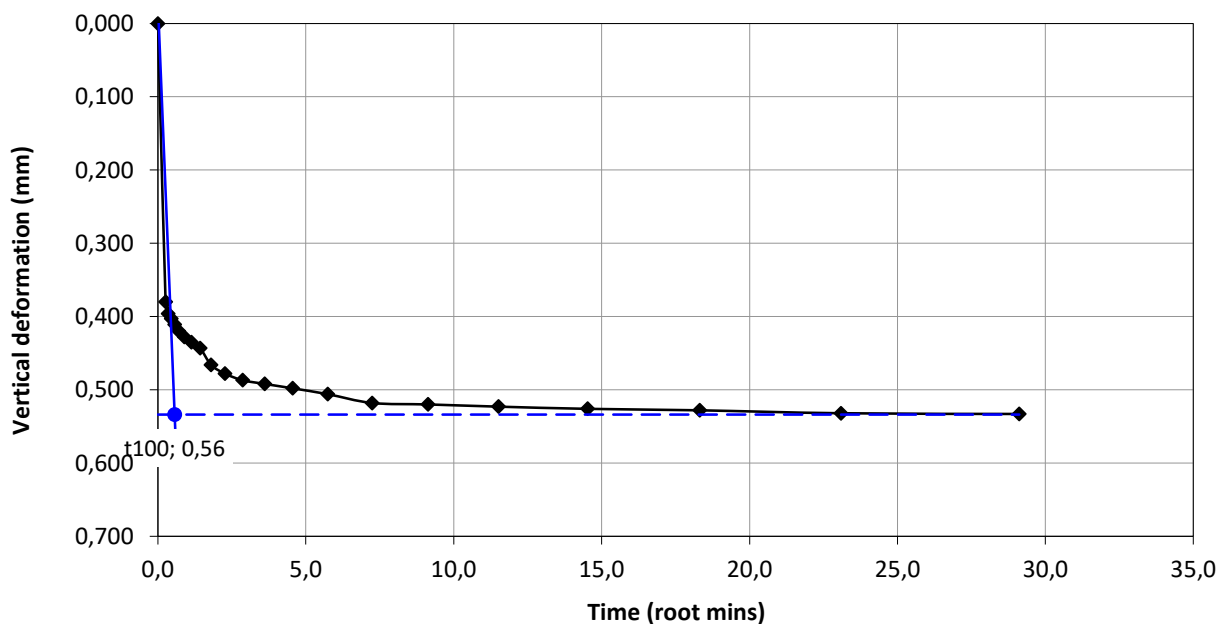
**TEST DATA - CONSOLIDATION**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 1**

Normal stress (kPa) **101**



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	11/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 1</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>101</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
9,98	0,063	0,07	70,8	0,063	0,07	70,8	19,7
19,97	0,081	0,14	105,3	0,081	0,14	105,3	29,3
29,97	0,094	0,22	126,9	0,094	0,22	126,9	35,3
39,95	0,110	0,30	144,1	0,110	0,30	144,1	40,0
49,93	0,126	0,41	160,0	0,126	0,41	160,0	44,4
59,93	0,138	0,50	172,6	0,138	0,50	172,6	47,9
69,92	0,151	0,58	184,3	0,151	0,58	184,3	51,2
79,92	0,156	0,68	194,7	0,156	0,68	194,7	54,1
89,90	0,165	0,77	204,2	0,165	0,77	204,2	56,7
99,88	0,170	0,87	213,2	0,170	0,87	213,2	59,2
109,88	0,175	0,97	220,6	0,175	0,97	220,6	61,3
119,87	0,179	1,07	227,8	0,179	1,07	227,8	63,3
129,87	0,185	1,16	234,5	0,185	1,16	234,5	65,1
139,85	0,191	1,27	240,2	0,191	1,27	240,2	66,7
149,85	0,196	1,34	245,0	0,196	1,34	245,0	68,1
159,83	0,199	1,44	248,8	0,199	1,44	248,8	69,1
169,82	0,201	1,56	253,1	0,201	1,56	253,1	70,3
179,82	0,203	1,64	256,3	0,203	1,64	256,3	71,2
189,80	0,204	1,75	258,6	0,204	1,75	258,6	71,8
199,78	0,205	1,85	260,5	0,205	1,85	260,5	72,4
209,78	0,205	1,94	261,0	0,205	1,94	261,0	72,5
219,77	0,205	2,04	260,4	0,205	2,04	260,4	72,3
229,77	0,205	2,16	259,4	0,205	2,16	259,4	72,1
239,75	0,205	2,24	259,0	0,205	2,24	259,0	71,9
249,75	0,205	2,35	258,8	0,205	2,35	258,8	71,9
259,73	0,205	2,45	259,0	0,205	2,45	259,0	71,9
269,72	0,205	2,54	259,2	0,205	2,54	259,2	72,0
279,72	0,205	2,64	259,2	0,205	2,64	259,2	72,0
289,70	0,205	2,74	258,3	0,205	2,74	258,3	71,8
299,70	0,205	2,85	257,0	0,205	2,85	257,0	71,4
309,68	0,205	2,95	254,6	0,205	2,95	254,6	70,7

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

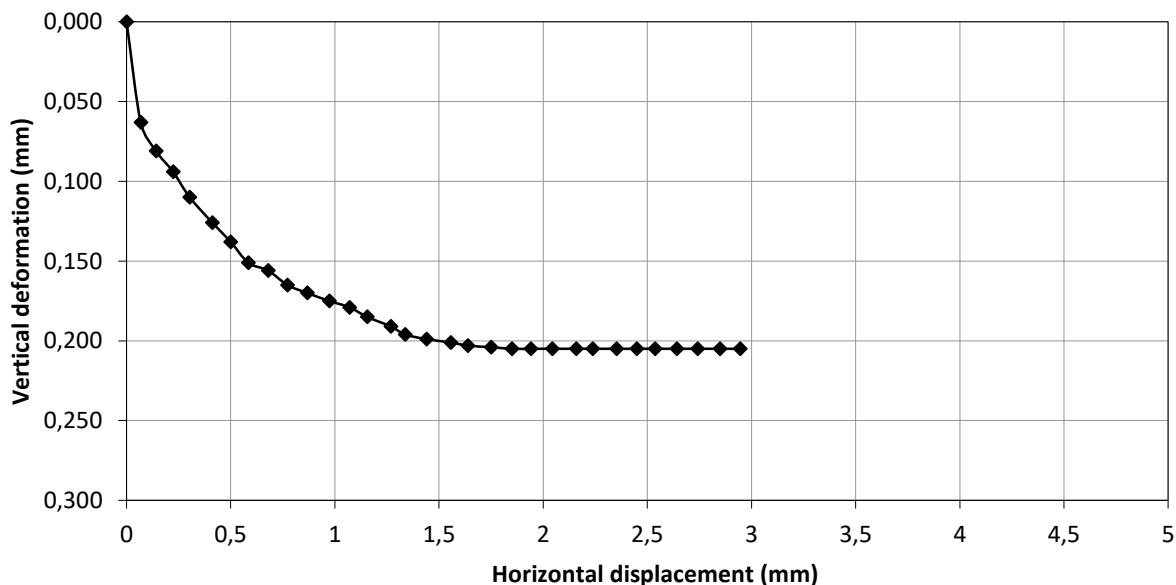
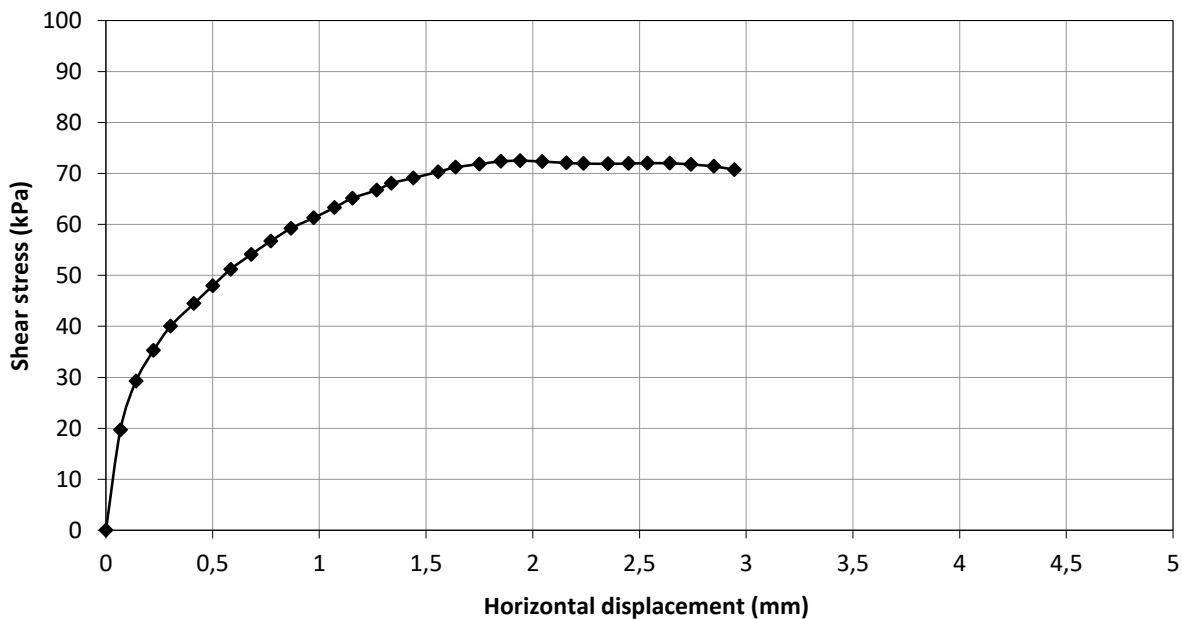
**TEST DATA - SHEARING**



Project location	<i>Molazzana (LU)</i>		
Project reference	<i>TECNA srl per Regione Tc</i>	Sample depth (m)	<i>7.00/7.40</i>
Borehole number	<i>2</i>	Sample type	<i>Undisturbed cohesive</i>
Sample number	<i>1</i>	Specimen orientation	<i>Vertical</i>

**SPECIMEN 1**

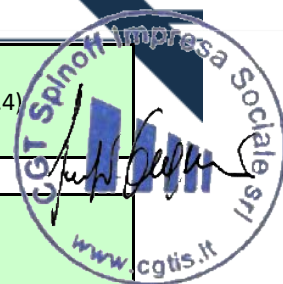
**Normal stress (kPa) 101**



Tested	Checked	<i>Dott.ssa Sfalanga</i>	Approved	<i>Prof. Carmignani</i>
Date	Date	<i>11/11/2019</i>	Date	<i>Cert. N. 443/2019</i>

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**



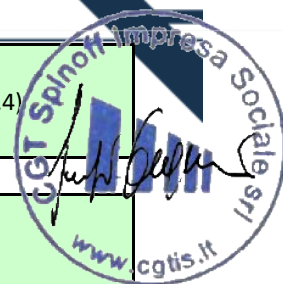
Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Toscana	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 2</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>200</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,07	1,144	0,3	1,144
0,12	1,161	0,3	1,161
0,20	1,184	0,4	1,184
0,32	1,204	0,6	1,204
0,50	1,228	0,7	1,228
0,80	1,242	0,9	1,242
1,28	1,256	1,1	1,256
2,03	1,262	1,4	1,262
3,23	1,265	1,8	1,265
5,15	1,272	2,3	1,272
8,20	1,278	2,9	1,278
13,05	1,288	3,6	1,288
20,75	1,297	4,6	1,297
33,00	1,309	5,7	1,309
52,47	1,312	7,2	1,312
83,42	1,315	9,1	1,315
132,65	1,317	11,5	1,317
210,92	1,320	14,5	1,320
335,35	1,321	18,3	1,321
533,22	1,322	23,1	1,322
847,82	1,322	29,1	1,322

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

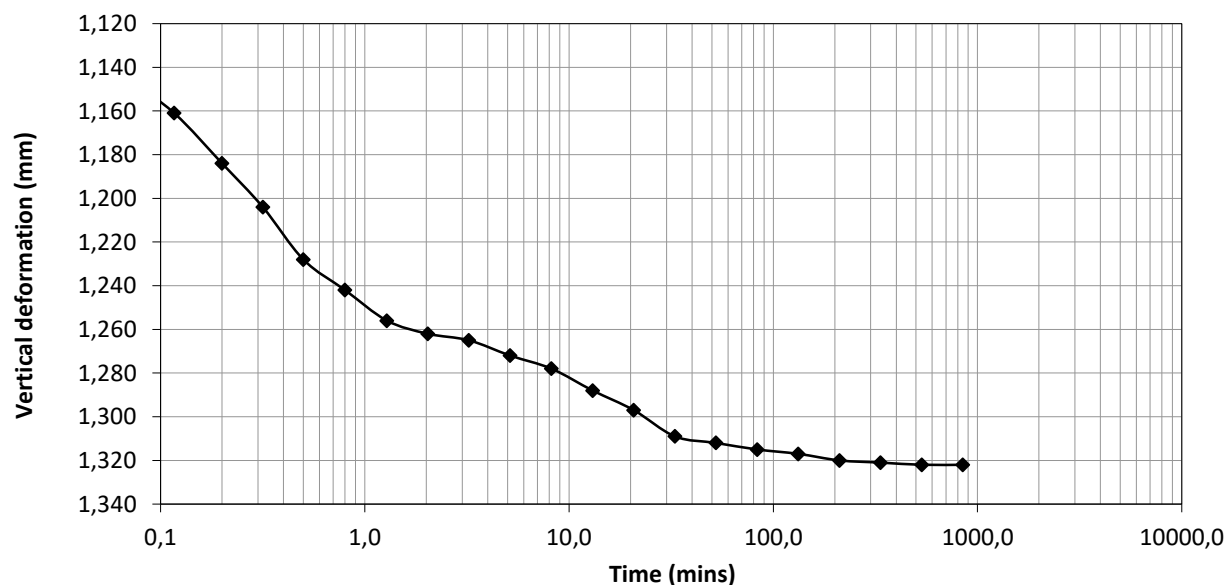
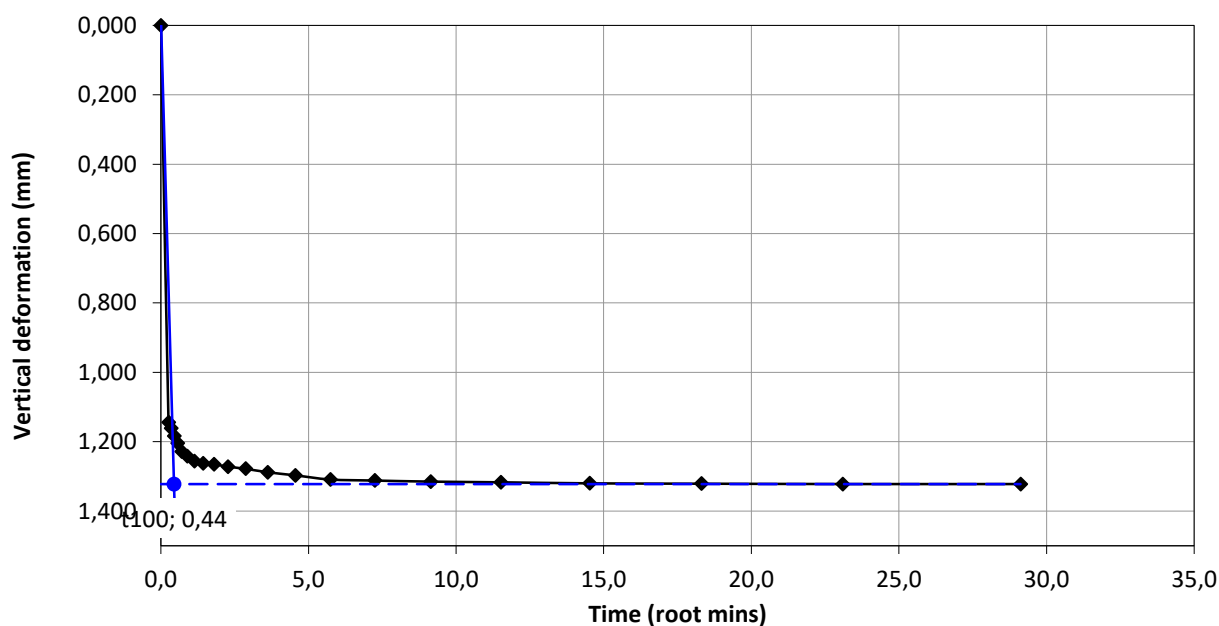
**TEST DATA - CONSOLIDATION**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 2**

Normal stress (kPa) **200**



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	12/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**

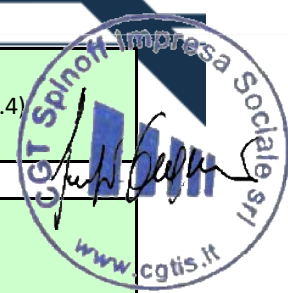


Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos.	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 2**

**Normal stress (kPa) 200**

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
9,98	0,053	0,02	115,2	0,053	0,02	115,2	32,0
19,97	0,070	0,07	167,7	0,070	0,07	167,7	46,6
29,97	0,083	0,15	206,5	0,083	0,15	206,5	57,4
39,95	0,097	0,22	238,7	0,097	0,22	238,7	66,3
49,93	0,105	0,30	266,0	0,105	0,30	266,0	73,9
59,93	0,114	0,39	290,6	0,114	0,39	290,6	80,7
69,92	0,128	0,46	310,7	0,128	0,46	310,7	86,3
79,92	0,146	0,56	327,6	0,146	0,56	327,6	91,0
89,90	0,160	0,65	343,8	0,160	0,65	343,8	95,5
99,88	0,172	0,75	359,1	0,172	0,75	359,1	99,8
109,88	0,179	0,83	372,3	0,179	0,83	372,3	103,4
119,87	0,189	0,92	384,6	0,189	0,92	384,6	106,8
129,87	0,200	1,01	396,0	0,200	1,01	396,0	110,0
139,85	0,213	1,10	406,3	0,213	1,10	406,3	112,9
149,85	0,225	1,20	416,3	0,225	1,20	416,3	115,6
159,83	0,234	1,29	424,6	0,234	1,29	424,6	117,9
169,82	0,246	1,38	433,1	0,246	1,38	433,1	120,3
179,82	0,261	1,49	440,8	0,261	1,49	440,8	122,4
189,80	0,273	1,56	447,4	0,273	1,56	447,4	124,3
199,78	0,285	1,67	453,7	0,285	1,67	453,7	126,0
209,78	0,295	1,79	459,0	0,295	1,79	459,0	127,5
219,77	0,305	1,87	463,4	0,305	1,87	463,4	128,7
229,77	0,317	1,98	467,6	0,317	1,98	467,6	129,9
239,75	0,330	2,08	471,4	0,330	2,08	471,4	130,9
249,75	0,336	2,17	474,9	0,336	2,17	474,9	131,9
259,73	0,342	2,28	477,8	0,342	2,28	477,8	132,7
269,72	0,349	2,38	479,9	0,349	2,38	479,9	133,3
279,72	0,352	2,48	482,4	0,352	2,48	482,4	134,0
289,70	0,356	2,58	483,8	0,356	2,58	483,8	134,4
299,70	0,361	2,69	484,5	0,361	2,69	484,5	134,6
309,68	0,365	2,78	485,6	0,365	2,78	485,6	134,9
319,67	0,368	2,88	485,6	0,368	2,88	485,6	134,9
329,67	0,369	2,99	485,2	0,369	2,99	485,2	134,8
339,65	0,371	3,08	484,4	0,371	3,08	484,4	134,6



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**

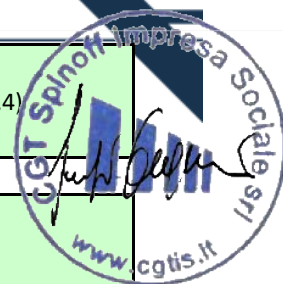
Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Toscana	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 2</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>200</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
349,63	0,373	3,18	483,6	0,373	3,18	483,6	134,3
359,63	0,374	3,29	482,7	0,374	3,29	482,7	134,1
369,62	0,376	3,38	482,0	0,376	3,38	482,0	133,9
379,62	0,378	3,49	480,8	0,378	3,49	480,8	133,6
389,60	0,380	3,59	479,0	0,380	3,59	479,0	133,1

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

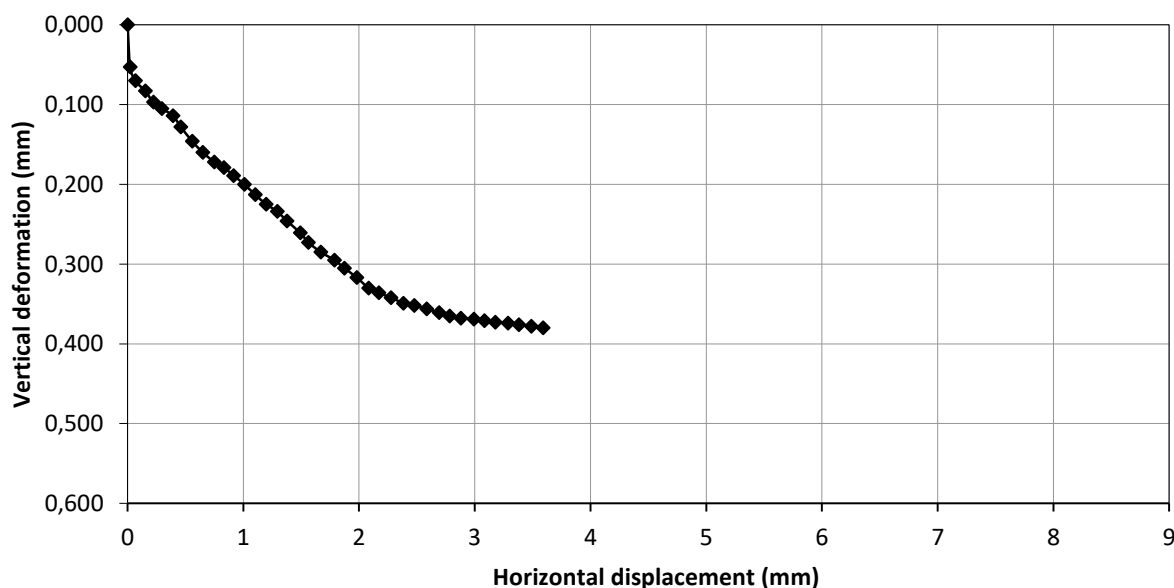
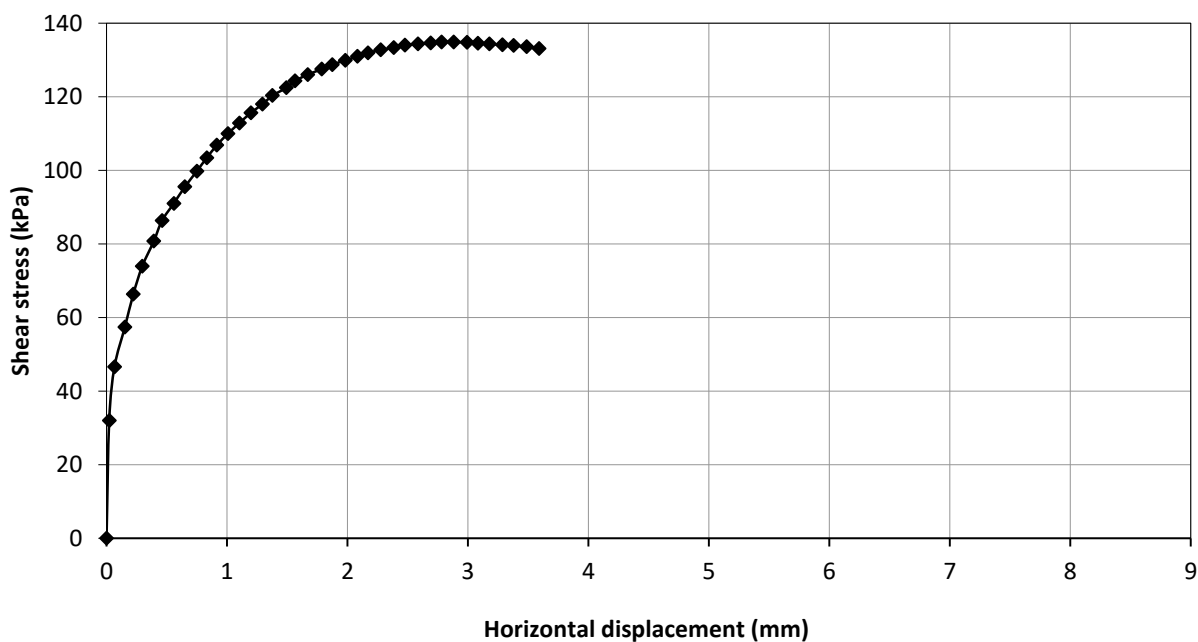
**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 2**

Normal stress (kPa) **200**

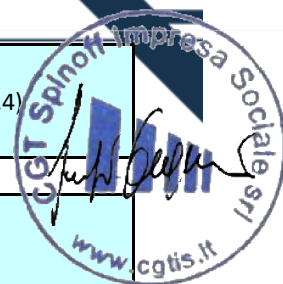


Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	12/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019



DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**

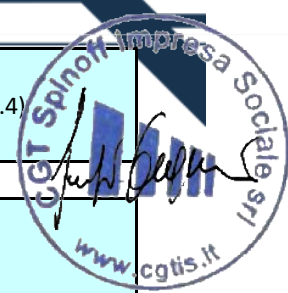


Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Toscana	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 3</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>401</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data		Calculated data	
Time (mins)	Vertical displacement (mm)	Time (root mins)	Vertical deformation of specimen (mm)
0,07	1,516	0,3	1,516
0,12	1,541	0,3	1,541
0,20	1,556	0,4	1,556
0,32	1,566	0,6	1,566
0,50	1,576	0,7	1,576
0,80	1,591	0,9	1,591
1,28	1,604	1,1	1,604
2,03	1,618	1,4	1,618
3,23	1,629	1,8	1,629
5,15	1,644	2,3	1,644
8,20	1,652	2,9	1,652
13,05	1,663	3,6	1,663
20,75	1,672	4,6	1,672
33,00	1,679	5,7	1,679
52,47	1,686	7,2	1,686
83,42	1,699	9,1	1,699
132,65	1,711	11,5	1,711
210,92	1,712	14,5	1,712
335,35	1,713	18,3	1,713
533,22	1,716	23,1	1,716
847,82	1,720	29,1	1,720





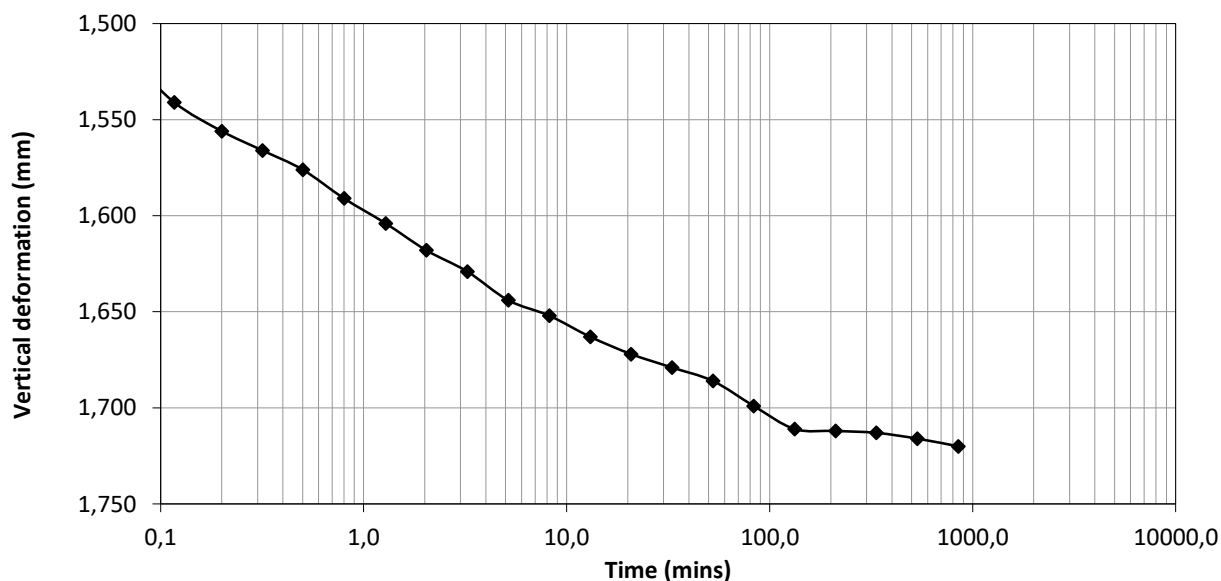
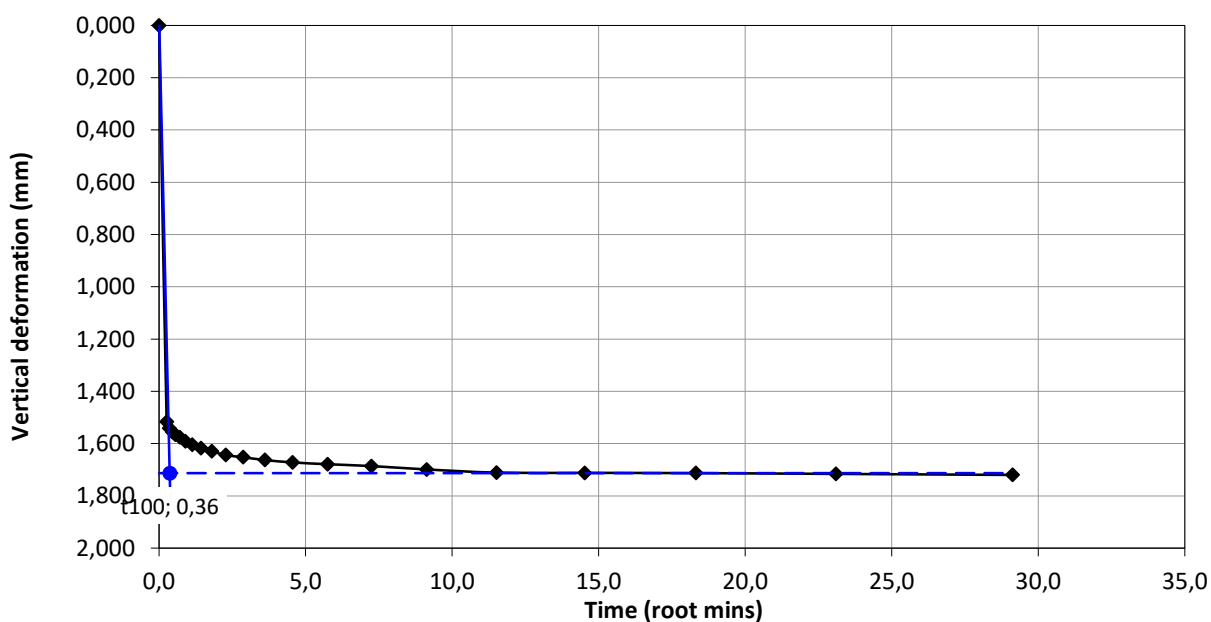
DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - CONSOLIDATION**

Project location	Molazzana (LU)	Sample depth (m)	7.00/7.40
Project reference	TECNA srl per Regione Tos	Sample type	Undisturbed cohesive
Borehole number	2	Specimen orientation	Vertical
Sample number	1		

**SPECIMEN 3**

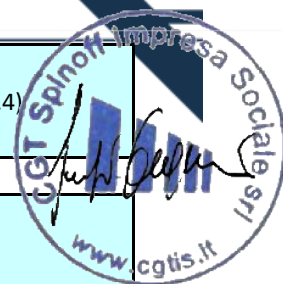
Normal stress (kPa) **401**



Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	13/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos.	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

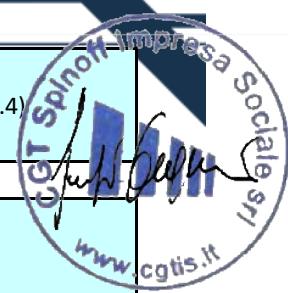
**SPECIMEN 3**

**Normal stress (kPa) 401**

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
9,98	0,038	0,04	38,3	0,038	0,04	38,3	10,6
19,97	0,064	0,08	123,9	0,064	0,08	123,9	34,4
29,97	0,085	0,14	205,4	0,085	0,14	205,4	57,1
39,95	0,108	0,18	275,8	0,108	0,18	275,8	76,6
49,93	0,127	0,25	337,5	0,127	0,25	337,5	93,8
59,93	0,138	0,34	390,8	0,138	0,34	390,8	108,6
69,92	0,164	0,41	437,4	0,164	0,41	437,4	121,5
79,92	0,189	0,49	479,7	0,189	0,49	479,7	133,3
89,90	0,208	0,57	517,8	0,208	0,57	517,8	143,8
99,88	0,237	0,65	548,7	0,237	0,65	548,7	152,4
109,88	0,254	0,73	577,3	0,254	0,73	577,3	160,4
119,87	0,282	0,82	600,0	0,282	0,82	600,0	166,7
129,87	0,290	0,92	619,5	0,290	0,92	619,5	172,1
139,85	0,309	1,00	639,1	0,309	1,00	639,1	177,5
149,85	0,330	1,09	656,2	0,330	1,09	656,2	182,3
159,83	0,348	1,19	677,0	0,348	1,19	677,0	188,1
169,82	0,368	1,26	694,9	0,368	1,26	694,9	193,0
179,82	0,379	1,36	710,7	0,379	1,36	710,7	197,4
189,80	0,403	1,45	727,4	0,403	1,45	727,4	202,1
199,78	0,427	1,54	740,2	0,427	1,54	740,2	205,6
209,78	0,446	1,66	752,2	0,446	1,66	752,2	208,9
219,77	0,464	1,74	763,5	0,464	1,74	763,5	212,1
229,77	0,485	1,84	774,1	0,485	1,84	774,1	215,0
239,75	0,504	1,93	783,4	0,504	1,93	783,4	217,6
249,75	0,522	2,02	793,3	0,522	2,02	793,3	220,4
259,73	0,541	2,12	801,9	0,541	2,12	801,9	222,8
269,72	0,569	2,22	810,0	0,569	2,22	810,0	225,0
279,72	0,587	2,31	817,3	0,587	2,31	817,3	227,0
289,70	0,603	2,41	824,3	0,603	2,41	824,3	229,0
299,70	0,614	2,50	823,7	0,614	2,50	823,7	228,8
309,68	0,619	2,60	834,5	0,619	2,60	834,5	231,8
319,67	0,630	2,70	841,4	0,630	2,70	841,4	233,7
329,67	0,651	2,79	848,5	0,651	2,79	848,5	235,7
339,65	0,669	2,89	854,2	0,669	2,89	854,2	237,3

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

**TEST DATA - SHEARING**



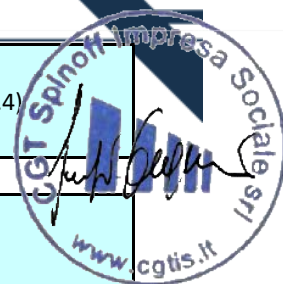
Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos.	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

<b>SPECIMEN 3</b>	<b>Normal stress (kPa)</b>	<b>401</b>
-------------------	----------------------------	------------

Recorded data				Calculated data			
Elapsed time (mins)	Vertical disp. (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Vertical deformation (mm)	Horizontal disp. (mm)	Horizontal force (N)	Shear stress (kPa)
349,63	0,678	2,99	860,2	0,678	2,99	860,2	238,9
359,63	0,688	3,08	865,6	0,688	3,08	865,6	240,4
369,62	0,696	3,18	871,0	0,696	3,18	871,0	241,9
379,62	0,707	3,27	876,9	0,707	3,27	876,9	243,6
389,60	0,717	3,36	881,8	0,717	3,36	881,8	244,9
399,60	0,725	3,47	885,2	0,725	3,47	885,2	245,9
409,58	0,733	3,57	886,8	0,733	3,57	886,8	246,3

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

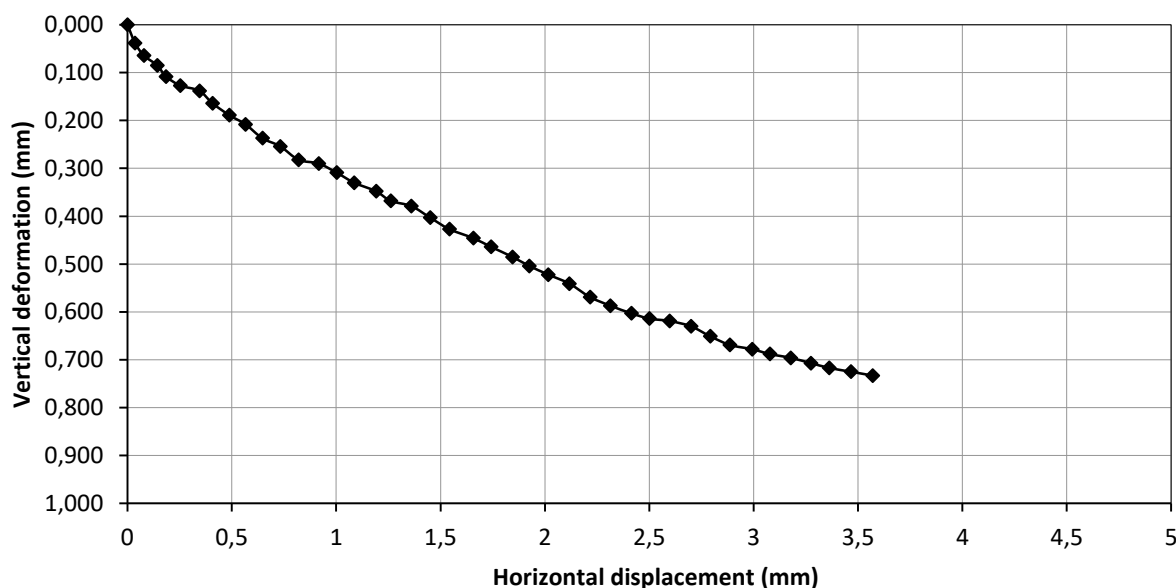
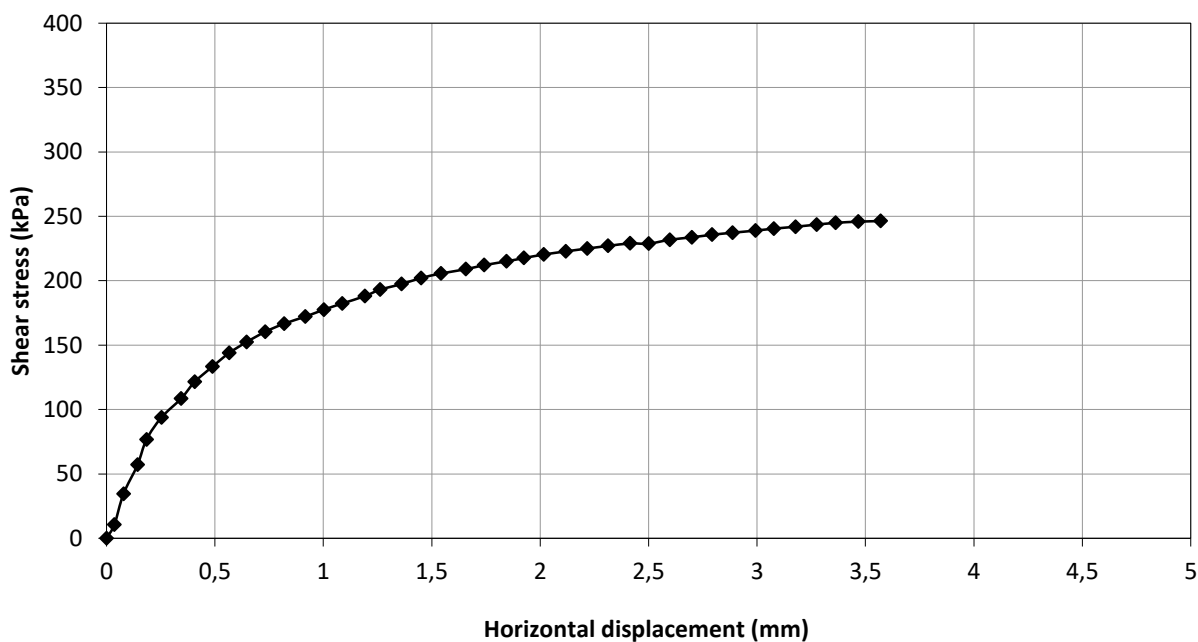
**TEST DATA - SHEARING**



Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tos.	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

**SPECIMEN 3**

Normal stress (kPa) **401**



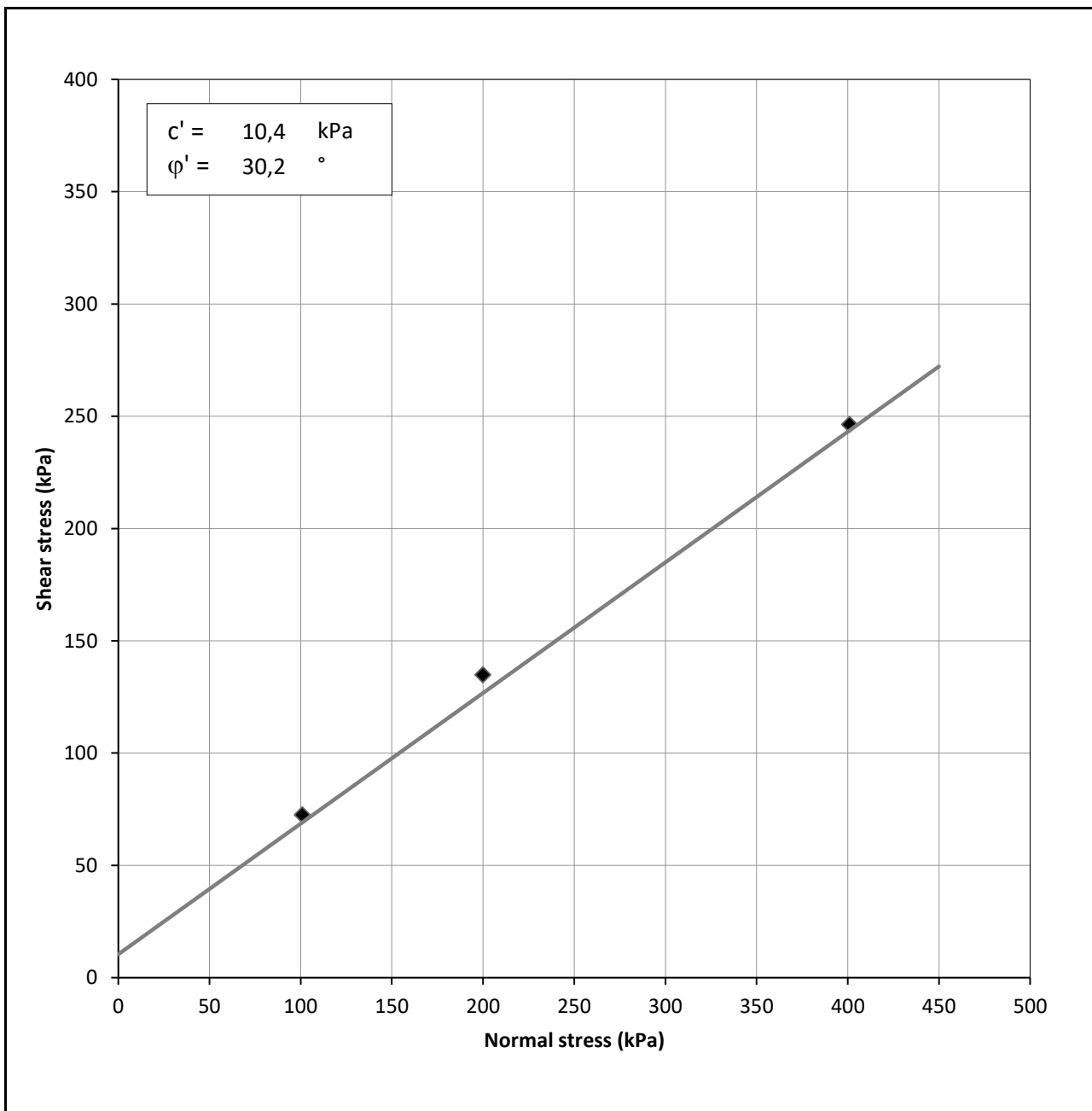
Tested	Checked	Dott.ssa Sfalanga	Approved	Prof. Carmignani
Date	Date	13/11/2019	Date	Cert. N. 443/2019

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)  
Set of single stage tests - tested in accordance with BS 1377:1990:Part 7: Clause 4 (procedure 4.5.4)

### TEST REPORT - SHEARING

Project location	Molazzana (LU)		
Project reference	TECNA srl per Regione Tc	Sample depth (m)	7.00/7.40
Borehole number	2	Sample type	Undisturbed cohesive
Sample number	1	Specimen orientation	Vertical

### CONSULENZA DI LABORATORIO



Tested Date	Checked Date	Dott.ssa Sfalanga
	22/11/2019	

## ELENCO ATTREZZATURA UTILIZZATA

Prove	Attrezzatura	Produttore – N° matricola	Taratura	
			Ente	Periodicità
Prova di taglio diretto con apparecchio di Casagrande	Macchina per prove di taglio diretto	Controls – Taglio 4: 09003096 Taglio SH: 10007727	Politecnico delle Marche	1 anno
Corredo per prove	Altra strumentazione (forni, vetreria, fustelle, materiale di consumo)	Controls, Carlo Erba, Wykeham Farrance	-	-

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Scala 1:2000)**

