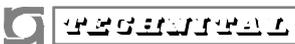


A	DICEMBRE 2011	EMISSIONE				P. LO CASCIO	L. BELLONI	F.BUSOLA													
REV.	DATA	DESCRIZIONE				ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO													
SOSTITUISCE L'ELABORATO N~						SOSTITUITO DALL'ELABORATO N~															
<b>CONSORZIO PER LE AUTOSTRADE SICILIANE</b> <b>AUTOSTRADA SIRACUSA – GELA</b> <b>2° TRONCO: ROSOLINI – RAGUSA</b> <b>LOTTO 10/11</b> <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>																					
IDENTIFICAZIONE ELABORATO																					
E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	G	0	0	I	N	D	R	E	0	0	2	A
PROG.	STRADA	LOTTO	MACRO OPERA	OPERA		PARTE DI OPERA		TIPOLOGIA ELABORATO	N. ELABORATO	REV.											
<b>LOTTO 10 "IRMINIO"</b> <b>INDAGINI GEOGNOSTICHE</b> <b>INDAGINI INDIRETTE (TRAVERSE SISMICHE E MASW)</b>																					
DATA	DICEMBRE 2011					PROGETTAZIONE															
CODICE CAD-FILE	EA1810T00GG00INDRE002A.doc					IL RESPONSABILE : DOTT. ING. F. BUSOLA															
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI  QUALSIASI RIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DI LEGGE</small>																					

	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	G	0	0	I	N	D	R	E	0	0	2	A	Pag. n. 1
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

**AUTOSTRADA SIRACUSA-GELA**

**2° TRONCO ROSOLINI - RAGUSA**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**LOTTO 10 "IRMINIO"**

**GEOTECNICA**

**INDAGINI INDIRETTE (TRAVERSE SISMICHE E MASW)**

 <b>GEOTECNICAL</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	G	0	0	I	N	D	R	E	0	0	2	A	Pag. n. 2
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

## INTRODUZIONE

Nel presente documento sono raccolti i certificati di prova delle indagini indirette eseguite per il Lotto 10 “Irminio”.

Le indagini comprendono:

- 21 traverse sismiche Ts44÷Ts58, Ts58a,b,c,d,e,f, effettuate dalla Ditta Lista Appalti – Valsinni(MT) nella campagna del 2003. A tal riguardi si segnala che le indagini Ts44 e Ts45 sono state effettuate nell’ambito dei precedenti limiti di batteria del lotto 9 e per questo motivo sono contenuti nel volume presentato nell’ambito del progetto definitivo del Lotto 9. Si è in questa sede deciso di riproporre tali indagini ricadenti all’inizio del Lotto 10, secondo i nuovi limiti di batteria.
- 1 traversa sismica TOMO S4 effettuata dalla Ditta Geo Check – Misterbianco (CT) nel 2011;
- 4 Prove sismiche MASW per la classificazione ai fini sismici dei terreni di fondazione delle opere effettuate dalla Ditta Geo Check – Misterbianco (CT) nel 2011;

I certificati di prova sono preceduti da una breve relazione introduttiva prodotta dall’esecutore delle indagini.

La loro contestualizzazione nell’ambito geologico, geomorfologico, sismico, geotecnico e geomeccanico è prodotta nelle relazioni specialistiche di pertinenza.



CONSORZIO PER LE  
AUTOSTRAD E SICILIANE

Elaborato n° 8

AUTOSTRADA SIRACUSA-GELA

**TECHNITAL**

S.p.A.  
DIREZIONE LAVORI

AUTOSTRADA  
SIRACUSA - GELA

2-3° TRONCO TRATTA MODICA-GELA | LOTTO 10 "Irminio"

CAMPAGNA DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE

Contratto n° 367 del 09.12.2003 reg.to a Messina il 16.12.2003 al n° 6434 serie I

PROSPEZIONI SISMICHE

Rif. Progetto:

DATA: 15.01.2003 AGG. 23/06/2004

IL DIRETTORE DEI LAVORI  
Dott. Geol. Emanuele Fresia



IL RESPONSABILE DEL  
PROCEDIMENTO  
Dott. Ing. Felice Siracusa

L'IMPRESA  
LISTA APPALTI s.r.l.

Il direttore di cantiere  
Dott. Geol. Mario Rosone



**Lista Appalti s.r.l.**

75029 VALSINNI (MT)  
VIA SS. 104 KM 143+200 Tel. (0835) 817079  
E- Mail: listaappalti@tiscali.it

Reg. Soc. Trib. Di MT n° 7034  
C.C.I.A.A. MT n° 63709  
Attestazione SOA n° 1324/10/00  
P.iva n° 00657300778



**CANTIERE COMISO – C.da Cascalanella, s.n.  
97013 COMISO (RG)**

## ***PROSPEZIONI GEOFISICHE (Sismica a Rifrazione)***

### ***Premessa***

A completamento della campagna di indagini geognostiche di supporto alla progettazione del lotto n. 10 dell'Autostrada Siracusa – Gela per conto del Consorzio per le Autostrade Siciliane Messina, sono state realizzate n. 13 traverse sismiche ubicate in quei siti ove la Direzione dei Lavori ha ritenuto opportuno dettagliare le conoscenze geologiche dell'area.

Le traverse sismiche sono state realizzate mediante l'esecuzione di un minimo di cinque scoppi per sondaggio mentre l'orientazione e le caratteristiche geometriche degli stendimenti sono stati di volta in volta stabiliti per meglio adattare il tipo d'indagine alle caratteristiche geologiche e geomorfologiche dello specifico sito tenendo conto degli scopi della singola indagine e delle situazioni tecniche – operative di volta in volta riscontrate.

### ***Descrizione del metodo***

La sismica a rifrazione analizza il sottosuolo mediante lo studio degli effetti che le onde di pressione, generate da una sorgente artificiale, producono attraversando rocce con caratteristiche elastiche differenti. Le onde elastiche, attraversando queste discontinuità, sono sottoposte al fenomeno della rifrazione e, secondo opportune geometrie, possono risalire in superficie, essere intercettate dai geofoni e registrate dal sismografo.

I dati così raccolti vengono, in fase di elaborazione, filtrati ed interpretati riportando nell'asse delle ordinate di un grafico (tempi – distanze) con scale lineari, i tempi di percorrenza impiegati dai fronti d'onda per giungere dal punto di energizzazione sino ai vari geofoni. Mentre, sull'asse delle ascisse vengono riportate le distanze dei singoli geofoni dai punti di energizzazione. Il diagramma così ottenuto, è chiamato dromocrona e fornisce informazioni sulla velocità delle onde elastiche nel sottosuolo e sull'orientazione degli

orizzonti rifrangenti eventualmente presenti.

L'analisi delle spezzate costituenti la dromocrona permette di modellizzare l'andamento degli orizzonti rifrangenti e le velocità che le onde sismiche assumono percorrendoli, ottenendo un modello interpretativo delle velocità del sottosuolo.

### **Esecuzione delle indagini**

I sondaggi sono stati eseguiti con un sismografo digitale, Dolang JEA telemetry a 24 bit, 12 canali, gestito da un computer portatile, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

<b>Specifiche tecniche Dolang JEA Telemetry 24 bit</b>	
Sampling intervals	13.8 microsec to 1 sec
Number of Samples per Trace	8 K per ch
TSA	0.005 %
Delay Time	0 - 8000 sec.
Pre-trigger	up to 8K
Input protection	Analog filter & diode
Input gain	0 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB
Input impedance	matched to sensor
Gain Accuracy	+/- 0.2%
Maximum Input Signal	+/- 2 V at 0 dB gain
Frequency response	3 - 4000 Hz
Analog Anti Alias filter	4.7 kHz 6 dB / octave
Oversampling	x16 sampling rate
Digital filtering	Low-pass, High-pass Band-pass, Multiple notch
A/D Resolution	24 bit
Dynamic Resolution	117 dB
Crossfeed Isolation	100 dB
THD + noise	97 dB
Operating temperature	0°- 50°C
Geophones	14Hz vertical a.p.c.r. for 24 bit

Per la scelta ottimale del tipo di sorgente da utilizzare numerose sono state le prove tecniche eseguite sul campo, in funzione del tipo di litologia riscontrata, in particolare si è potuto sperimentare che l'utilizzo della mazza da 10 o 15 kg dotata di starter e piattello di battuta, è risultato essere il più indicato per il tipo di litologie e di copertura agraria presenti nei siti esaminati. Infatti, anche l'utilizzo del minibang caricato con cartucce a salve calibro 20 con 12 g di polvere da sparo, non è risultato in grado di produrre un'onda elastica con energia tale da propagarsi nel sottosuolo ed energizzare stendimenti di lunghezza maggiore ai

50 m in presenza di terreni di copertura soffici, in quanto gran parte dell'energia veniva dissipata generando una piccola cavità di circa 40 cm in prossimità del punto di scoppio. L'utilizzo del minibang è stato, per ovvi motivi, oggettivamente improponibile nelle zone con calcari affioranti o con ridotto spessore della copertura agraria. Pertanto il suo utilizzo è stato limitato a pochi sporadici casi ove esistevano le condizioni favorevoli al suo uso.

La lunghezza degli stendimenti è stata adattata, di volta in volta, e col consenso della Direzione dei Lavori, alle condizioni ambientali riscontrate in modo tale da ottenere una sufficiente energizzazione del terreno e risultati congrui con gli scopi dell'indagine,

La procedura utilizzata ha previsto l'esecuzione in situ di un minimo di cinque punti di energizzazione per sondaggio, due esterni, agli estremi dello stendimento, per lo studio delle velocità degli strati più profondi, due in prossimità dei geofoni ed almeno uno nella zona centrale dello stendimento per individuare le variazioni laterali degli strati superficiali.

L'interpretazione è stata eseguita di norma col metodo dei tempi intercetta ottenendo il modello delle profondità e delle velocità al di sotto dei punti di scoppio.

In ogni scheda relativa ad ogni stendimento eseguito è stata riportata una fotografia dello stendimento stesso, la curva tempi – distanze (dromocrona) con la relativa orientazione rispetto ai punti cardinali e la sezione sismostratigrafica interpretativa con i riferimenti numerici dei sondaggi meccanici eventualmente eseguiti nelle vicinanze. Sulla sezione sismostratigrafica interpretativa è possibile leggere le velocità calcolate per ogni singolo rifrattore modellizzato e la sua disposizione spaziale ricavata con il metodo interpretativo dei tempi intercetta indicata con degli archetti rossi in corrispondenza dei punti di scoppio.

Nella seguente tabella sono invece riportate le caratteristiche geometriche degli stendimenti. L'orientamento dello stendimento rispetto al Nord magnetico è stato misurato considerando come direzione dello stendimento quella che va dal primo scoppio verso l'ultimo scoppio.

Numero di riferimento	Distanza primo scoppio – secondo scoppio	Interdistanza geofonica (m)	Stesa geofonica (m)	Lunghezza stendimento (m)	Distanza geofono n.1 – secondo scoppio (m)	Numero di scoppi	Orientamento (Azimut)
Ts 46	12	2	24	48	1	5	145°
Ts 47	12	2	24	48	1	5	72°
Ts 48	12	2	24	48	1	5	22°
Ts 49	12	2	24	48	1	5	324°
Ts 50	12	2	24	48	1	5	154°
Ts 51	12	2	24	48	1	5	207°
Ts 52	12	2	24	48	1	5	172°

Numero di riferimento	Distanza primo scoppio - secondo scoppio	Interdistanza geofonica (m)	Stesa geofonica (m)	Lunghezza stendimento (m)	Distanza geofono n.1 - secondo scoppio (m)	Numero di scoppi	Orientamento (Azimut)
Ts 53	12	2	24	48	1	5	200°
Ts 54	12	2	24	48	1	5	216°
Ts 55	12	2	24	48	1	5	224°
Ts 56	12	2	24	48	1	5	40°
Ts 57	12	2	24	48	1	5	2°
Ts 58	12	2	24	48	1	5	329°

Dietro richiesta della Direzione dei Lavori sono state inoltre successivamente eseguite le seguenti sei traverse sismiche:

Numero di riferimento	Distanza primo scoppio - secondo scoppio	Interdistanza geofonica (m)	Stesa geofonica (m)	Lunghezza stendimento (m)	Distanza geofono n.1 - secondo scoppio (m)	Numero di scoppi	Orientamento (Azimut)
Ts 58 A	12	2	24	48	1	5	11°
Ts 58 B	12	2	24	48	1	5	316°
Ts 58 C	12	2	24	48	1	5	314°
Ts 58 D	12	2	24	48	1	5	324°
Ts 58 E	10	2	24	44	1	5	280°
Ts 58 F	12	2	24	48	1	5	206°

Comiso, li 21/12/2003

Il Responsabile del Servizio Geofisico

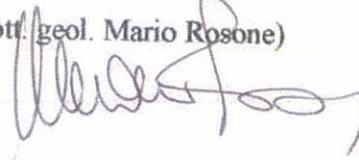
(dott. geol. Salvatore Carrubba)





Il Direttore di Cantiere

(dott. geol. Mario Rosone)

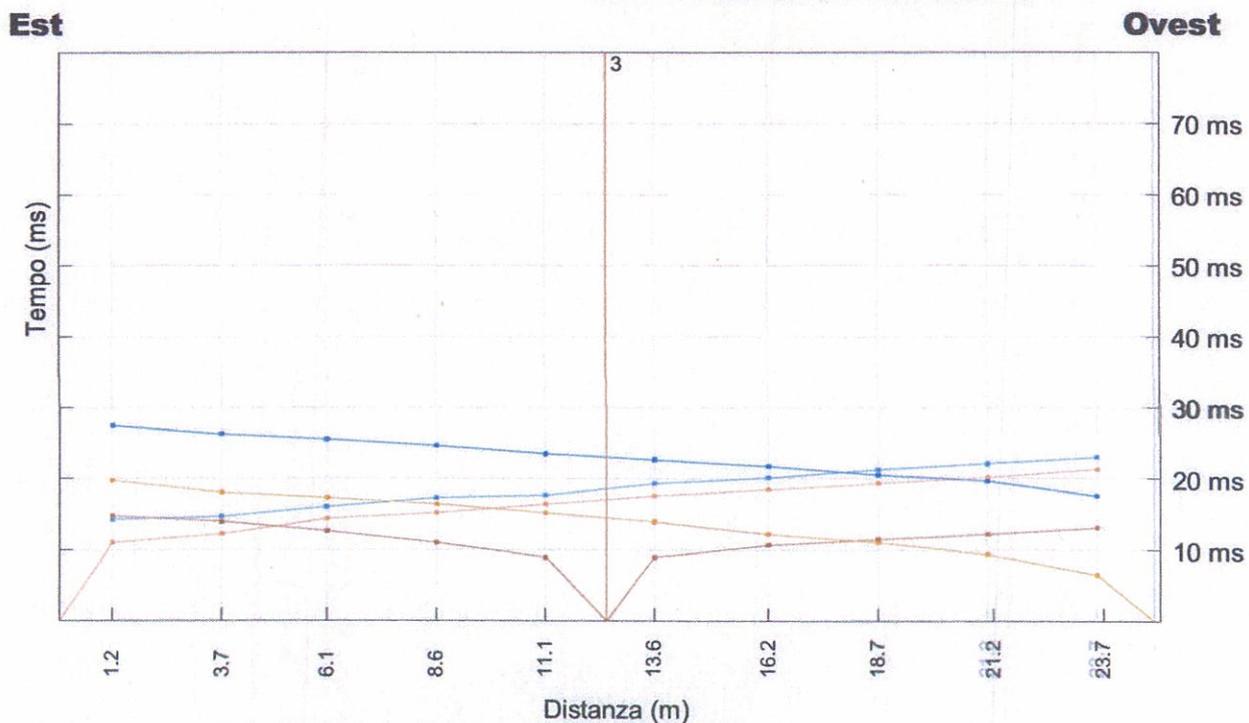




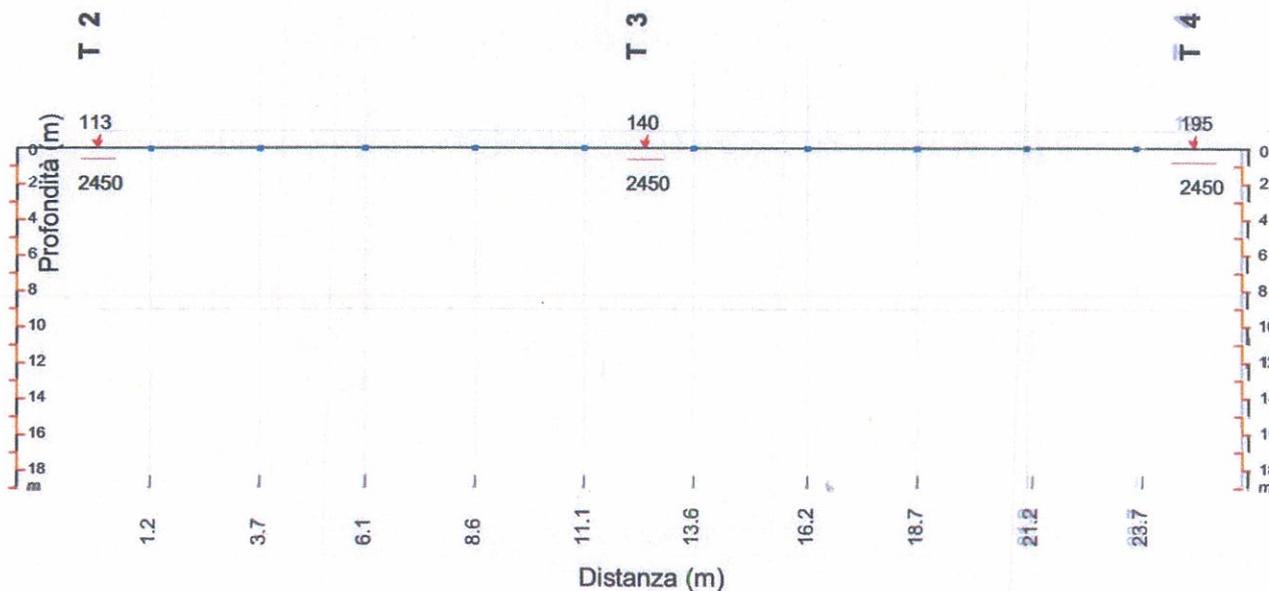
# TRAVERSA SISMICA TS45



## DROMOCRONA



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



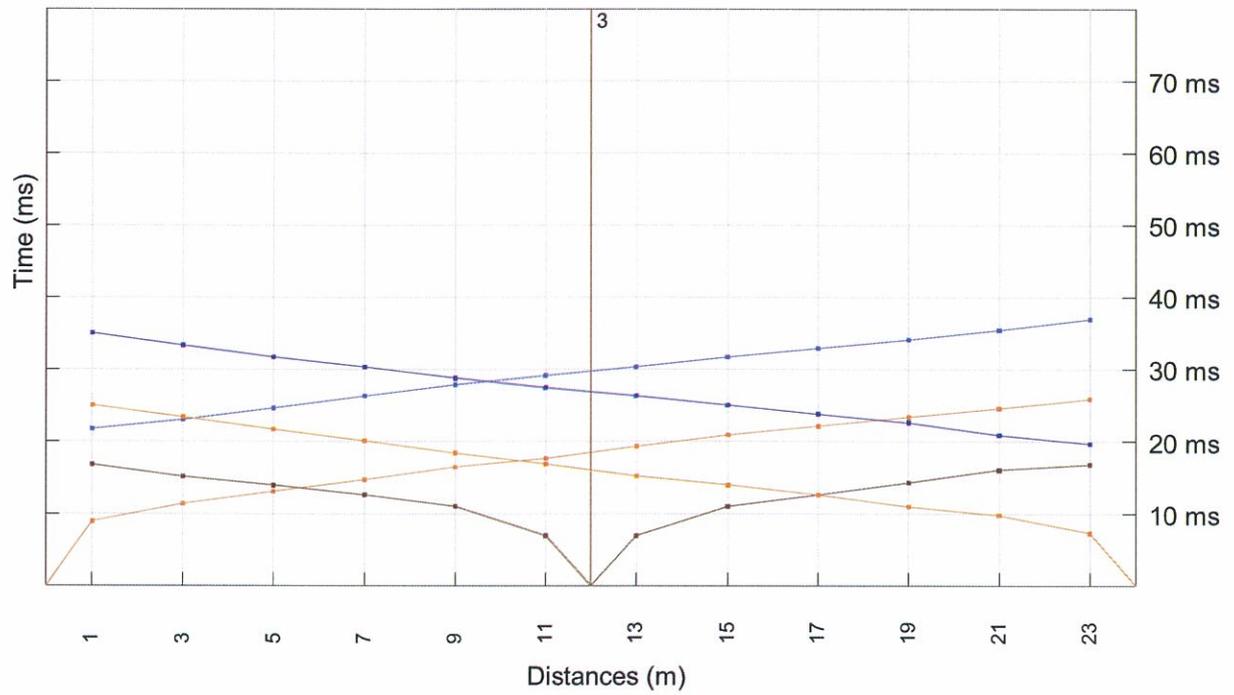
# TRAVERSA SISMICA TS46



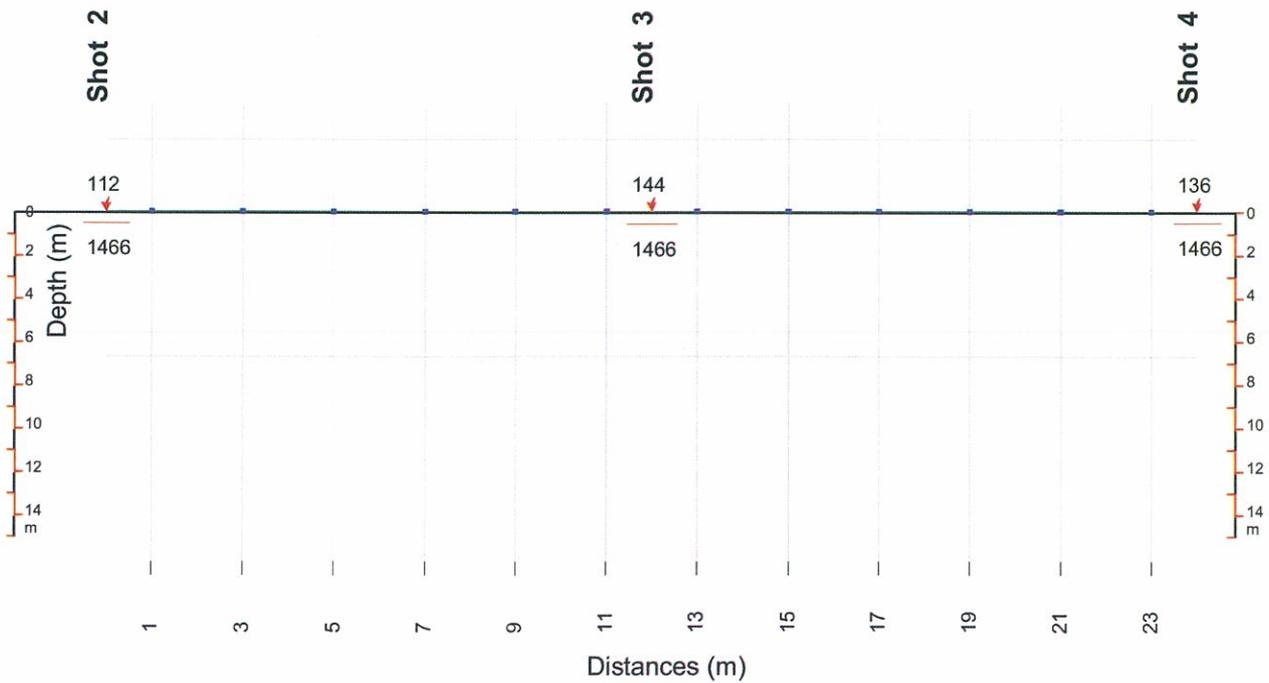
## DROMOCRONA

Nord-Ovest

Sud-Est



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



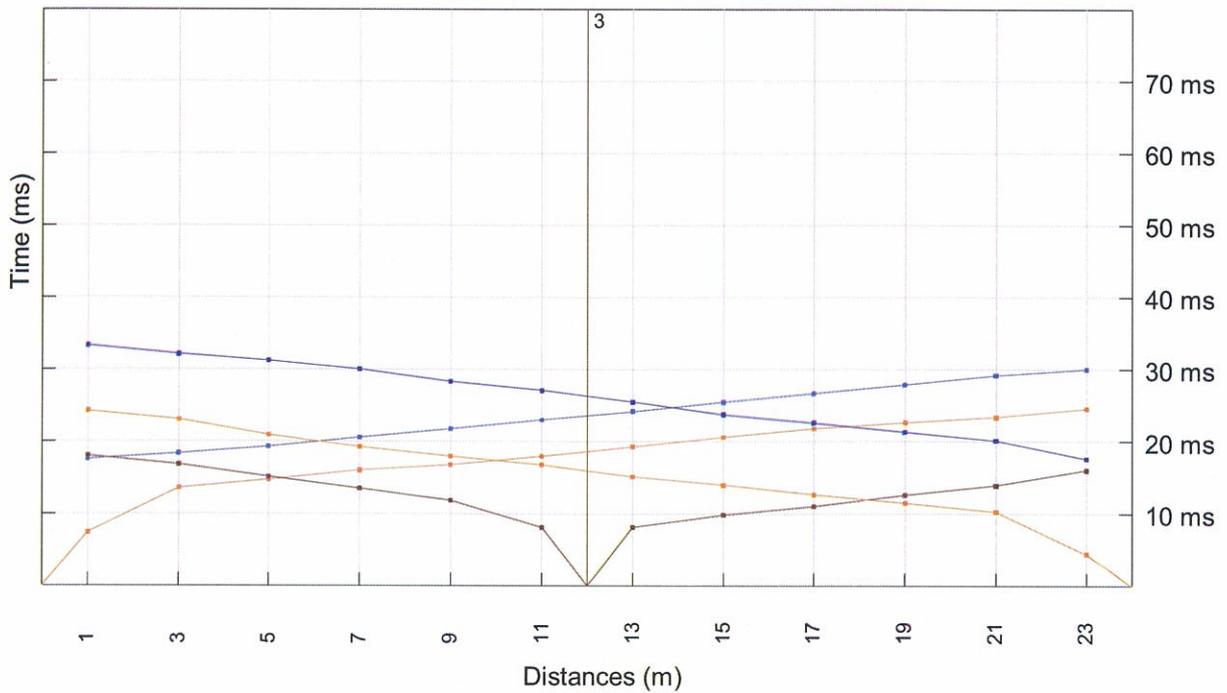
# TRAVERSA SISMICA TS47



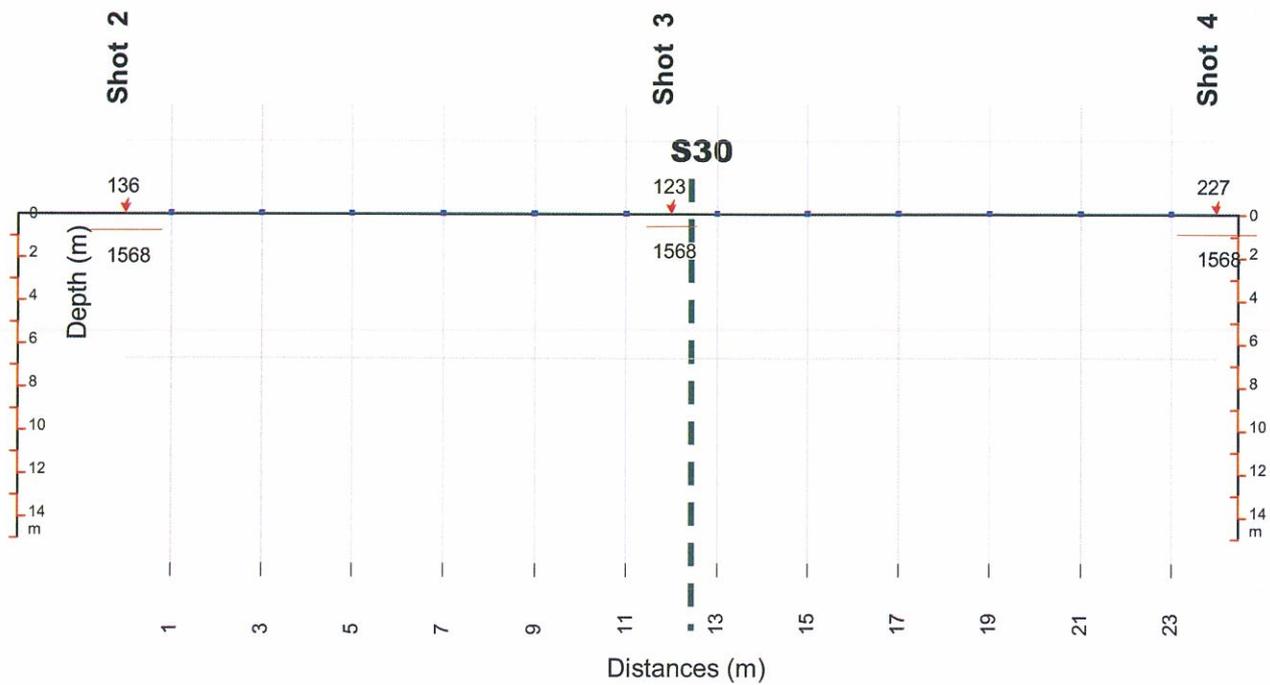
## DROMOCRONA

Ovest

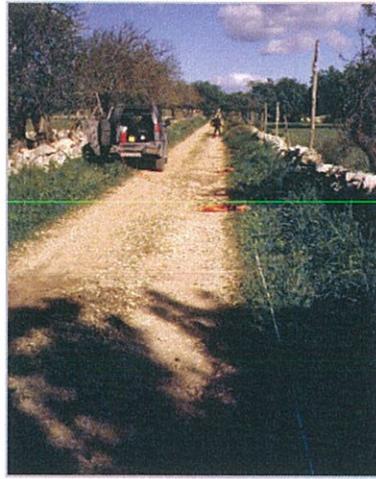
Est



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



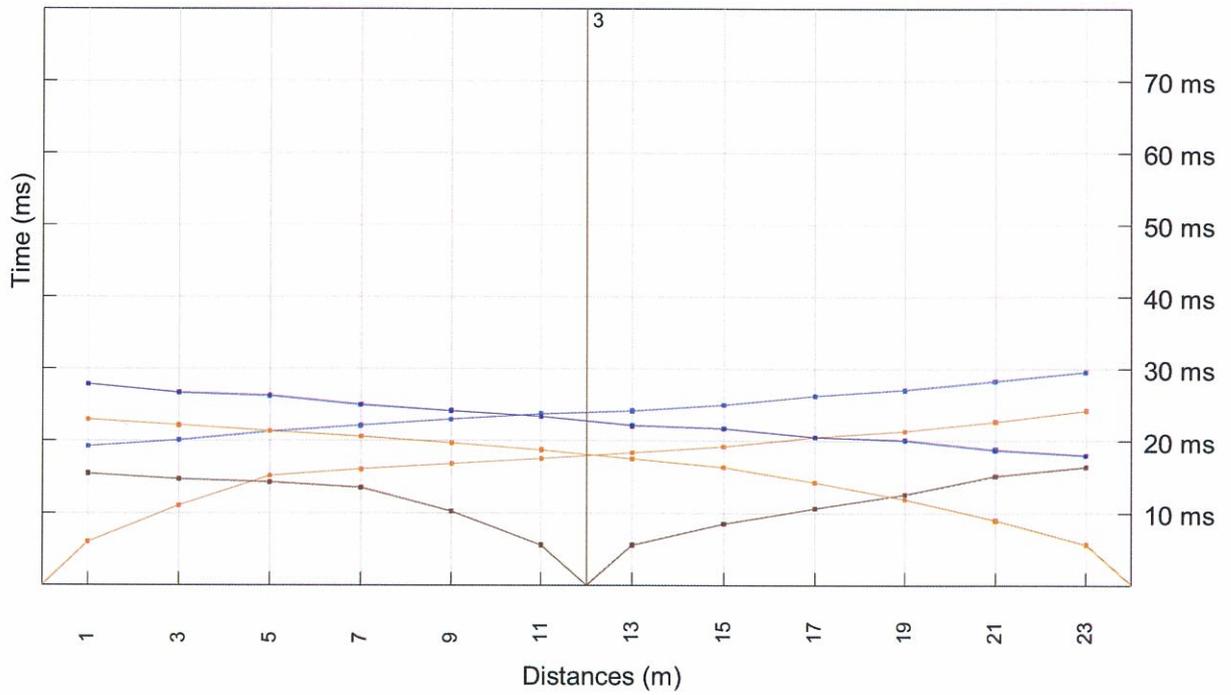
# TRAVERSA SISMICA TS48



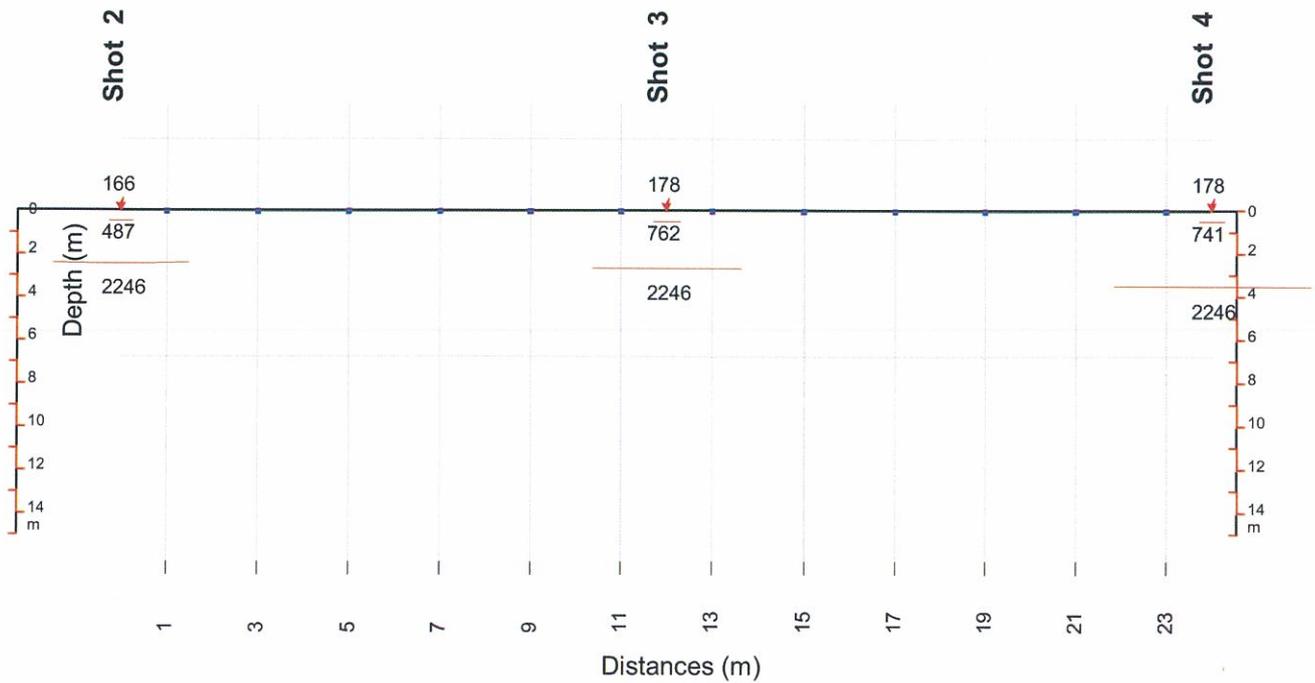
## DROMOCRONA

Sud-Ovest

Nord-Est



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



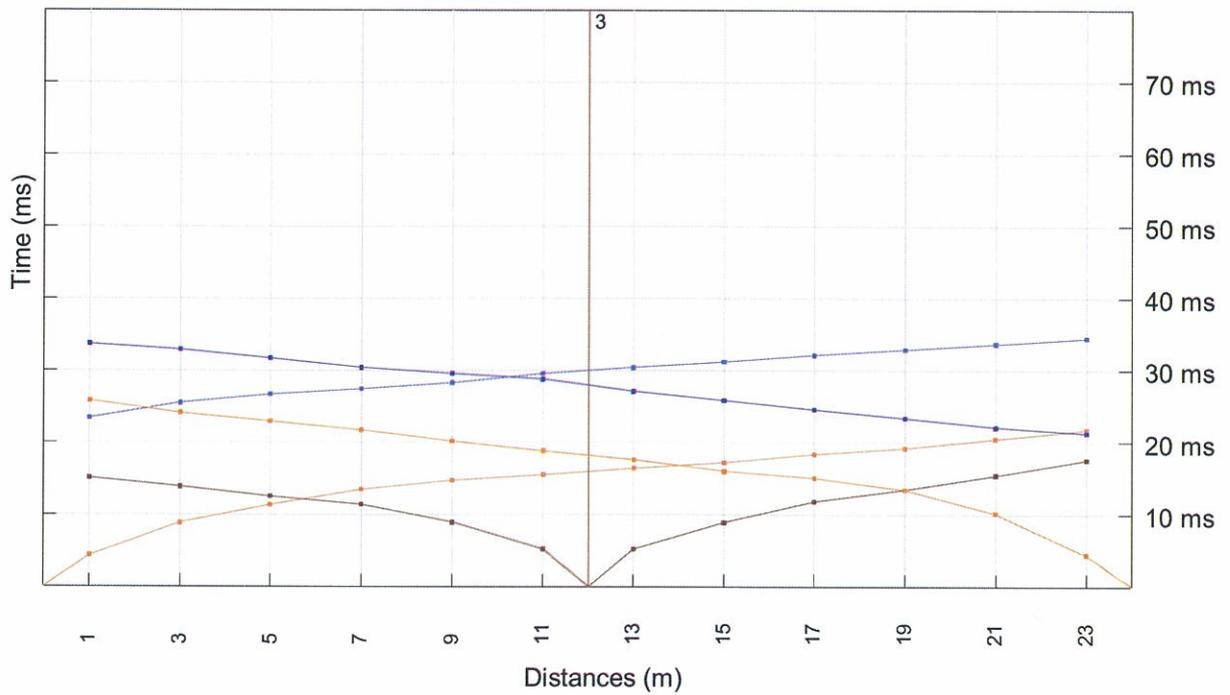
# TRAVERSA SISMICA TS49



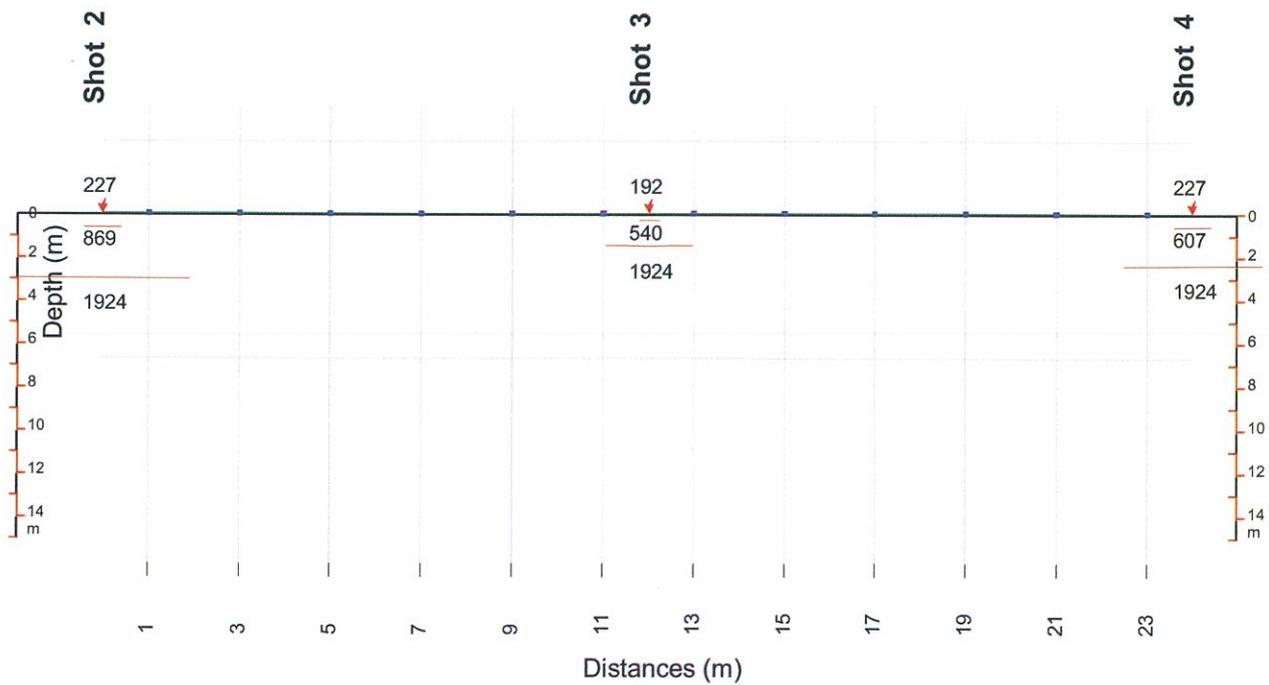
## DROMOCRONA

Sud-Est

Nord-Ovest



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



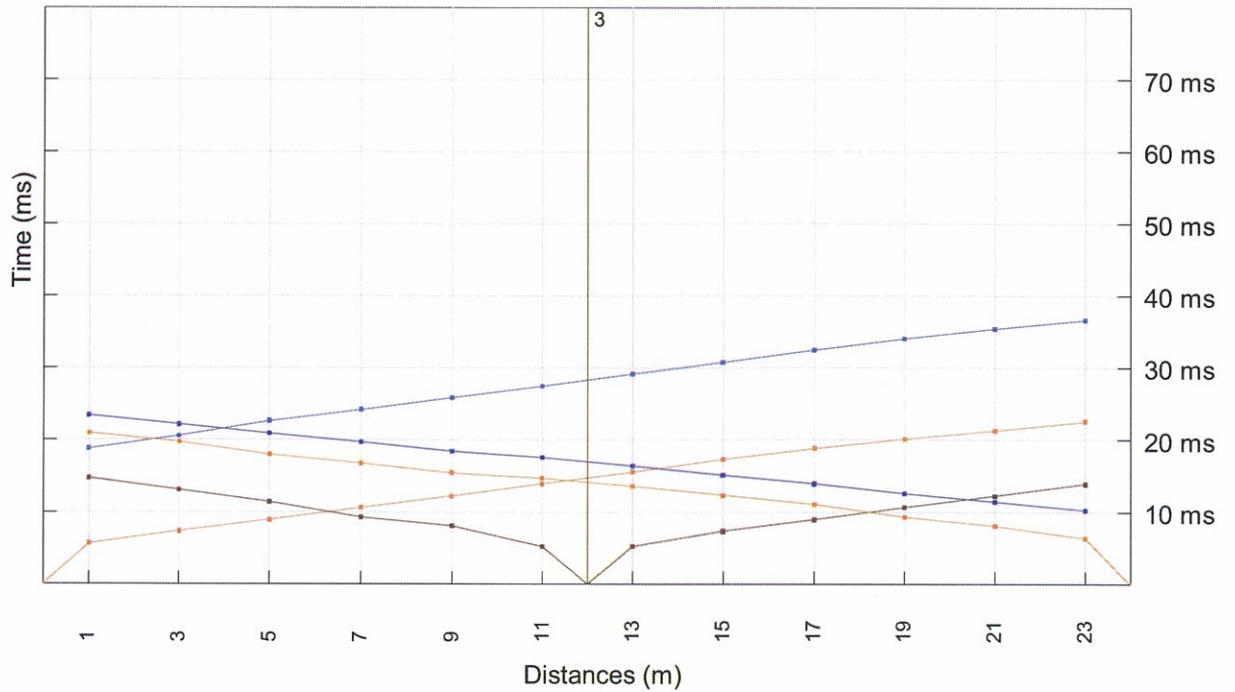
# TRAVERSA SISMICA TS50



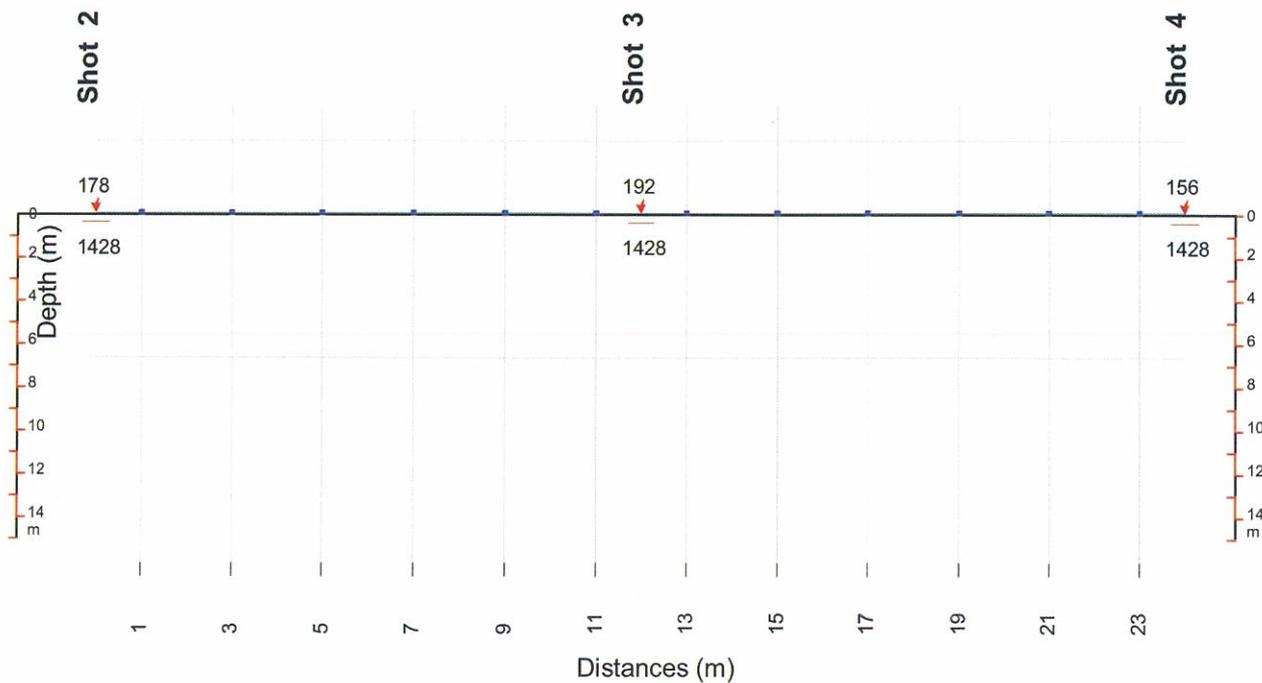
## DROMOCRONA

**Nord-Ovest**

**Sud-Est**



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



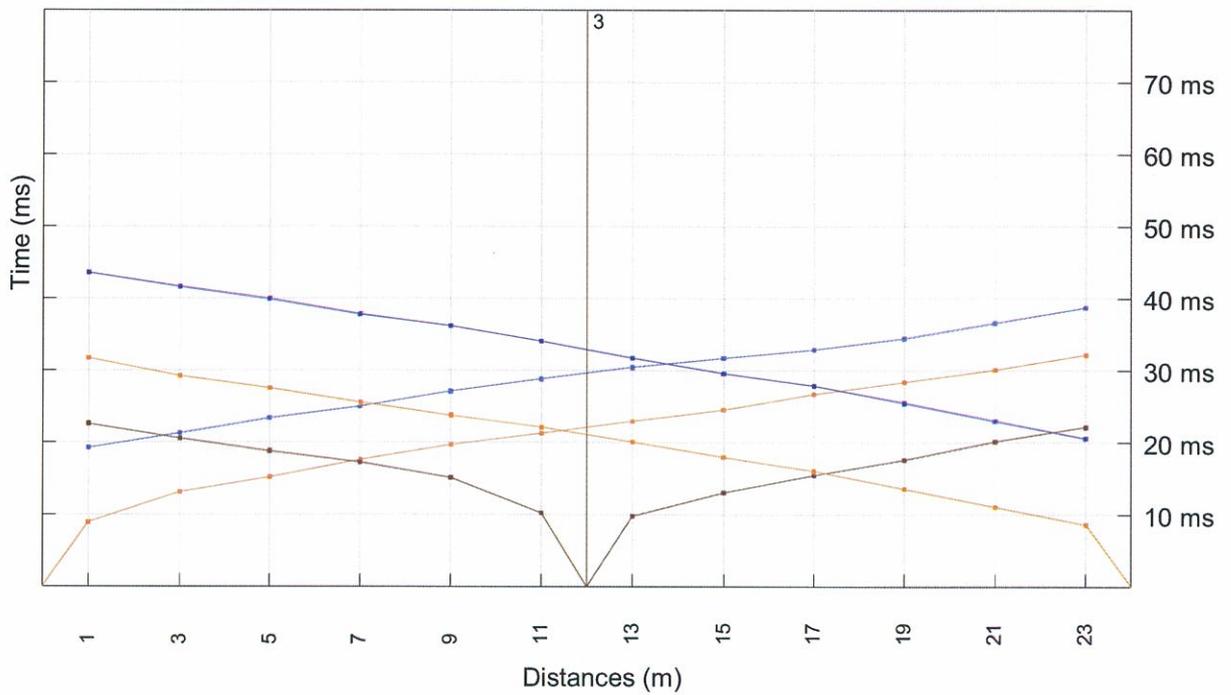
# TRAVERSA SISMICA TS51



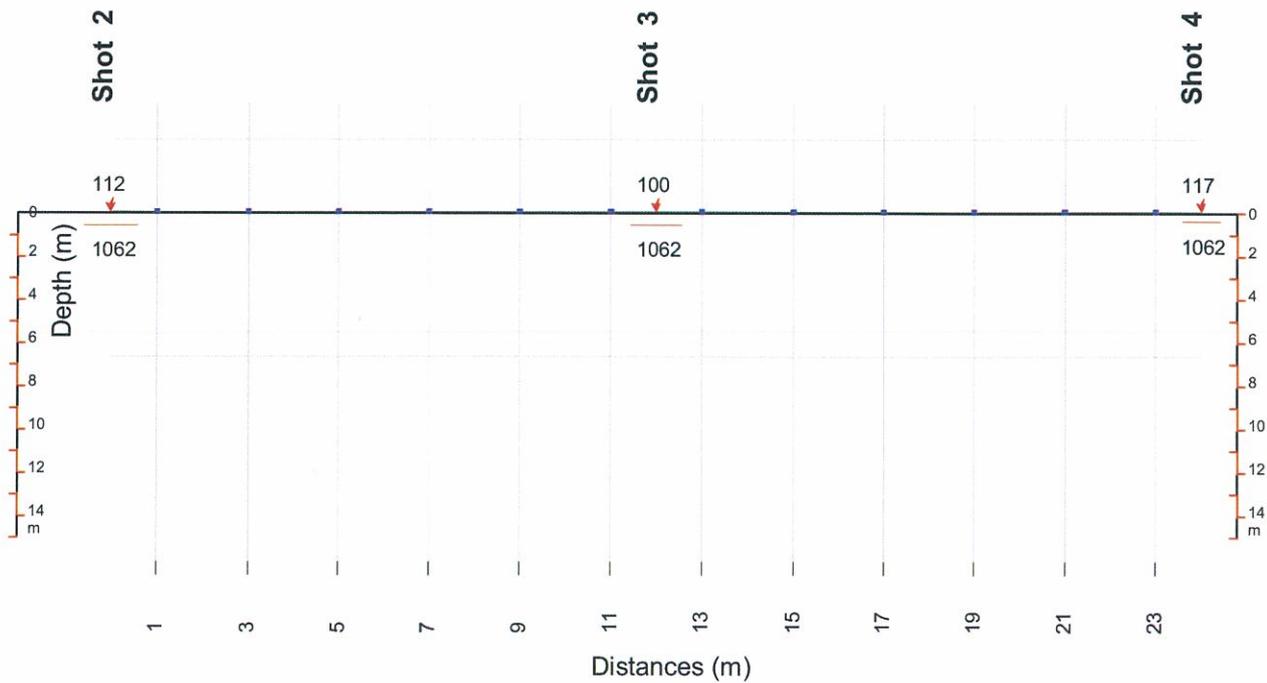
## DROMOCRONA

Nord-Est

Sud-Ovest



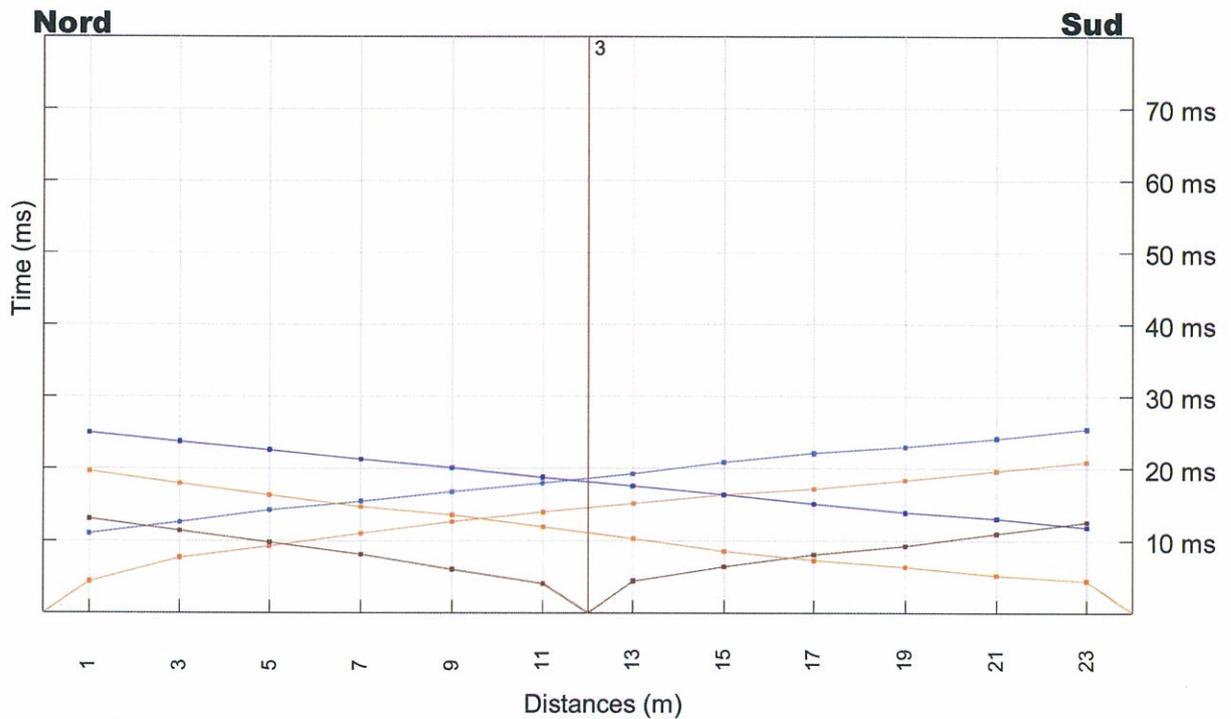
## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



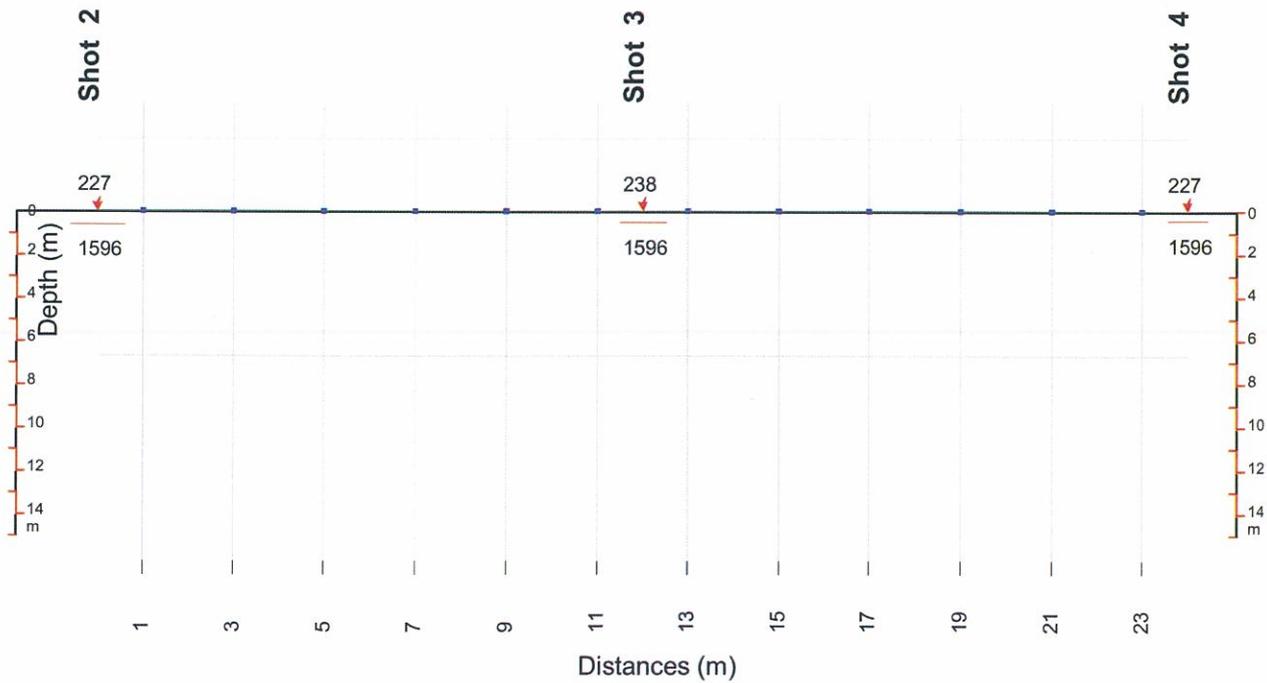
# TRAVERSA SISMICA TS52



## DROMOCRONA



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



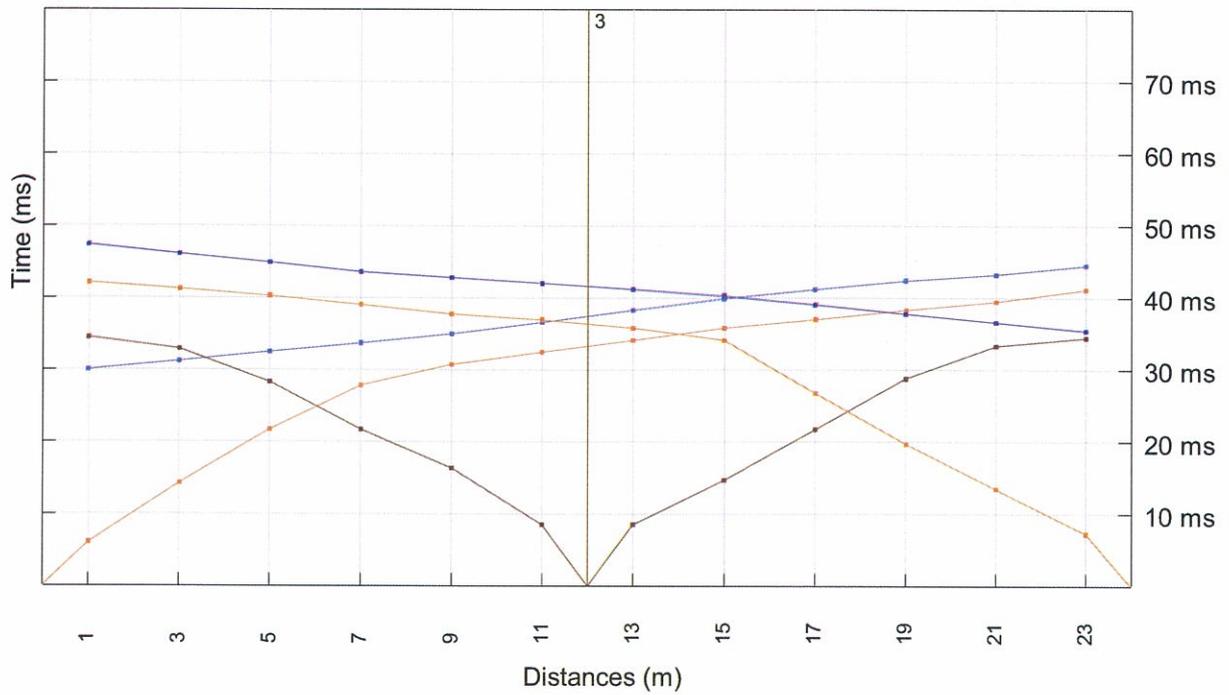
# TRAVERSA SISMICA TS53



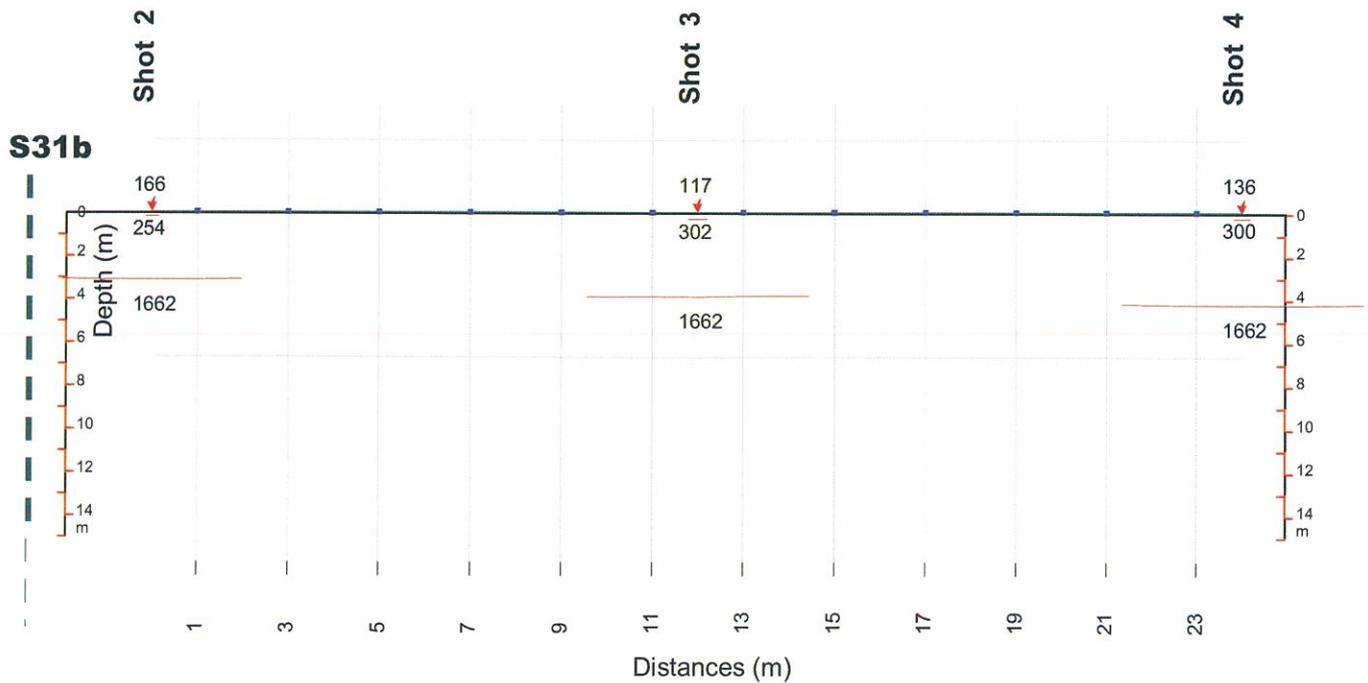
## DROMOCRONA

Nord-Est

Sud-Ovest



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



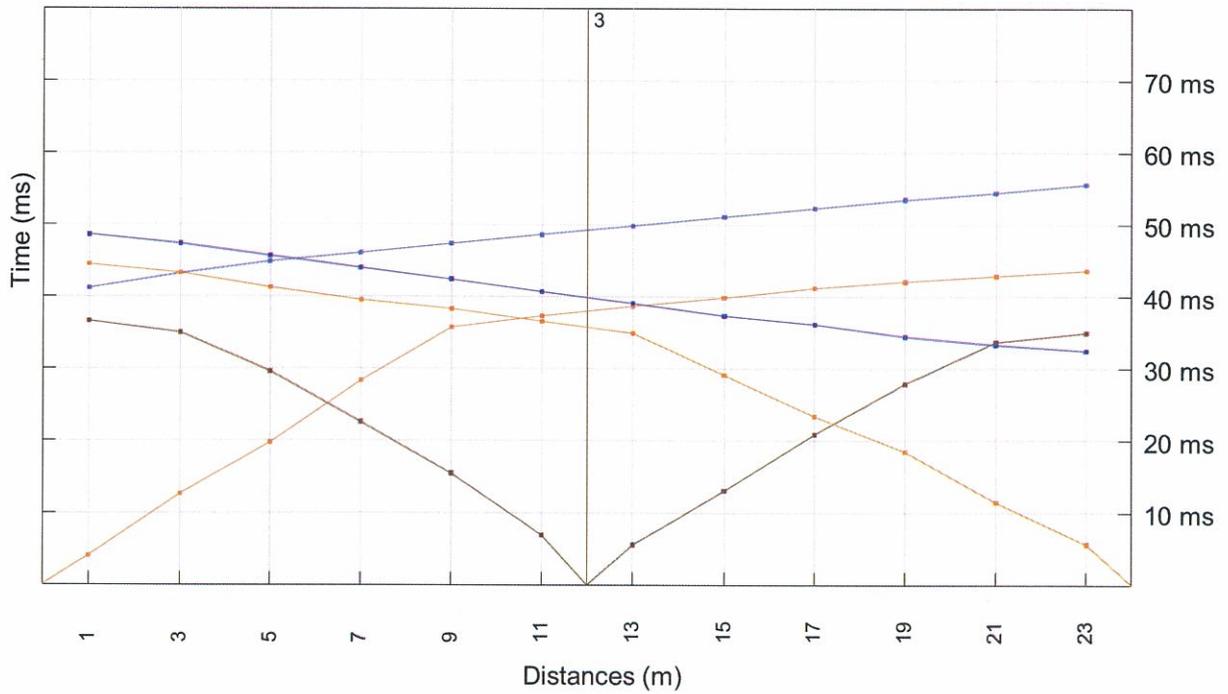
# TRAVERSA SISMICA TS54



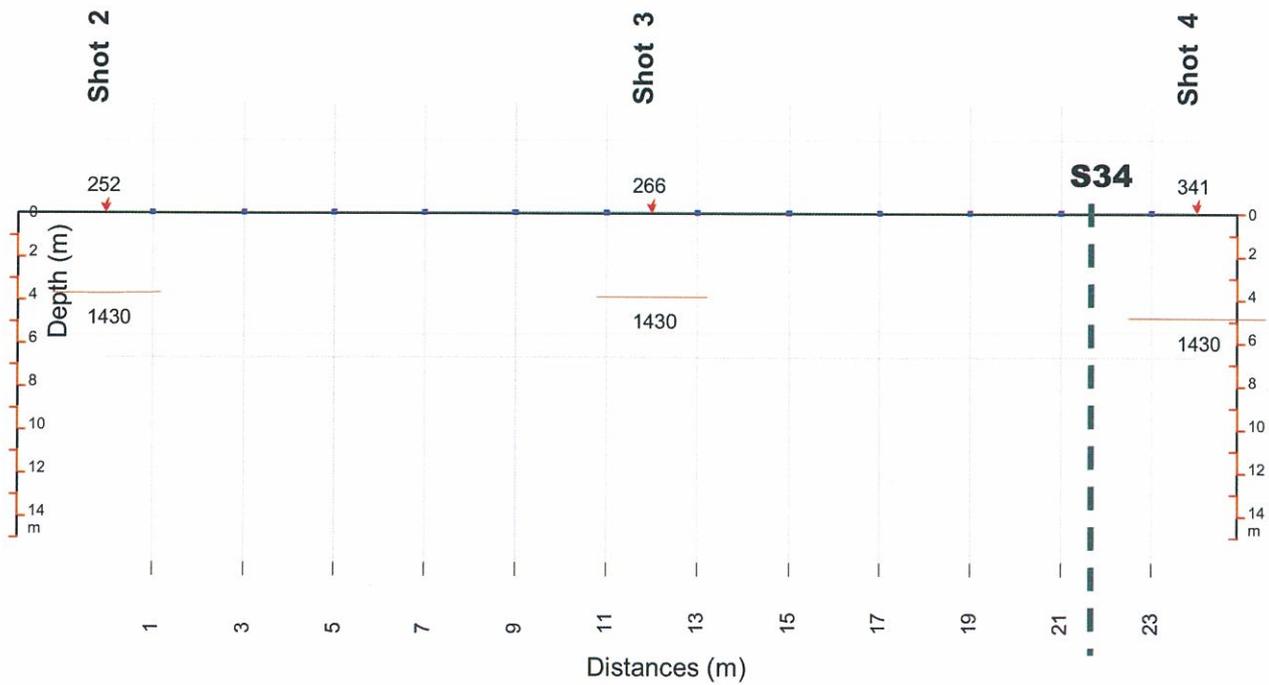
## DROMOCRONA

Nord-Est

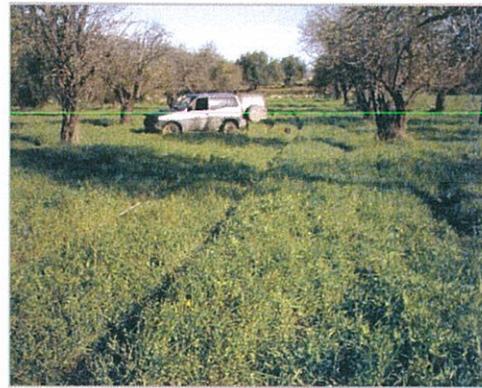
Sud-Ovest



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



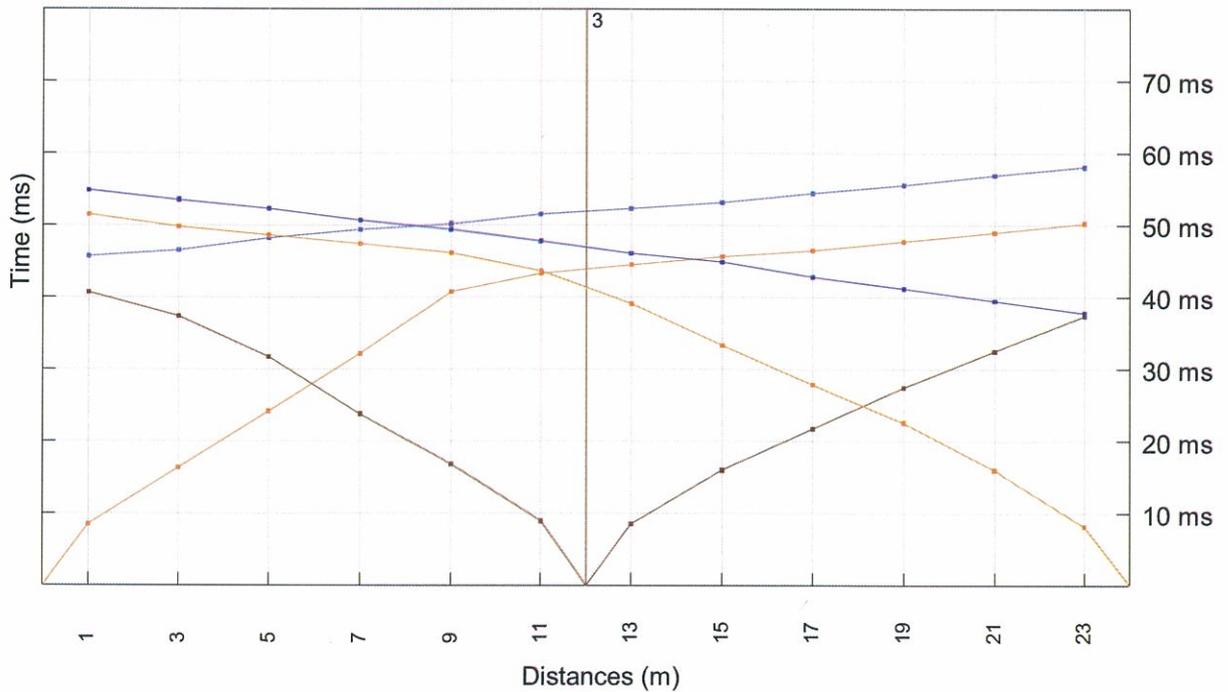
# TRAVERSA SISMICA TS55



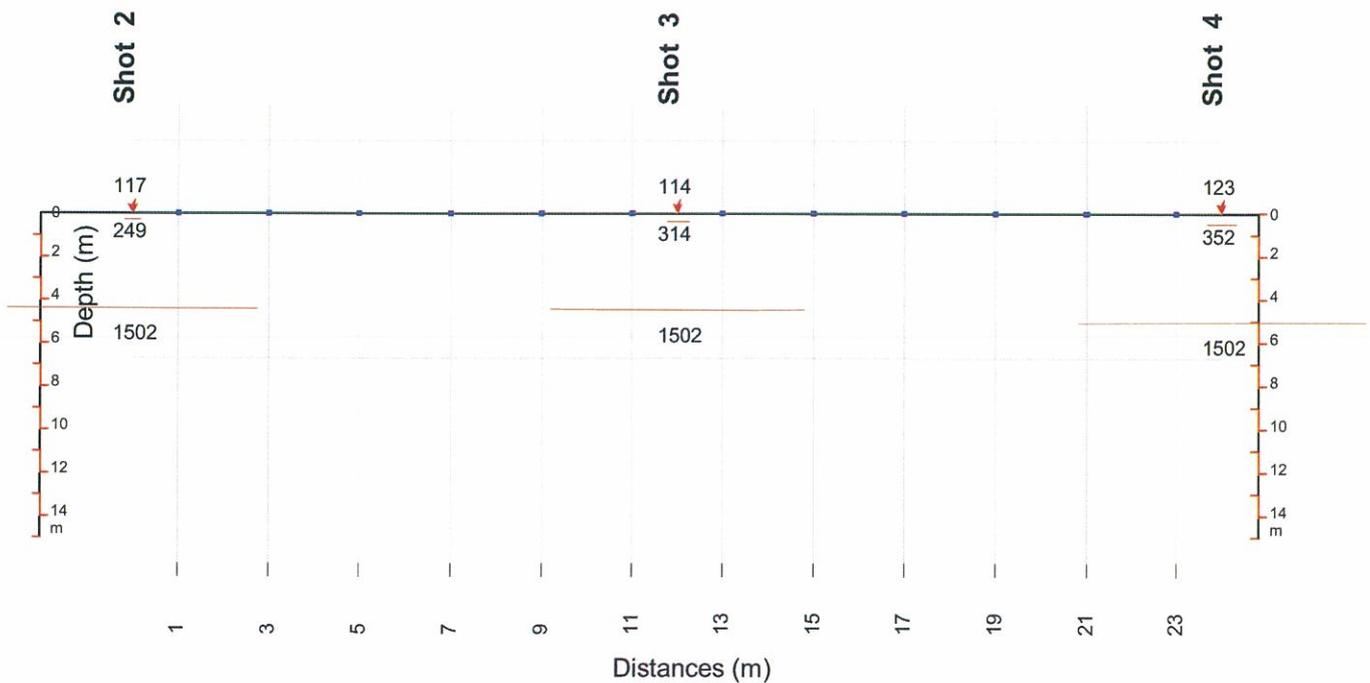
## DROMOCRONA

Nord-Est

Sud-Ovest



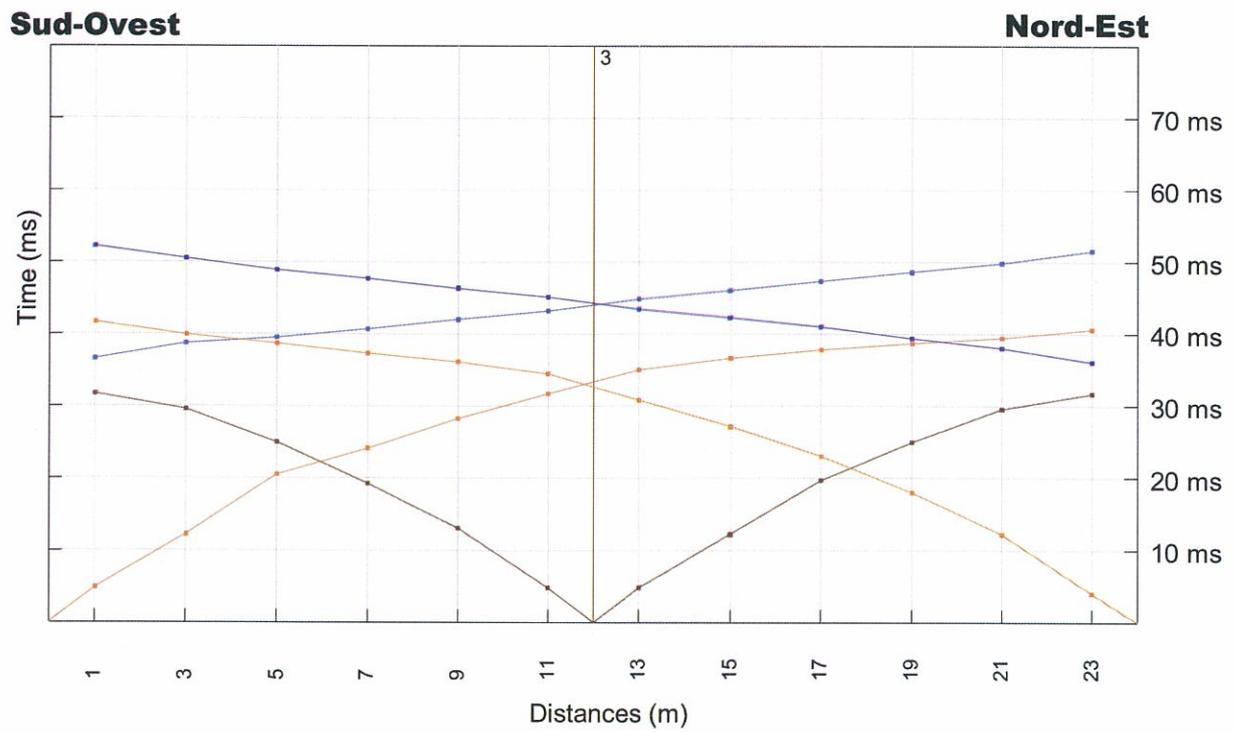
## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



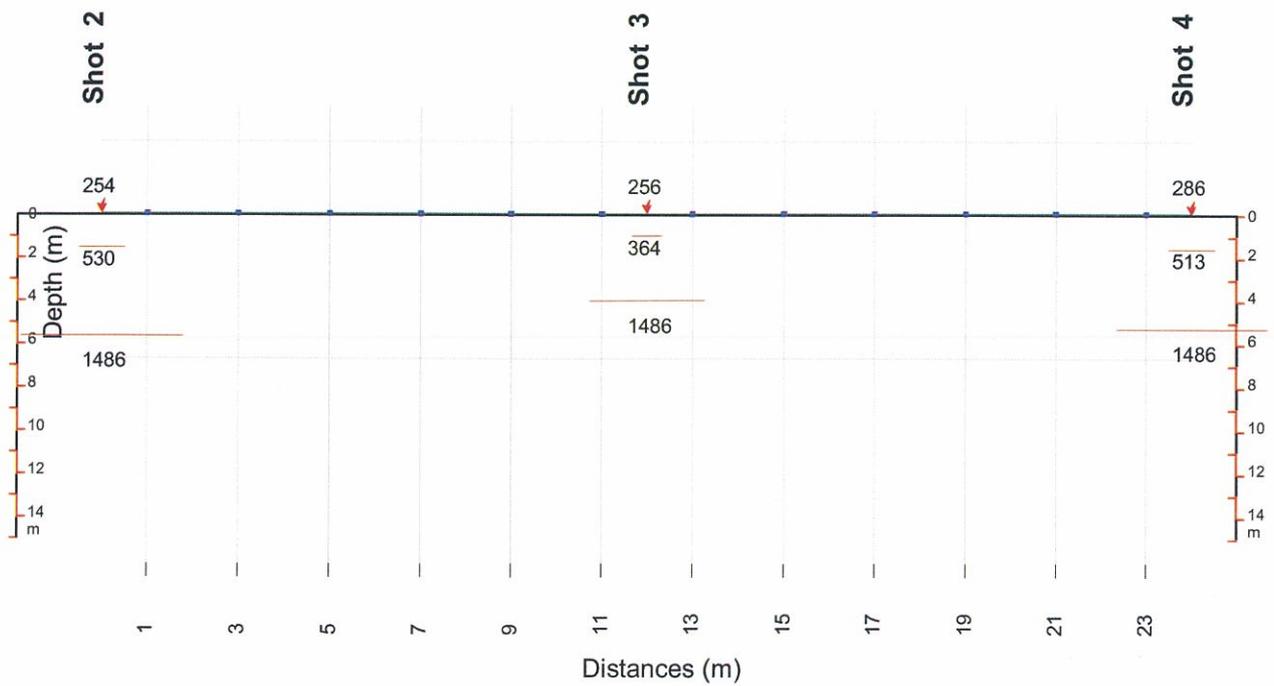
# TRAVERSA SISMICA TS56



## DROMOCRONA



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



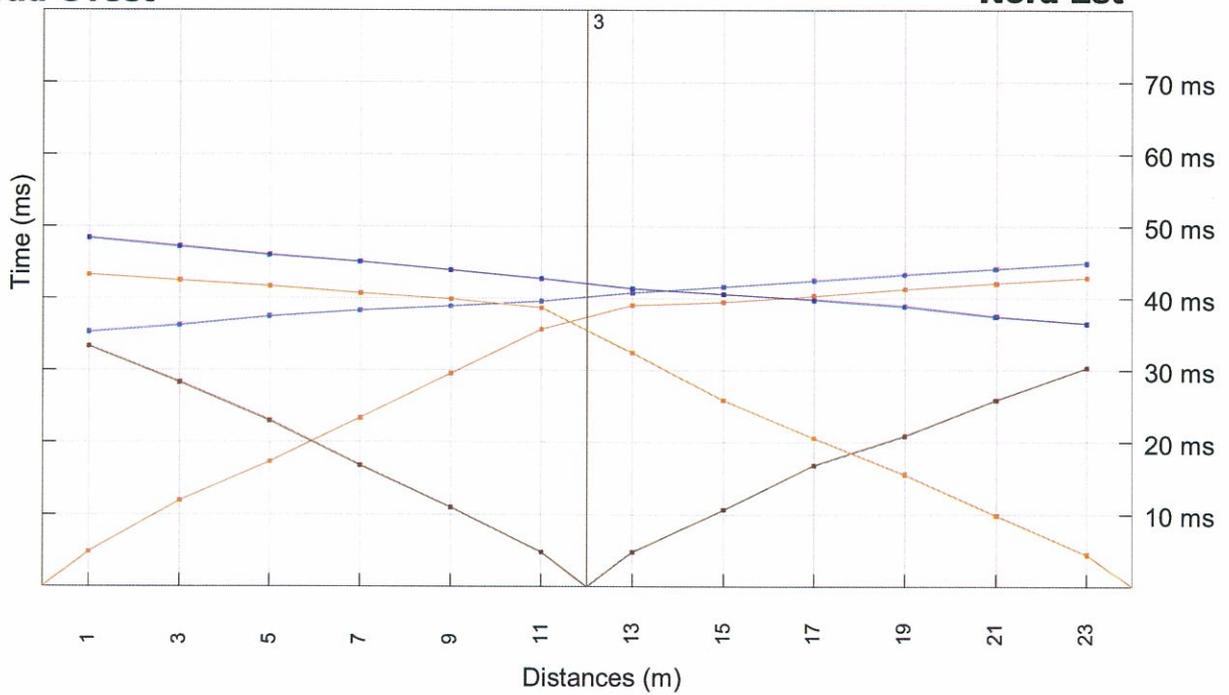
# TRAVERSA SISMICA TS57



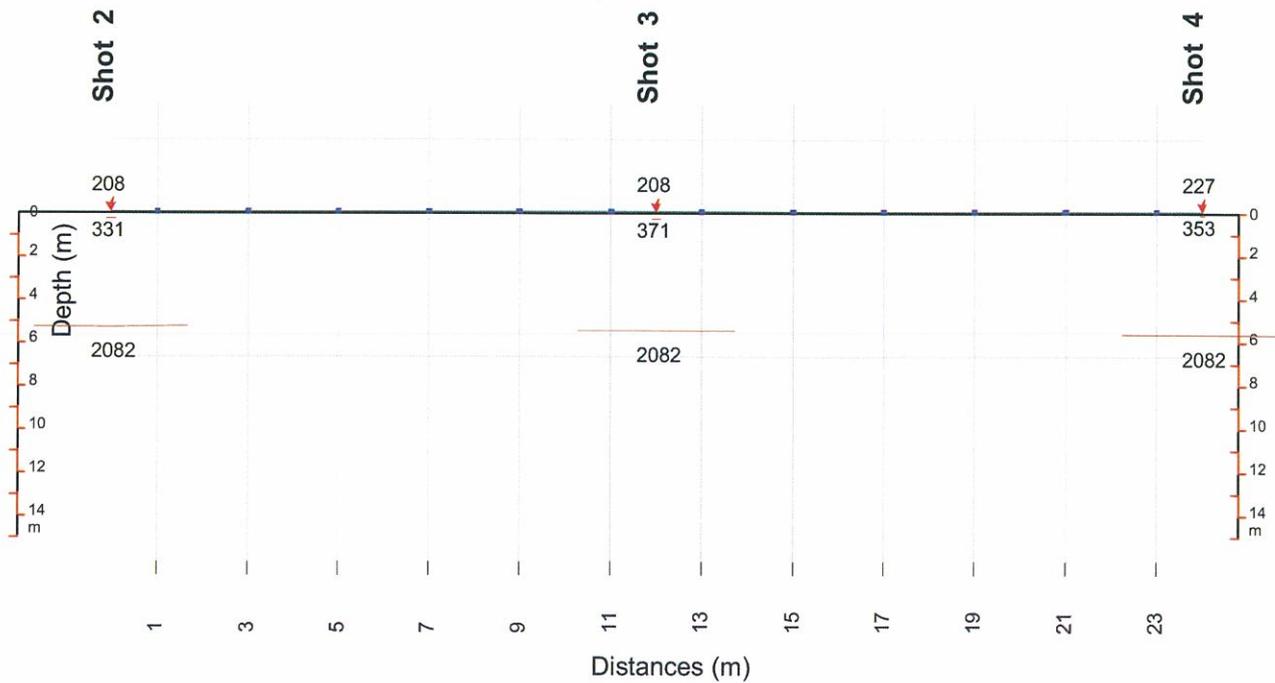
## DROMOCRONA

Sud-Ovest

Nord-Est



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



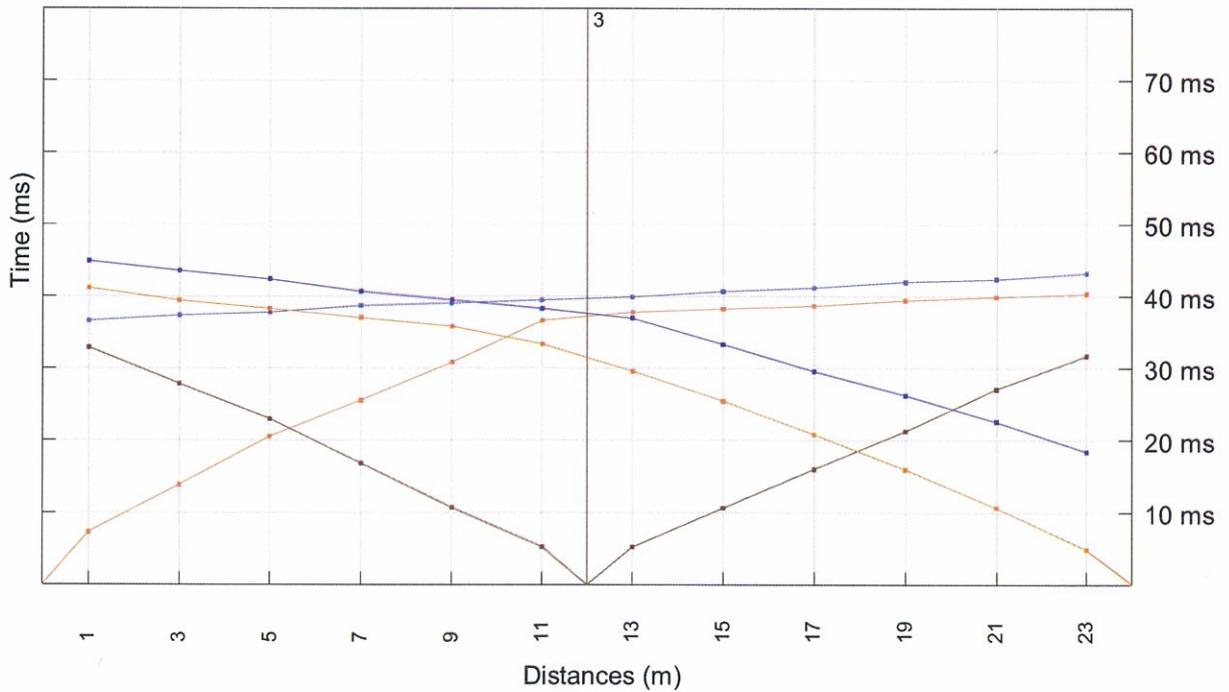
# TRAVERSA SISMICA TS58



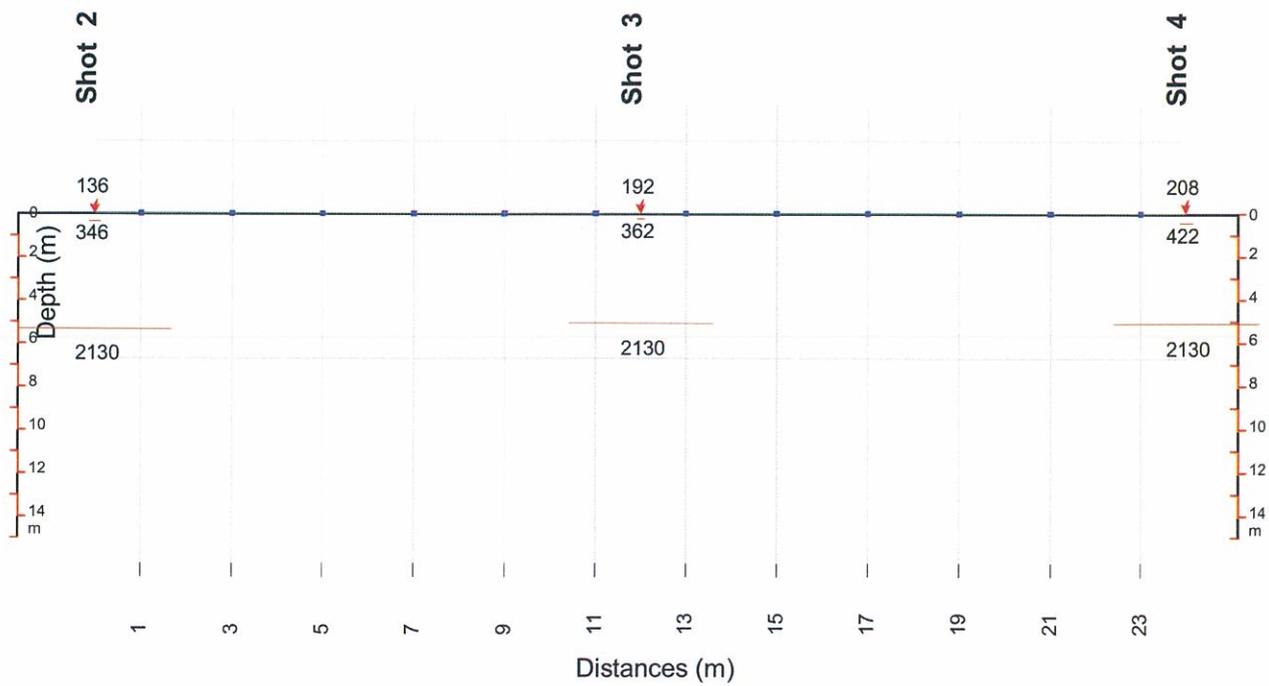
## DROMOCRONA

**Sud-Est**

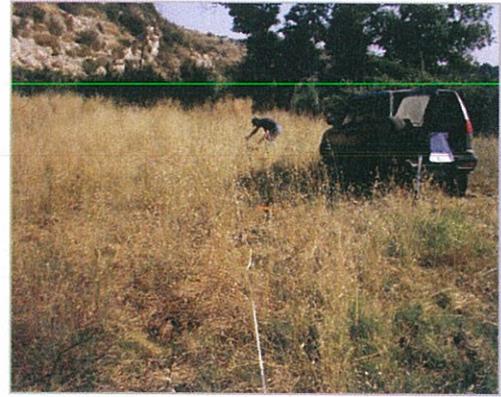
**Nord-Ovest**



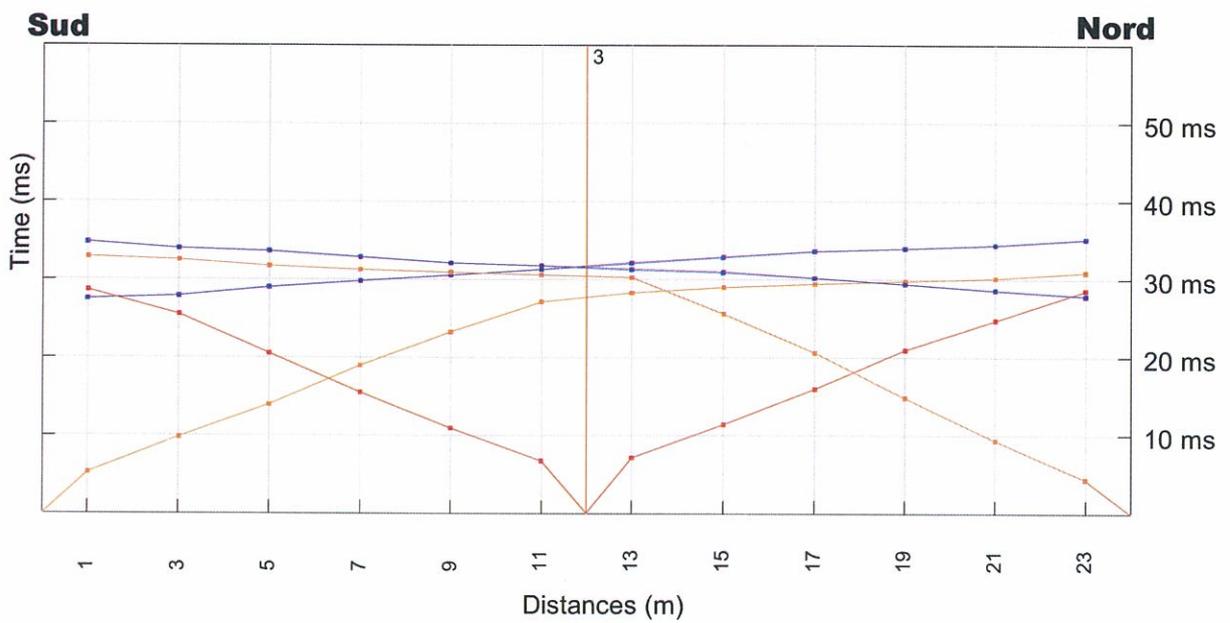
## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



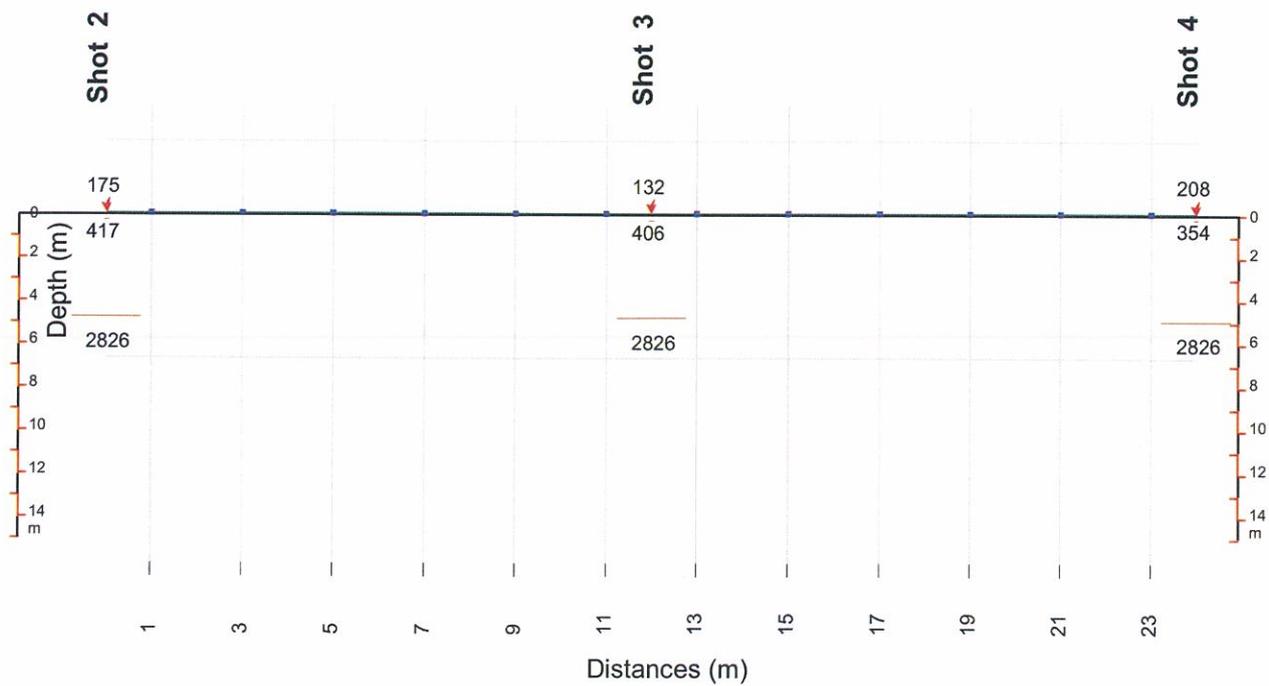
# TRAVERSA SISMICA TS58A



## DROMOCRONA



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



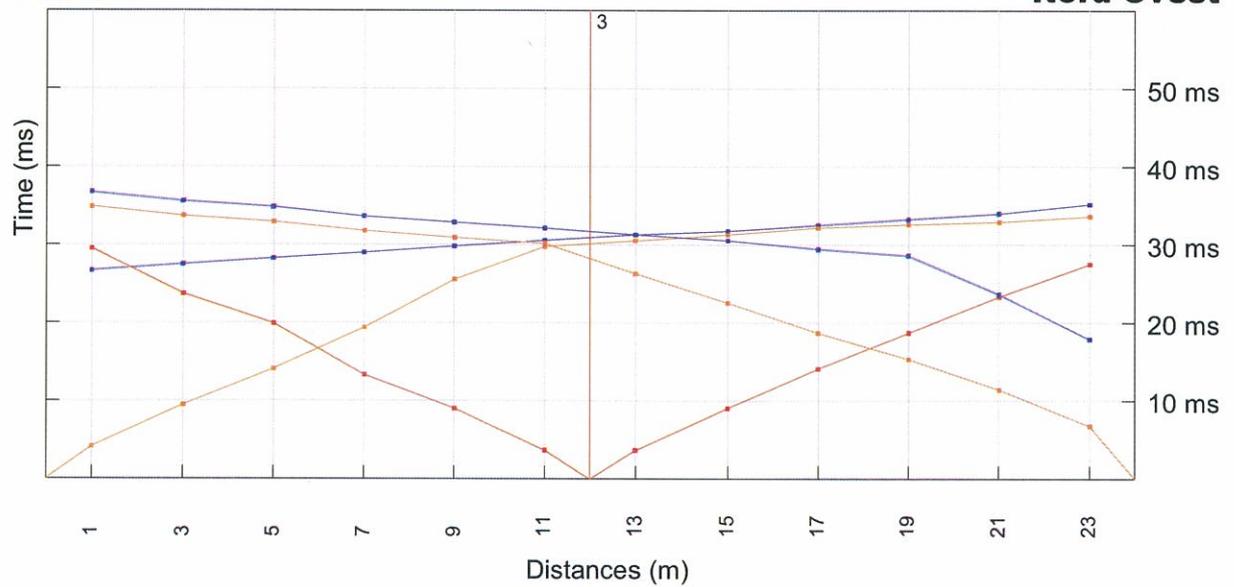
# TRAVERSA SISMICA TS58B



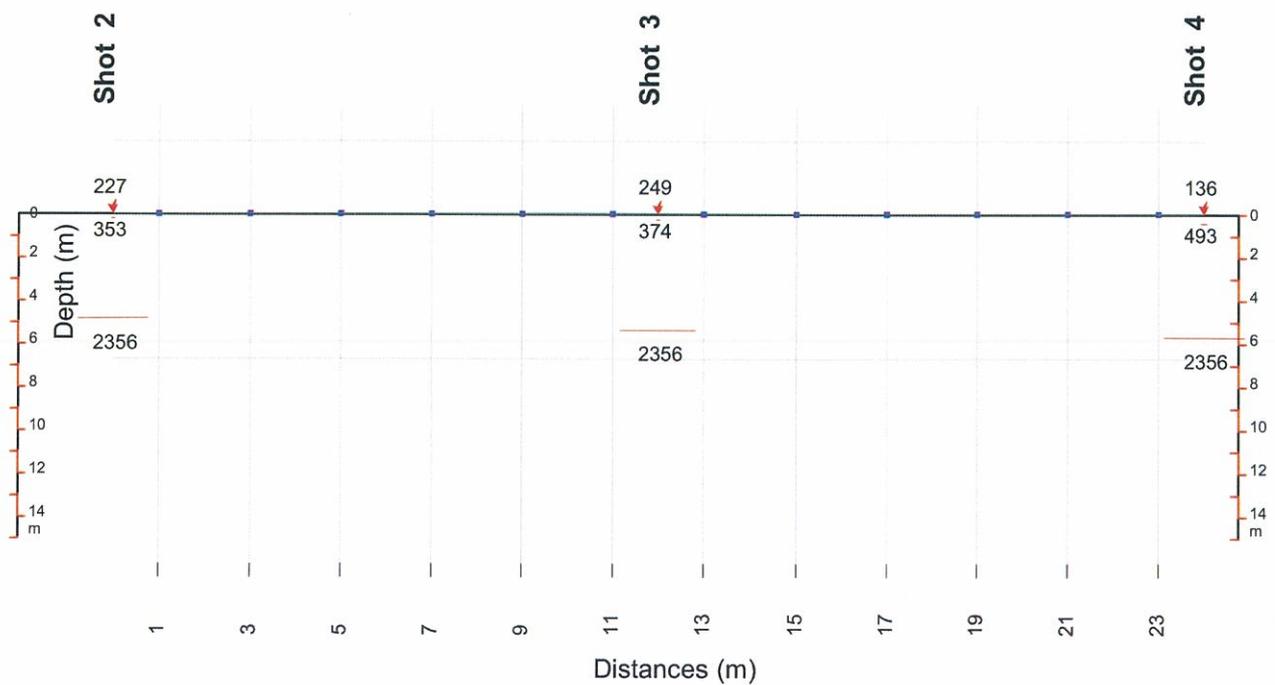
## DROMOCRONA

Sud-Est

Nord-Ovest



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



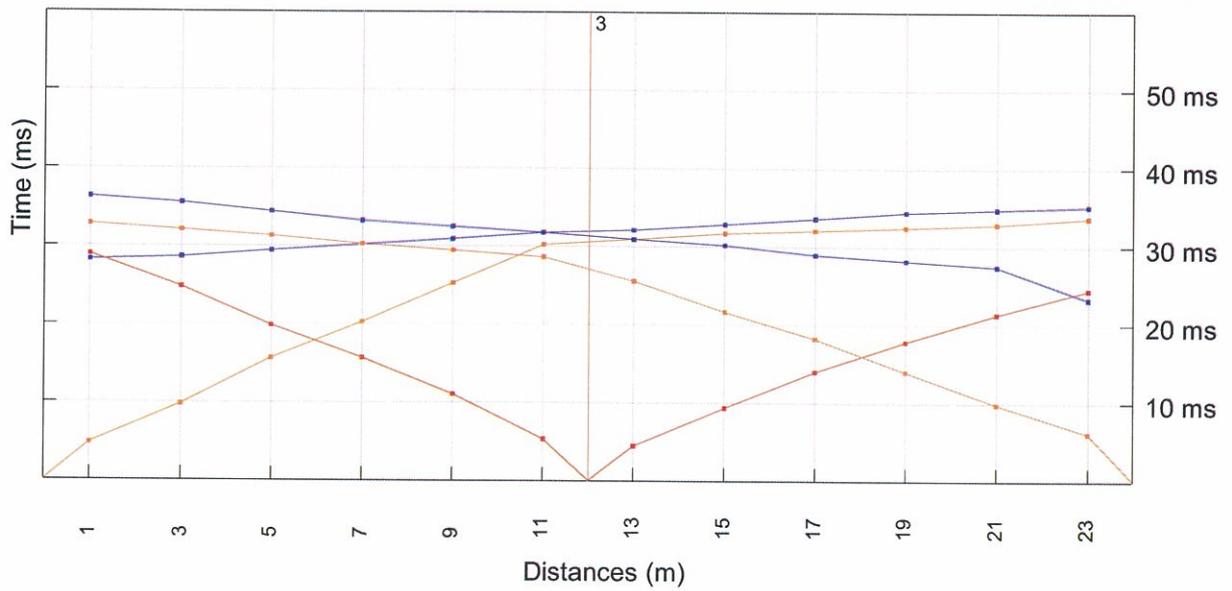
# TRAVERSA SISMICA TS58C



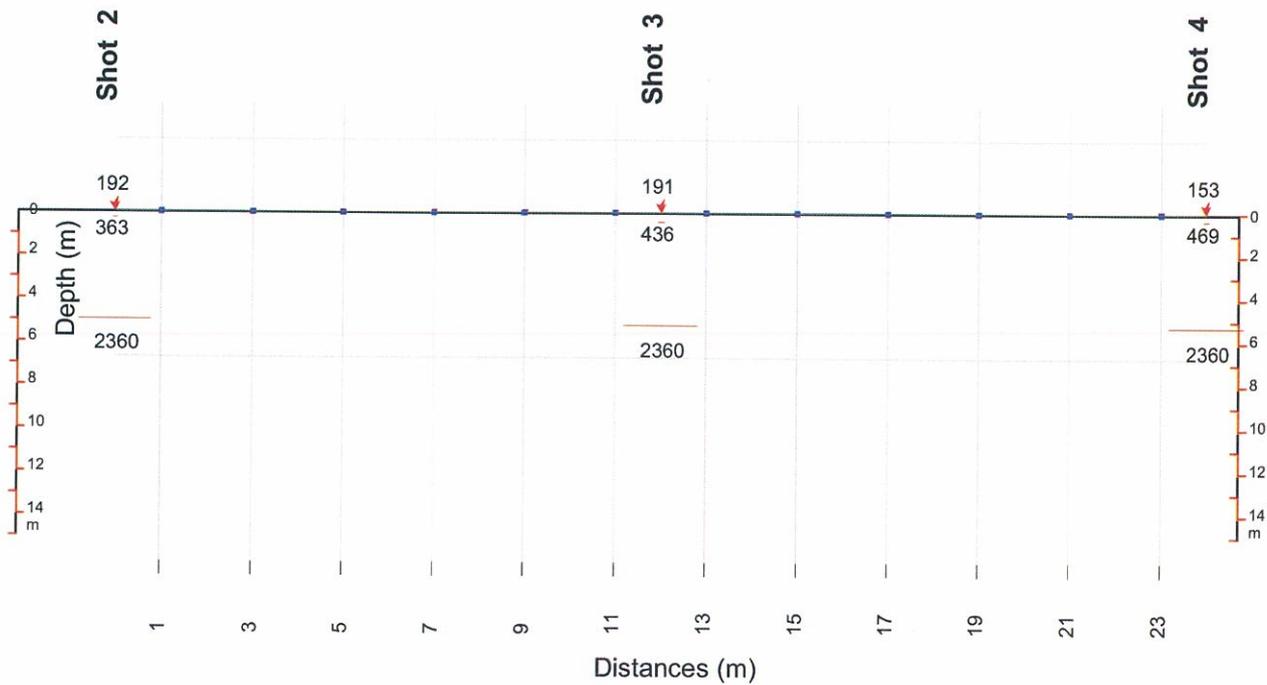
## DROMOCRONA

Sud-Est

Nord-Ovest



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



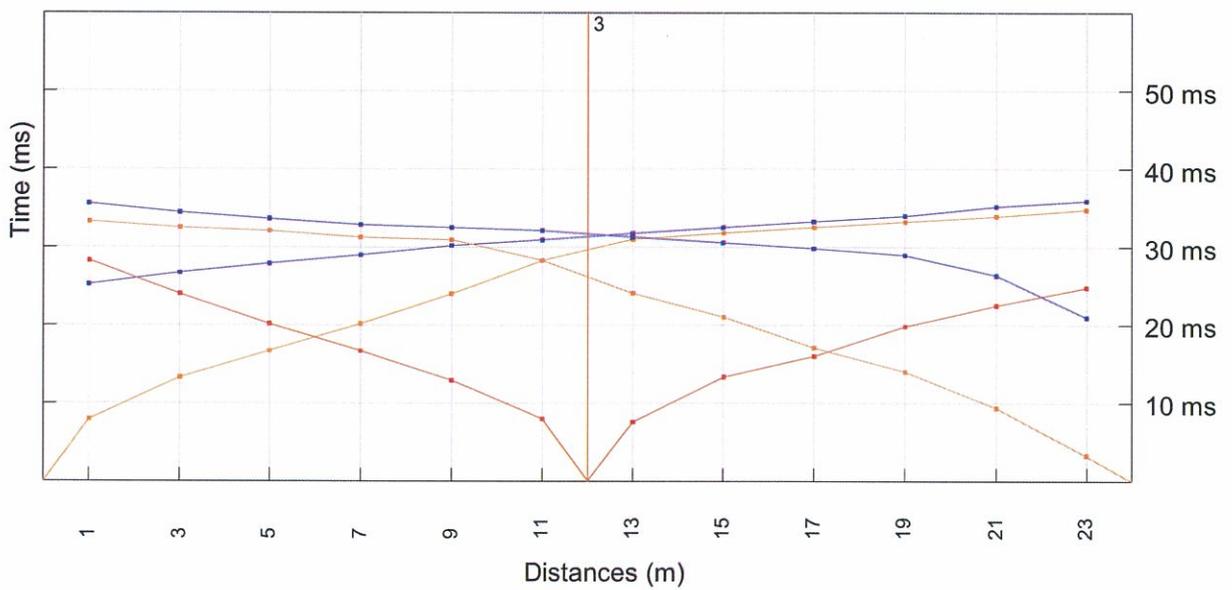
# TRAVERSA SISMICA TS58D



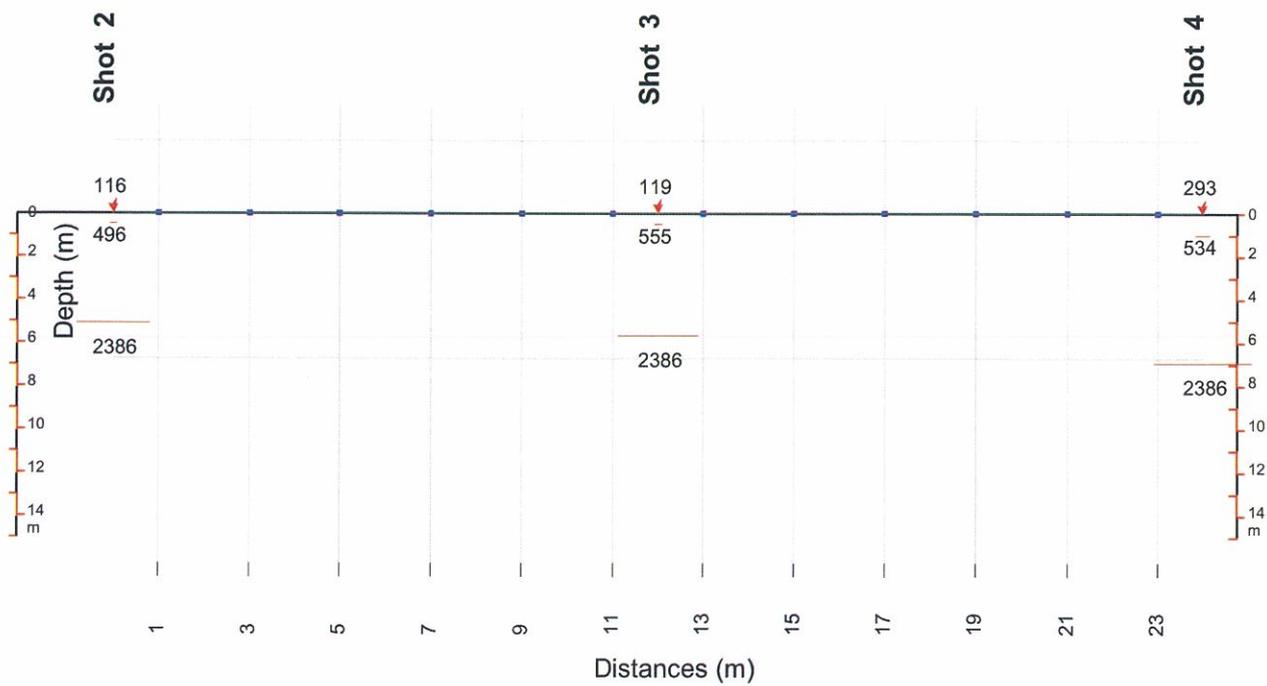
## DROMOCRONA

**Sud-Est**

**Nord-Ovest**



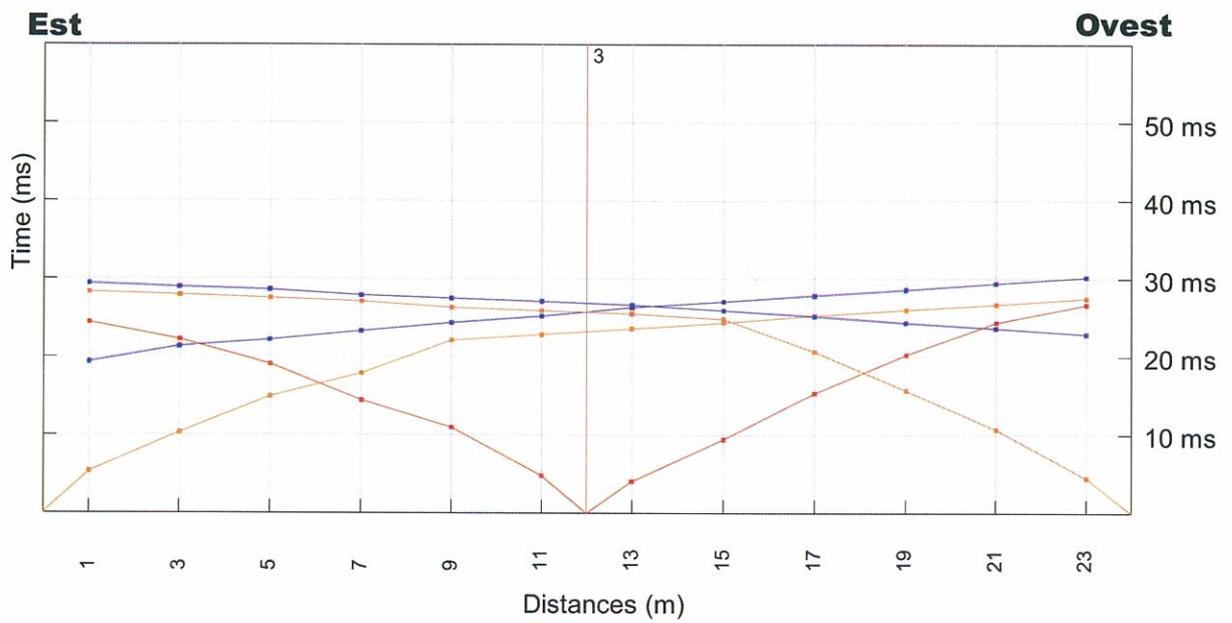
## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



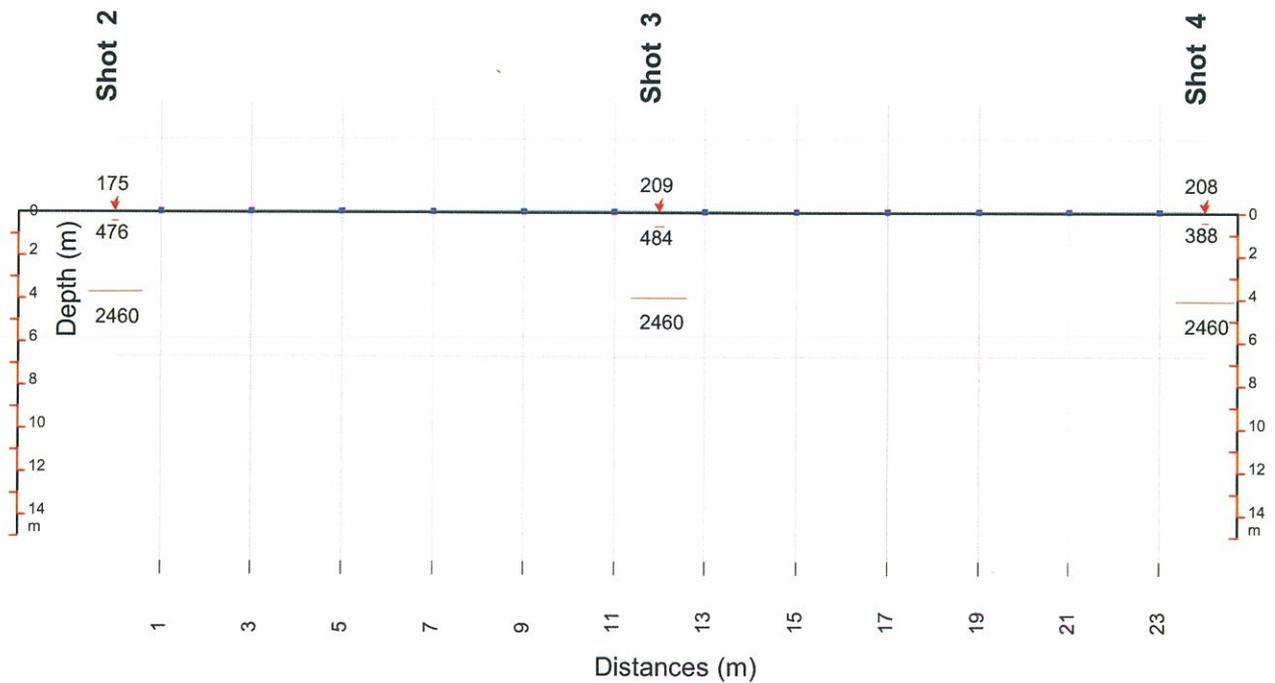
# TRAVERSA SISMICA TS58€



## DROMOCRONA



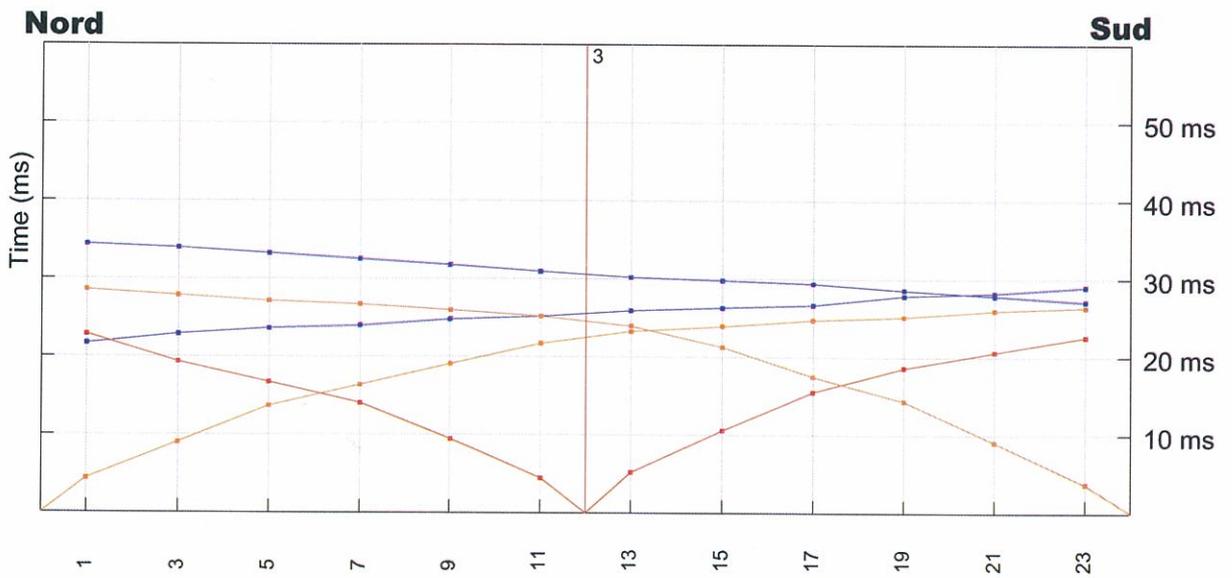
## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



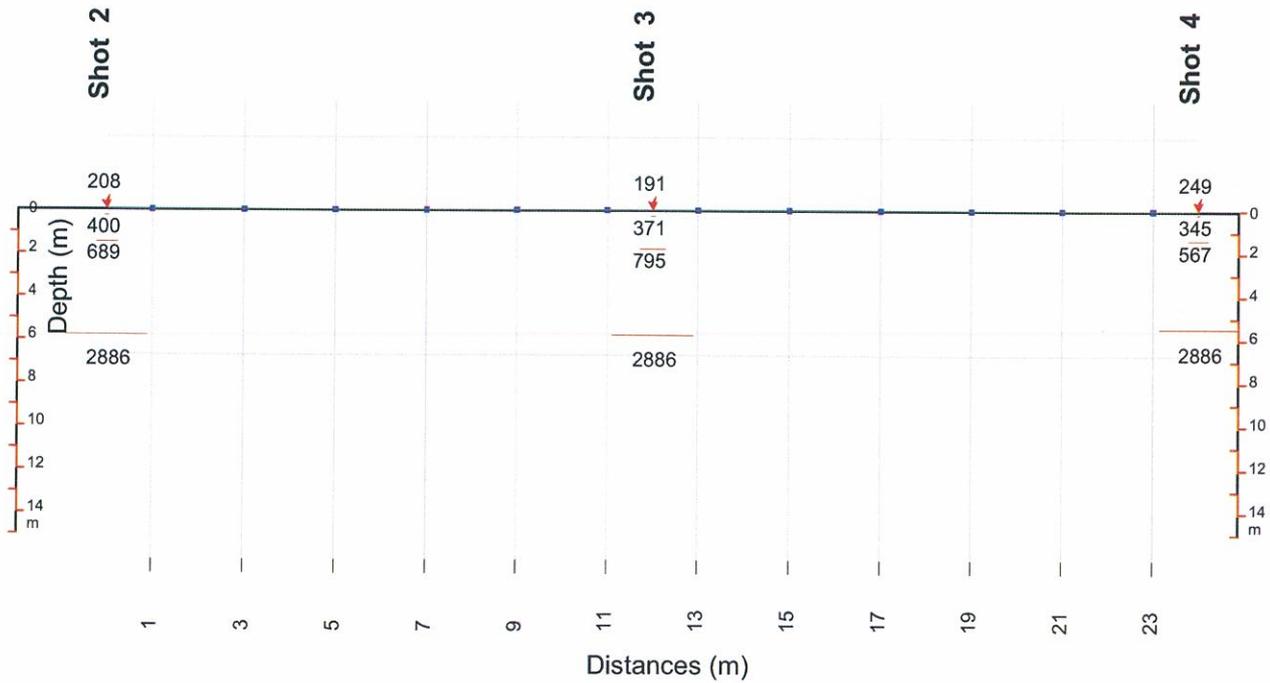
# TRAVERSA SISMICA TS58F

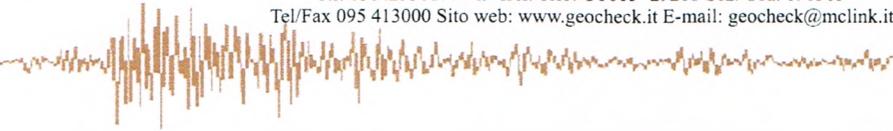


## DROMOCRONA



## Sezione Sismostratigrafica Interpretativa



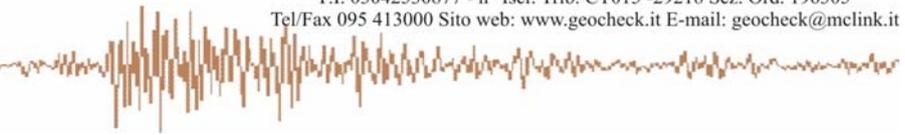


**PROVE GEOFISICHE ESEGUITE NEI LOTTI 10 ED 11  
 DELL'AUTOSTRADA SIRACUSA-GELA**

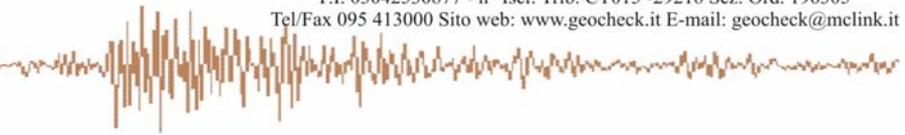


**RAPPORTO TECNICO DI PROVA  
 - LOTTO 10 "IRMINIO" -**

REV.	Data e località	Committente	Redatto	Controllato	Approvato	COMM.-JOB:
0	Nov. 2011 Scicli (RG)	TECHNITAL S.p.A.	Dr. G. Coco	Dr. G. Caruso	Dr. M. Corrao	IG_180_11_LT10
IL PRESENTE DOCUMENTO E' PROPRIETA' GEOCHECK S.r.l. A TERMINE DI LEGGE, OGNI DIRITTO E' RISERVATO						



INDICE	pag.
<b>1.0 Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2.0 TOMOGRAFIA SISMICA</b>	<b>4</b>
<i>Generalità</i>	4
<i>Metodologia e strumentazione utilizzata</i>	4
<i>Metodologia di calcolo - G. S. A. O. (Generalized Simulated-Annealing Optimization)</i>	5
<b>3.0 - PROVA SISMICA MULTICANALE MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)</b>	<b>6</b>
<i>Premessa</i>	6
<i>Strumentazione e configurazione geometrica utilizzata</i>	6
<i>Elaborazione dati</i>	7
<b>4.0 - DEFINIZIONE SUOLO TIPO</b>	<b>9</b>
<b>5.0 - RISULTATI</b>	<b>11</b>
<b>TOMOGRAFIA SISMICA TS4</b>	<b>12</b>
M.A.S.W. 1- <i>VS30</i>	16 19
M.A.S.W. 2- <i>VS30</i>	20 23
M.A.S.W. _3- <i>VS30</i>	24 27
M.A.S.W. 4- <i>VS30</i>	28 31



## 1.0 INTRODUZIONE

Oggetto del presente Rapporto tecnico sono le “*prove geofisiche eseguite nell’area dei lotti 10 e 11 dell’Autostrada Siracusa – Gela*”. In particolare, in questo report sono state raggruppate quelle relative al lotto10 “Irminio”.

In particolare, sono state eseguite:

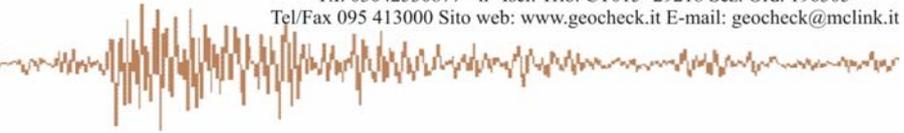
⇒ n° 1 Traversa sismica con elaborazione tomografica avente la seguente configurazione geometrica:

<b>Rif.</b> <b>Number</b>	<b>N° geofoni</b>	<b>Distanza</b> <b>intergeofonica (m)</b>	<b>Lunghezza</b> <b>complessiva(m)</b>	<b>Velocità onde</b> <b>misurate</b>
<b>TOMO S4</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>60</b>	<b>Vp</b>

⇒ n° 4 prove sismiche di superficie di tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

<b>Rif.</b> <b>Number</b>	<b>N° geofoni</b>	<b>Distanza</b> <b>intergeofonica (m)</b>	<b>Lunghezza</b> <b>complessiva(m)</b>	<b>Velocità onde</b> <b>calcolata</b>
<b>MASW_1</b>	<b>24</b>	<b>1.5</b>	<b>36</b>	<b>Vs</b>
<b>MASW_2</b>	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>60</b>	<b>Vs</b>
<b>MASW_3</b>	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>60</b>	<b>Vs</b>
<b>MASW_4</b>	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>60</b>	<b>Vs</b>

Le ubicazioni delle indagini si riportano unitamente ai risultati delle prove eseguite.



## 2.0 TOMOGRAFIA SISMICA

### *Generalità*

La tomografia sismica assiale di superficie è una tecnica che consente la ricostruzione in immagini della struttura interna del terreno, mediante l'impiego dei travel-time delle onde sismiche che si propagano dalla superficie.

Lo scopo è di determinare un dettagliato andamento della distribuzione della velocità delle onde sismiche longitudinali nel sottosuolo.

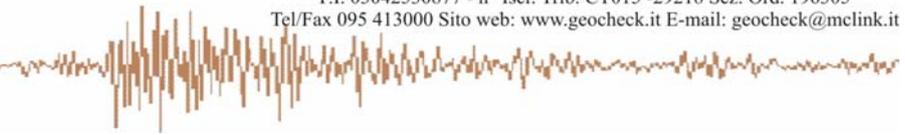
### *Metodologia e strumentazione utilizzata*

La metodologia adottata si avvale di un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni "base distante in linea".

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale MAE A6000S, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00003 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" (time break)
- filtri High Pass e Band Reject
- "Automatic Gain Control"
- convertitore A/D a 24 bit.

Le onde di compressione P sono state generate mediante esploditore sismico a cartucce industriali cal. 8.



*Metodologia di calcolo - G. S. A. O. (Generalized Simulated-Annealing Optimization)*

Il G.S.A.O. è un modello di calcolo che consente l'ottimizzazione non lineare dell'inversione dei tempi di primo arrivo delle fasi dirette e rifratte delle onde sismiche registrate durante una prospezione sismica superficiale a rifrazione.

Il vantaggio di tale tecnica è nell'assoluta indipendenza dal modello iniziale di velocità.

Le fasi di calcolo che sono eseguite nel processo d'elaborazione dei dati, possono essere così sintetizzate:

□ Calcolo dei travel-time attraverso un modello iniziale di velocità e determinazione dell'errore minimo quadrato ( $E_0 = \text{least-square error}$ ), tra il travel-time calcolato e quello osservato. Per ogni iterazione  $i$  è possibile definire il "least-square error" secondo la formula:

$$E_i = \frac{1}{N} \left[ \sum_{j=1}^N (t_j^{obs} - t_j^{cal})^2 \right] \quad (1)$$

dove  $N$  è il numero di campioni,  $j$  denota ogni osservazione, e  $t^{obs}$  e  $t^{cal}$  sono rispettivamente il tempo osservato e calcolato.

□ Perturbazione del modello di velocità mediante l'inserimento di una costante di velocità casuale, mantenendo la non linearità del sistema, e calcolo del nuovo "least - square error"  $E_1$ .

□ Determinazione della probabilità  $P$  di ammettere il nuovo modello (cioè che il modello sia accettabile):

$$\mathbf{P = 1; \quad E_1 \leq E_0} \quad (2)$$

$$P = P_c = \exp \left[ \frac{(E_{min} - E_1)^q \Delta E}{T} \right]; \quad E_1 > E_0 \quad (3)$$

dove  $P_c$  è la probabilità di accettare la condizione (è una costante d'integrazione che si determina empiricamente) ed  $E_{min}$  è il valore oggettivo della funzione dei minimi totali. Teoricamente si ha che  $E_{min} = 0$ .

L'equazione (2), media tutti i valori accettati dal nuovo modello, laddove l'errore minimo quadrato (least-square error) è minore nell'iterazione prevista. Ciò consente, durante l'inversione dei dati, di sfuggire dall'intorno dei minimi, andando alla ricerca del minimo globale.

□ Ripetizione delle inversioni fino al raggiungimento della convergenza richiesta tra la differenza dell'errore minimo quadrato ed il successivo modello e la probabilità di accettare nuovi modelli di velocità a minimo errore.

---

### 3. 0 - PROVA SISMICA MULTICANALE MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES)

#### *Premessa*

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

#### *Strumentazione e configurazione geometrica utilizzata*

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale MAE A6000S, avente le seguenti caratteristiche tecniche :

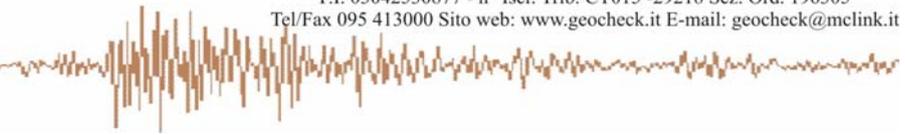
- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00003 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" (time break);
- filtri High Pass e Band Reject;
- "Automatic Gain Control";
- convertitore A/D a 24 bit.

La configurazione spaziale in sito è equivalente ad un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni "base distante in linea". In particolare è stato utilizzato il seguente set-up:

- geofoni ad asse di oscillazione verticale;
- MASW\_1 Nr.12 (Gx) 3 metri;
- MASW\_2, 3;4 Nr.24 (Gx) 2 metri;
- Per tutte energizzazioni in A/R;
- Per tutte passo di campionatura pari a 1000 Hz;
- Per tutte lunghezza delle tracce sismiche pari a 4.096 sec;
- Per tutte massa battente pesante di 10 Kg.

Tale configurazione ha consentito di mitigare gli effetti near-field dovuti alle onde di volume ed ha altresì consentito di avere le seguenti risoluzioni spazio-temporali:

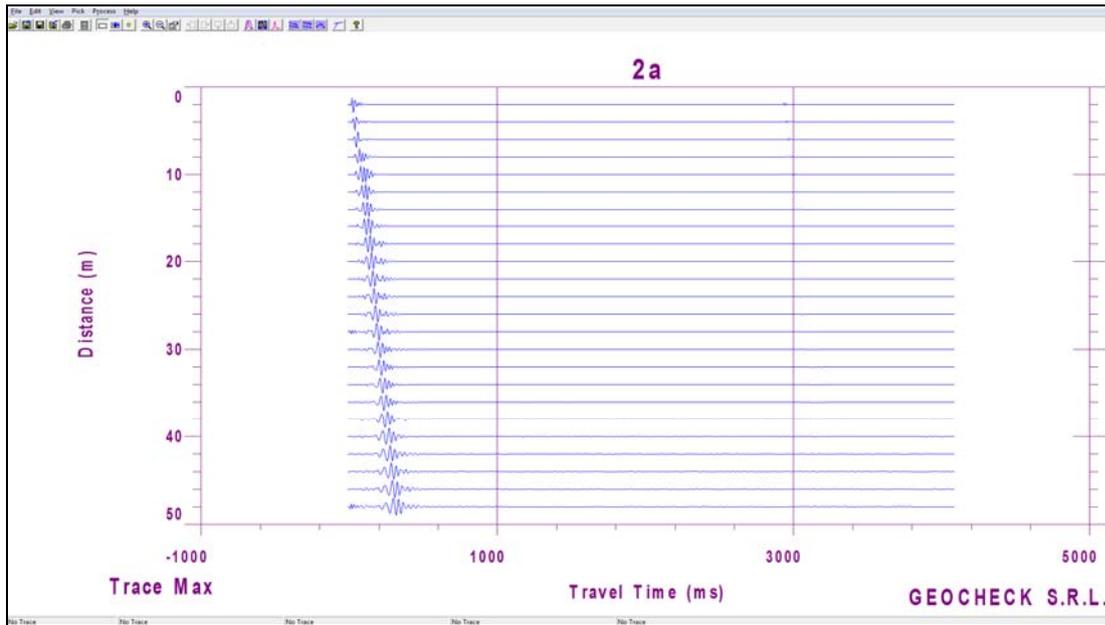
MASW\_1  $k$  0174  $m^{-1}$  Freq. 0.244 Hz ; MASW\_2, 3 e 4  $k$  0.1308  $m^{-1}$  Freq. 0.244 Hz.



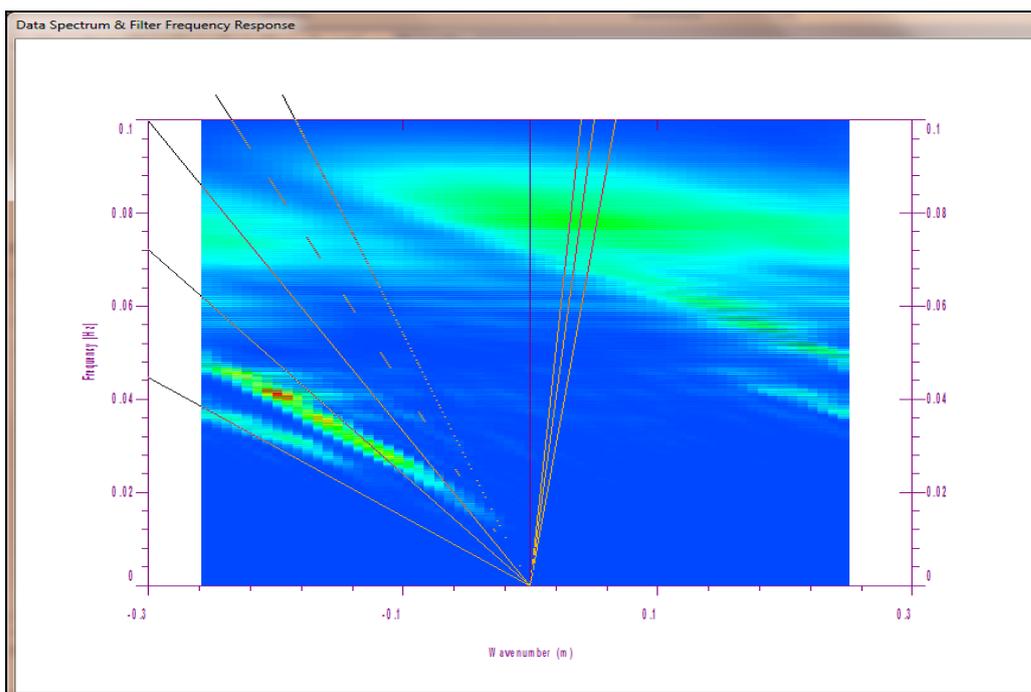
*Elaborazione dati*

L'analisi MASW può essere ricondotta in quattro fasi:

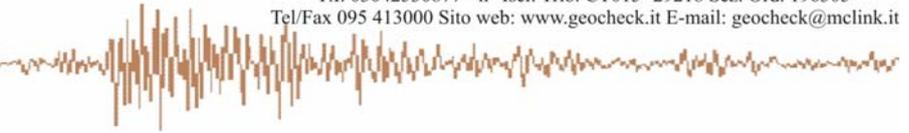
- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali (fig. 1) nel dominio frequenza  $f$  – numero d'onda  $K$  (fig. 2);



**Figura 1.** Serie temporali prova MASW\_TS2 offset 3 metri.



**Figura 2.** Analisi dominio  $f$ - $k$ .



- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie f-k cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale). Attraverso tali punti applicando la (1) si ottiene la curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano  $V_{fase}$  (m/s) – frequenza (Hz) (figure.7-11-15-19) .

$$V_R(\omega) = \frac{2\pi f}{k_{MAX}} \quad (1)$$

- la terza fase consiste nel calcolo della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore h, le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$ , la densità di massa  $\rho$  degli strati che costituiscono il modello del suolo (figure. 8-12-16-20);
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo (fig. 9-13-17-21).

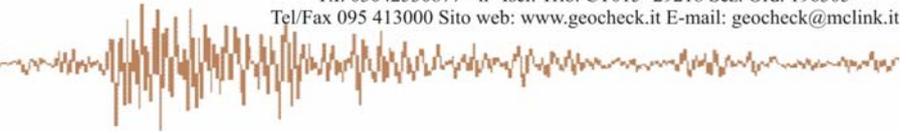
#### 4.0 - DEFINIZIONE SUOLO TIPO

Il DM 14/01/2008 definisce l'azione sismica di progetto, in assenza di analisi specifiche, sulla base della zona sismica di appartenenza del sito e la categoria sismica di suolo su cui sarà realizzata l'opera. La norma suddivide il territorio nazionale in zone sismiche, contraddistinte dal valore  $a_g$  dell'accelerazione di picco al suolo, normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità. I valori convenzionali di  $a_g$  assegnati alle aree sismiche fanno riferimento all'accelerazione di picco in superficie per suolo di tipo A, cioè roccia affiorante o suolo omogeneo molto rigido (vedi **tabella 3.**), per il quale il moto sismico al bedrock non subisce variazioni sostanziali.

CATEGORIA SOTTOSUOLO	DESCRIZIONE
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>E</b>	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).
<b>S1</b>	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < cu_{,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
<b>S2</b>	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

**Tabella 3.** "Range"  $V_{s30}$  da normativa DM 14/01/2008.

In presenza di suoli di tipo B, C, D E, S1, S2 il moto sismico in superficie in genere risulta modificato rispetto al moto sismico al bedrock, in funzione dell'intensità e del contenuto in frequenza dell'input sismico e delle caratteristiche geotecniche sismiche e dello spessore del suolo attraversato dalle onde sismiche per giungere in superficie.



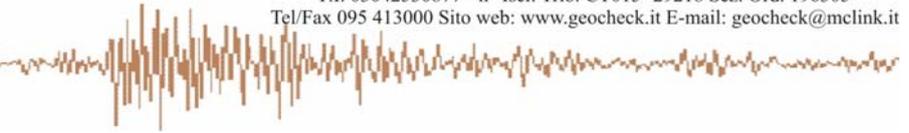
In assenza di una specifica analisi di amplificazione sismica locale per il suolo in esame, per valutare l'accelerazione sismica spettrale in presenza di suoli di tipo B, C, D E la normativa introduce un fattore di amplificazione S e i periodi T che definiscono lo spettro di risposta di un oscillatore semplice con smorzamento pari al 5%. In presenza di suoli speciali di tipo S1 e S2 la normativa impone uno studio specifico per determinare gli effetti di amplificazione sismica locale.

La classificazione del suolo è convenzionalmente eseguita sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30m di profondità:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove

$V_i$  e  $h_i$  sono la velocità delle onde di taglio verticali e lo spessore dello strato i-esimo.



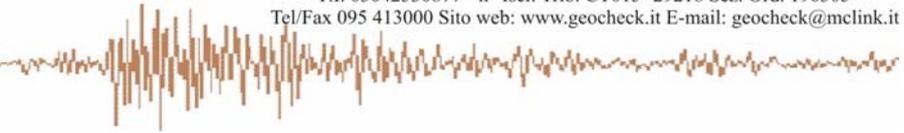
---

## 5.0 - RISULTATI<sup>1</sup>

Di seguito si riportano i risultati delle prove sismiche. Tali risultati constano nell'analisi tomografica dei dati sismici a rifrazione, nella definizione del profilo di velocità delle onde di taglio (prova MASW) e nel calcolo del parametro VS30<sup>2</sup>. In particolare, per quel che concerne la tomografia sismica i risultati consistono nella restituzione dell'immagine sismica del sottosuolo espressa in termini di velocità di propagazione delle onde sismiche P (modello di velocità), di densità di raggi sismici (modello della densità dei raggi sismici) e della sezione sismica interpretata.

---

<sup>2</sup> Il valore del VS30 è stato calcolato dal piano campagna.



## ***TOMOGRAFIA SISMICA TS4***

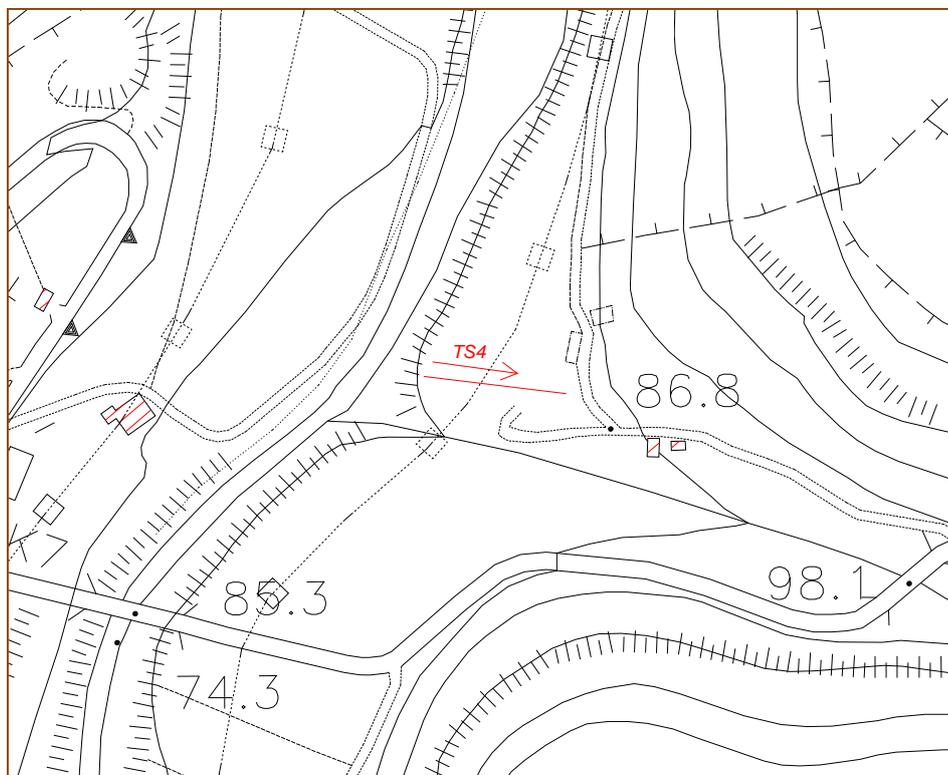
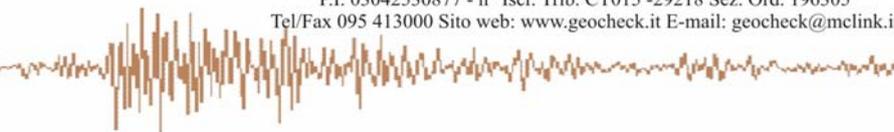
Dalla prova è emerso che la velocità risulta compresa tra 201 m/s e 2614 m/s e che tale variazione, raggruppata in sismostrati e rappresentati con diverse gamme cromatiche (figura 3), è prevalentemente verticale (sezione sismica interpretata) ed è attribuibile al passaggio tra le alluvioni e i sottostanti calcari diversamente fratturati ed alterati. L'andamento morfo-strutturale del substrato è sub-orizzontale. La velocità delle onde sismiche di compressione ( $V_p$ ) calcolata è distribuita in un "range" compreso tra 201 m/s e 2614 m/s, mentre la profondità d'investigazione massima raggiunta è stata di circa 17 metri.

Le velocità delle onde sismiche sono state raggruppate in 4 sismostrati il cui andamento morfologico risulta regolare.

Nel dettaglio, i sismostrati possono essere così descritti:

- **$V_p < 1000 \text{ m/s}$**   $\Rightarrow$  1° sismostrato. Si presenta in maniera continua nella sezione tomografica con spessore di circa 4 metri. La porzione con velocità  $< 750 \text{ m/s}$  è riferibile al detrito di copertura e/o alluvioni scarsamente addensate, mentre i termini con velocità compresa tra 750 e 1000 m/s possono essere attribuiti a depositi alluvionali addensati.
- **$1001 < V_p < 1500 \text{ m/s}$**   $\Rightarrow$  2° sismostrato. È in continuità laterale con il primo sismostrato e ha uno spessore di circa 3.5 metri. È riferibile ad alluvioni addensate.
- **$1501 < V_p < 2000 \text{ m/s}$**   $\Rightarrow$  3° sismostrato. Ha uno spessore piuttosto esiguo e costituisce la porzione alterate dei sottostanti calcari. Per tale motivo, tale sismostrato può essere considerato come una "zona di transizione al sottostante sismostrato. La sua morfo-struttura risulta regolare
- **$V_p > 2001 \text{ m/s}$**   $\Rightarrow$  4° sismostrato. Rappresenta i calcari compatti.

La sezione densità raggi sismici mostra la presenza di un orizzonte sismico che coincide con il tetto del quarto sismostrato.



**Coord. Geografiche**

**Inizio:**

LAT 36.81511°  
LONG 14.64846°

**Fine:**

LAT 36.81506°  
LONG 14.64902°

**Quota:**

85m s.l.m.

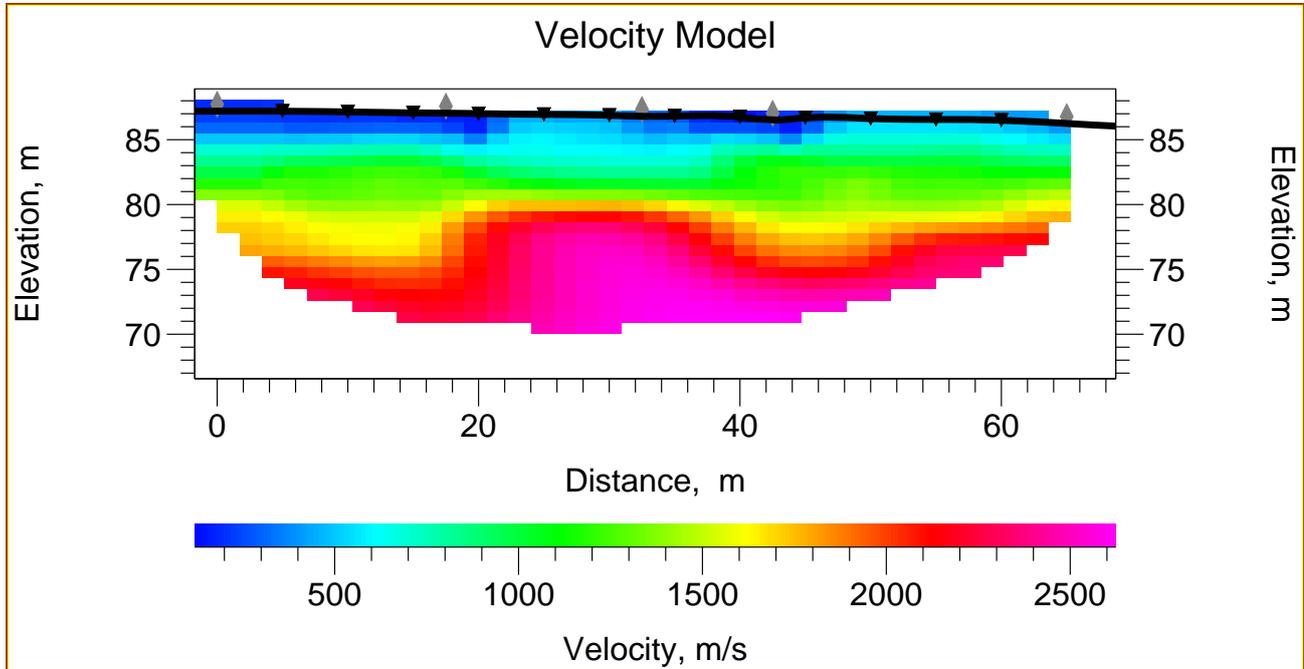
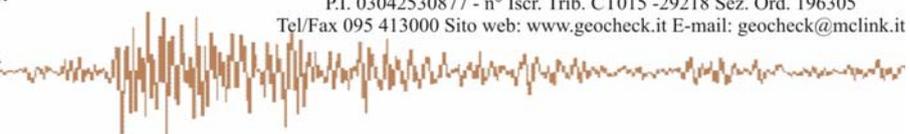
**Lunghezza**

**stendimento:**

60ml



**Figura 3.** Ubicazione prova e documentazione fotografica – TS4



**Figura 4.** Modello di velocità onde P - rappresentazione a pixel- TOMO S4

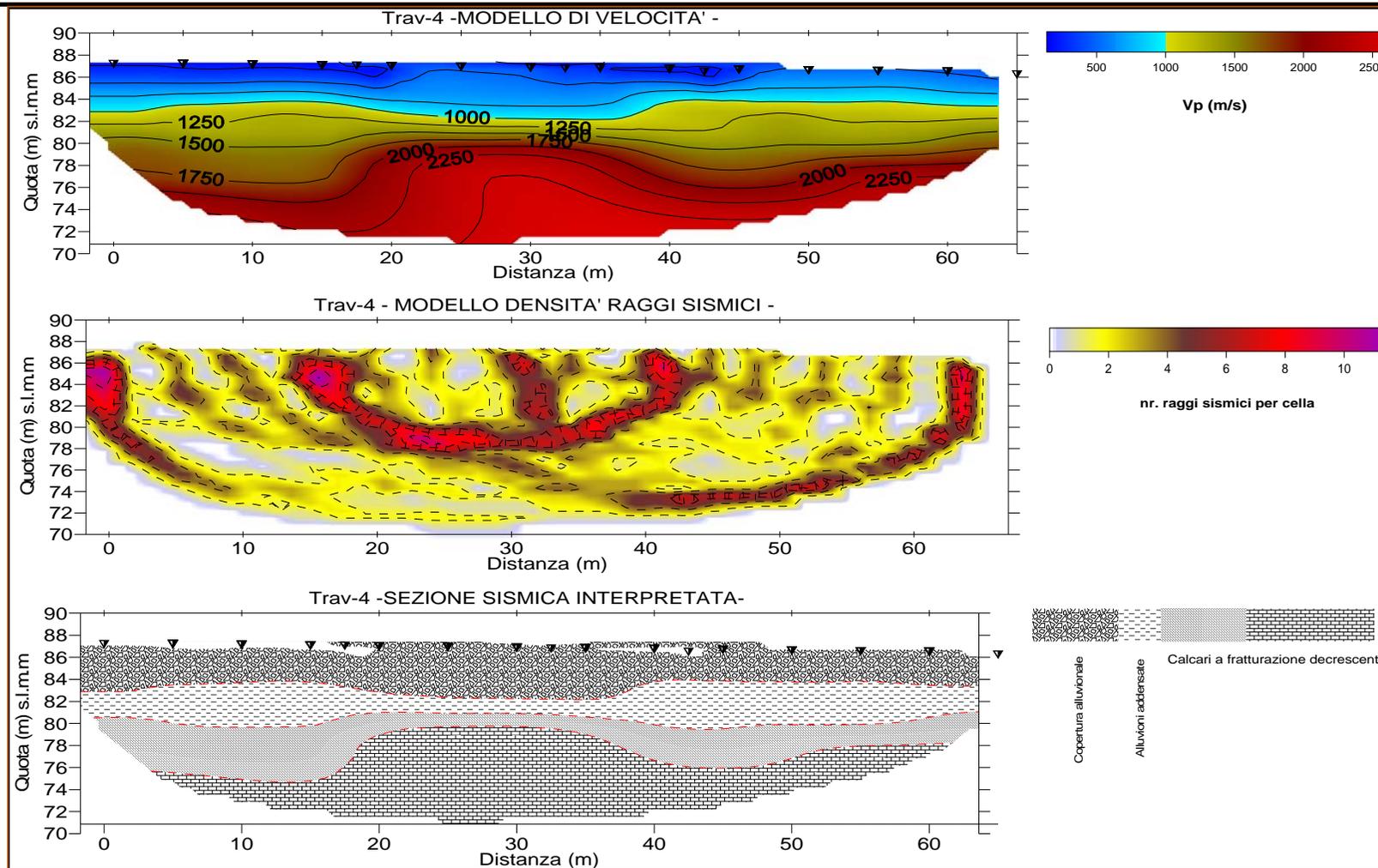
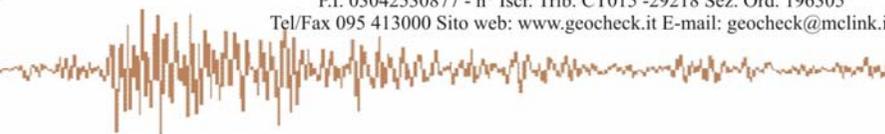
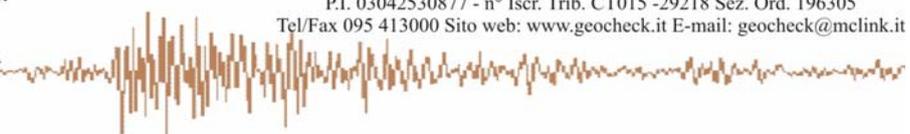
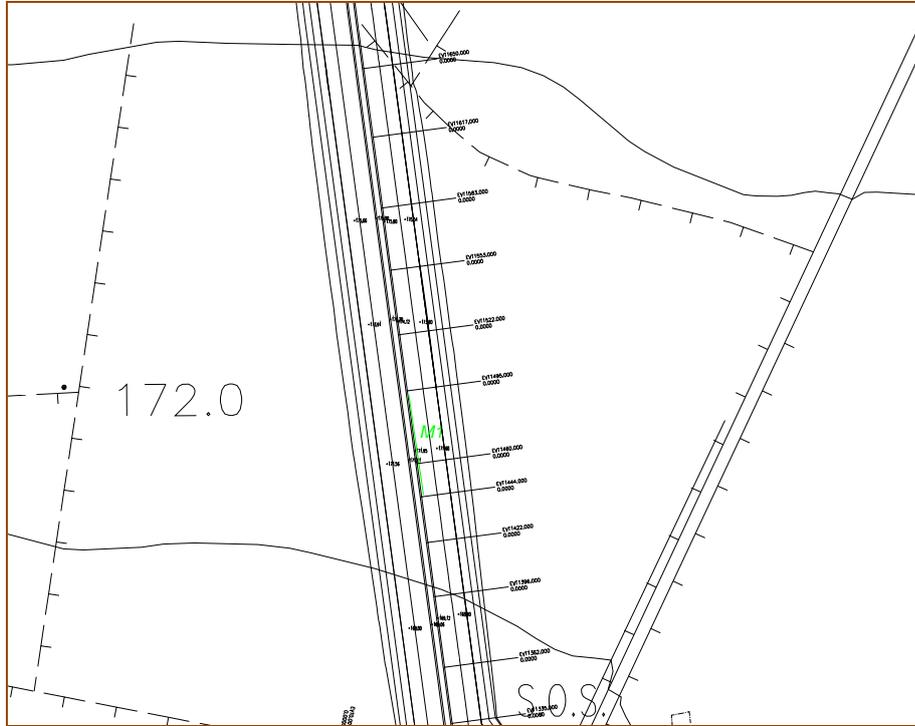


Figura 5. Modello di velocità onde P, densità dei raggi sismici e sezione sismica interpretata



**M.A.S.W. 1-**



**Coord.  
Geografiche**

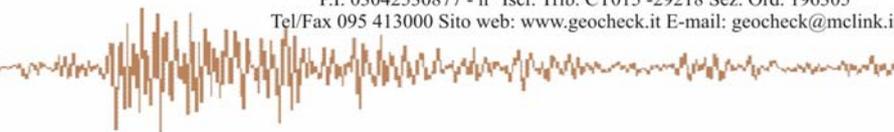
LAT 36.79167°  
LONG 14.66593°

**Quota:**  
172m s.l.m.

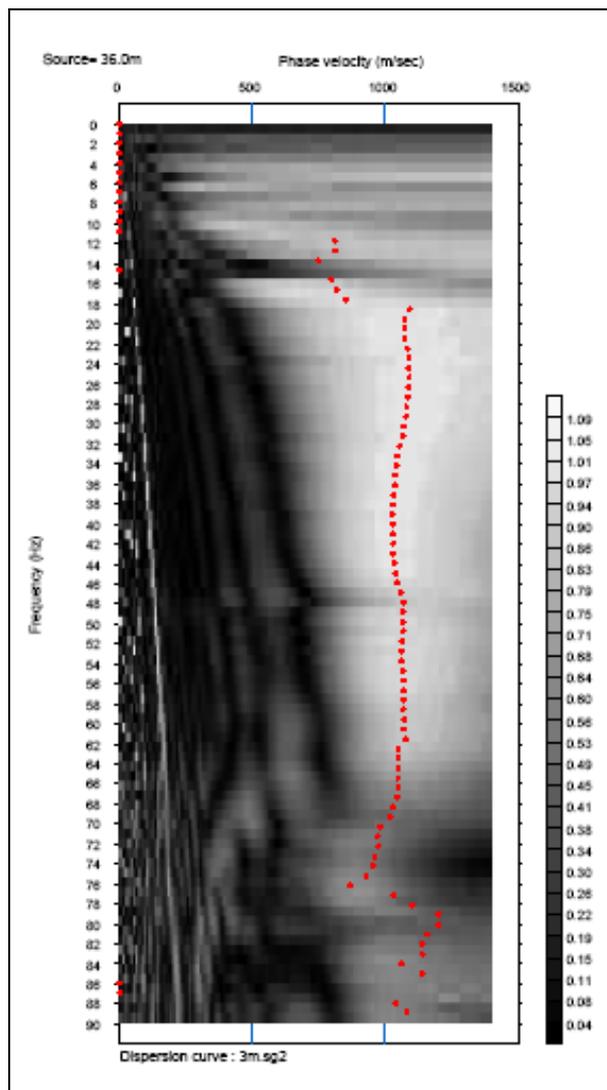
**Lunghezza  
stendimento:**  
36ml



**Figura 6.** Ubicazione prova e documentazione fotografica – MASW\_1-



La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 17.875 Hz e 70.2 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 980.06 m/s e 1091.98 m/s (Fig.7). La curva di dispersione, estratta nel campo di frequenza analizzato, mostra avere, nel suo complesso, un andamento normal-dispersivo.

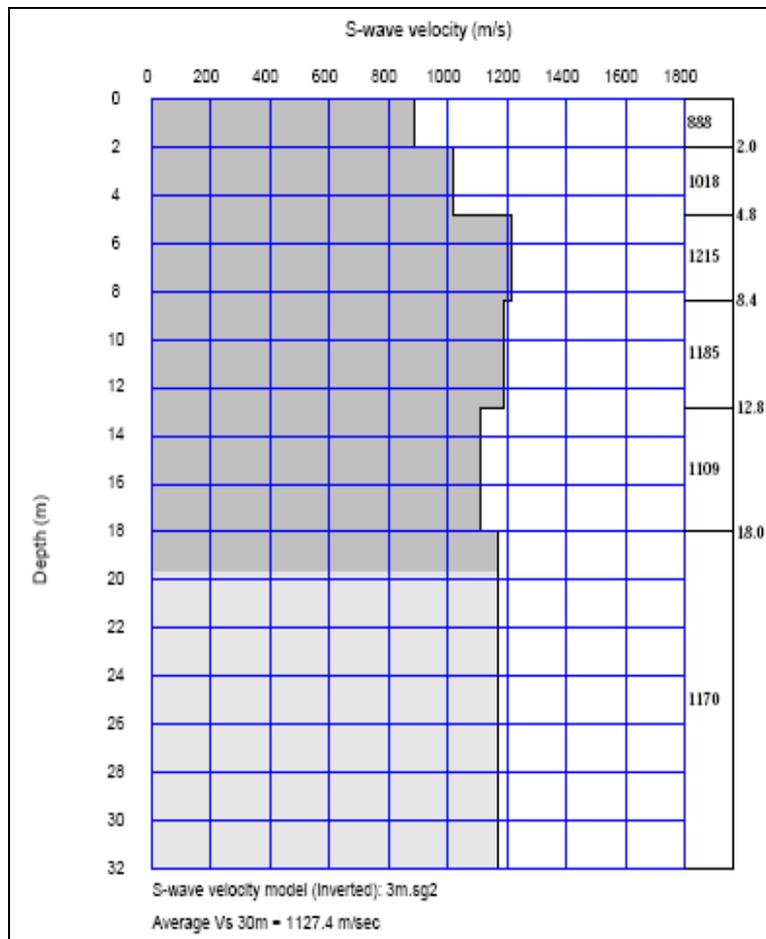


**Figura 7.** Densità spettrale normalizzata nel piano Velocità di fase apparente /frequenza

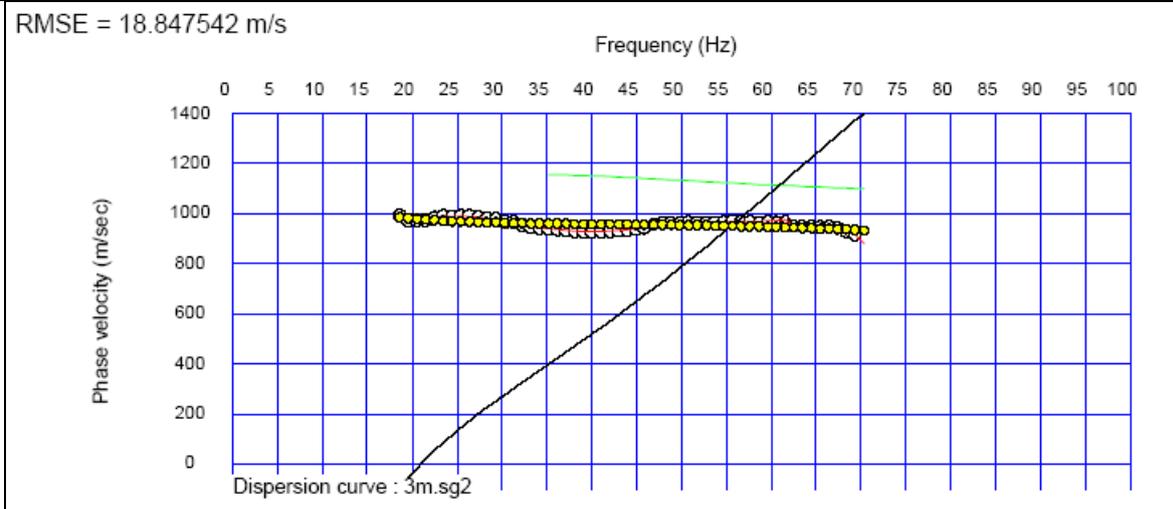
La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 8) ha uno scarto pari  $RMSE = 18.84$  m/s con la curva di dispersione sperimentale. Il profilo di velocità è tipico di una successione litoide diversamente fratturata. In dettaglio, si ha uno strato superficiale con  $V_s = 888.3$  m/s sovrastare una sequenza di sismostrati caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde di taglio uniforme ( $V_s = 1140$  m/s  $\pm 74.8$ ).

Profondità H(m)	Vs (m/s)
0.0	888.3
2.0	1018.1
4.8	1216.0
8.4	1185.9
12.8	1109.6
18.0	1170.4

**Tabella.** Modello di velocità teorico relativo alla curva teorica di fig. 9



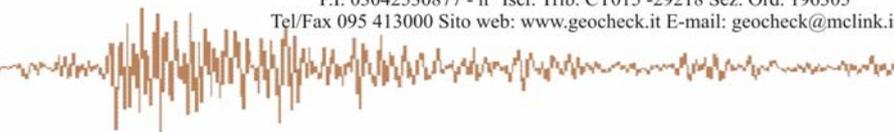
**Figura 8.** Modello di velocità del sottosuolo.



**Figura 9.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con pallini bianchi).

VS30

Sismostrato	Profondità	Spessore30 (h - (m-))	V <sub>s</sub> (m/s)	h/V <sub>s</sub> (sec)	V <sub>s30</sub>
1	0.00	2.00	888.3	0.0022514	1127.4
2	2.00	2.80	1018.1	0.0027501	
3	4.80	3.60	1216.0	0.0029605	
4	8.40	4.40	1185.9	0.0037101	
5	12.80	5.20	1109.6	0.0046863	
6	18.00	12.00	1170.4	0.0102526	



## M.A.S.W. 2-

### Coord. Geografiche

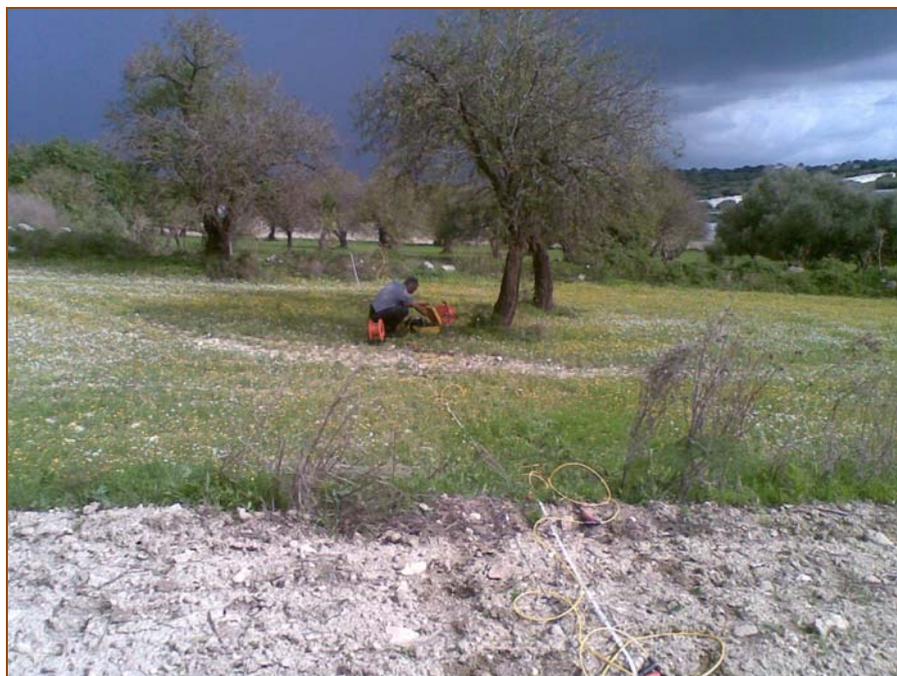
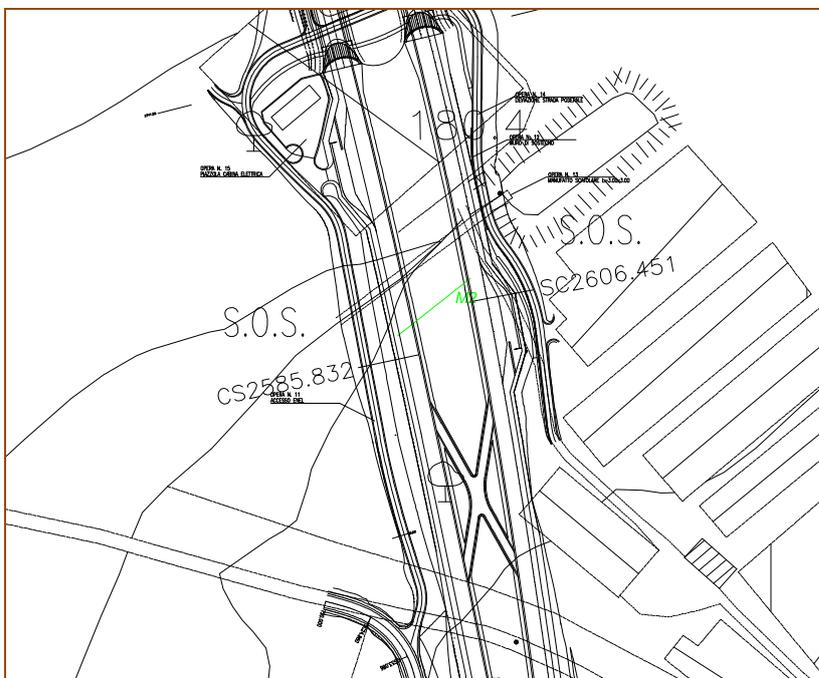
LAT 36.80377°  
LONG 14.66160°

### Quota:

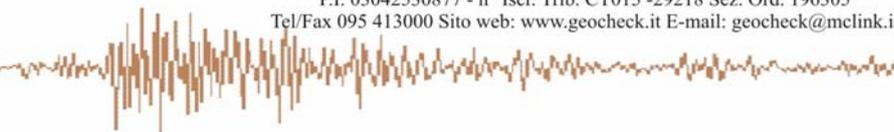
185m s.l.m.

### Lunghezza stendimento:

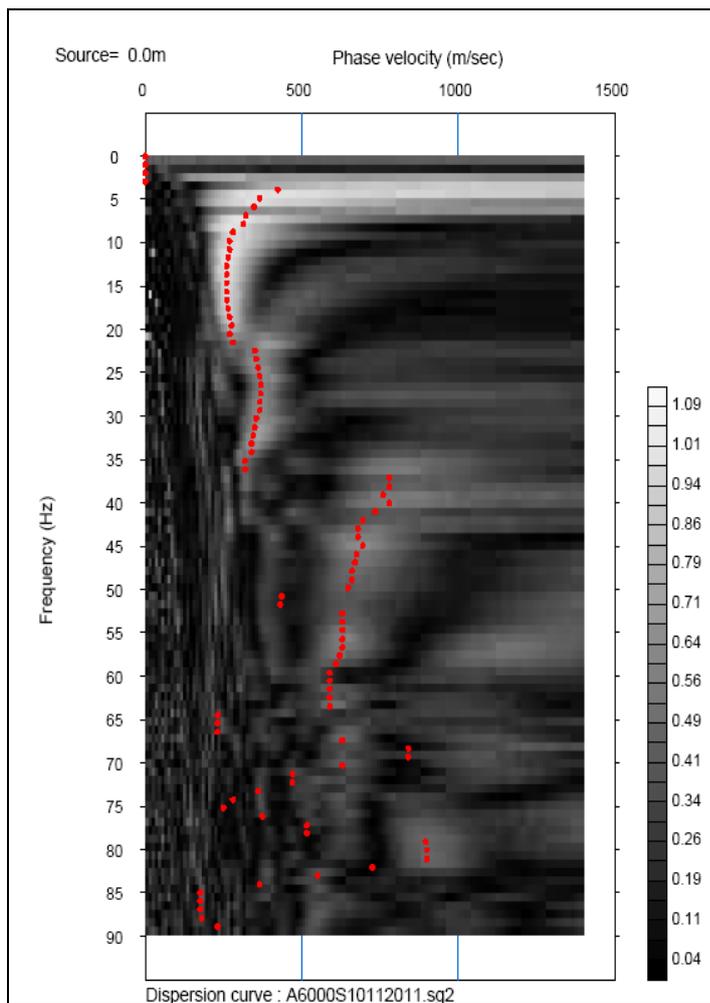
60 ml



**Figura 10.** Ubicazione prova e documentazione fotografica – MASW\_2-



La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 3.9 Hz e 20.5 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 423.22 m/s e 260.18 m/s (Fig.11). La curva di dispersione, estratta nel campo di frequenza analizzato, mostra avere, nel suo complesso, un andamento normal-dispersivo.

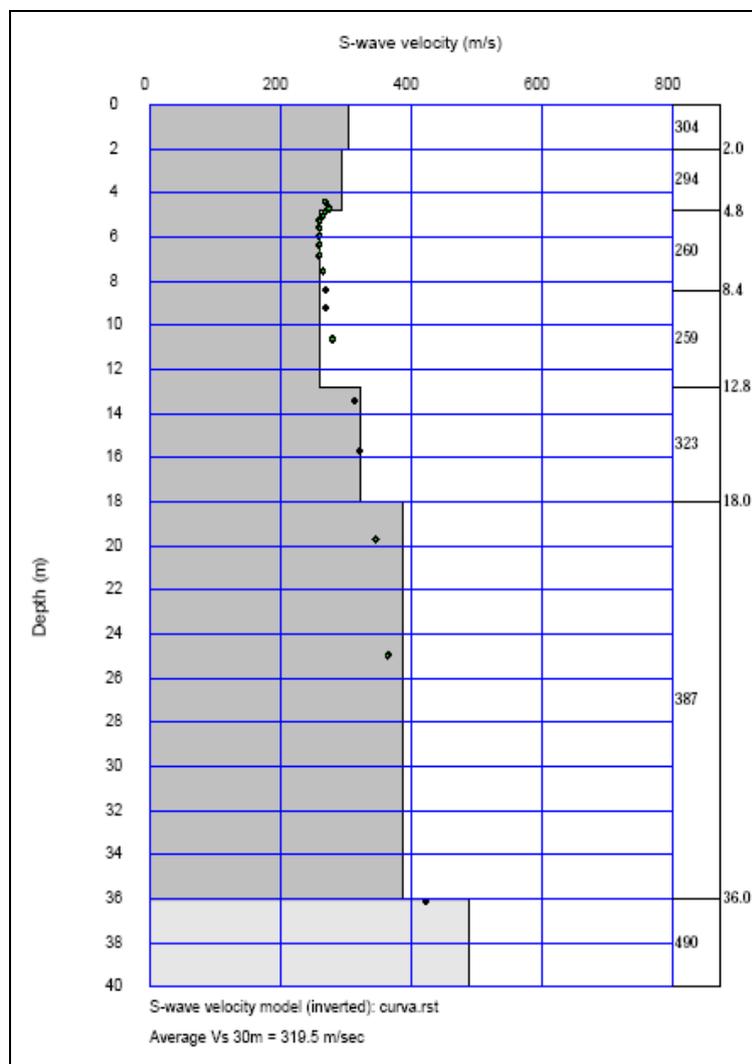


**Figura 11.** Densità spettrale normalizzata nel piano Velocità di fase apparente /frequenza

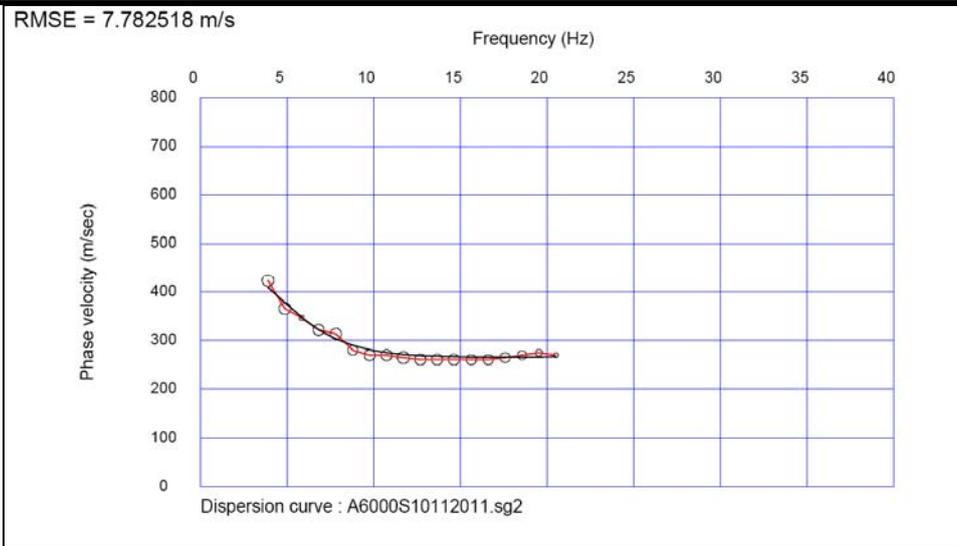
La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 12) ha uno scarto pari  $RMSE = 7.78$  m/s con la curva di dispersione sperimentale. Il profilo di velocità del sottosuolo può ricondursi ad una successione di tre sismostrati: Il primo sismostrato ha uno spessore di 18 metri ed una  $V_s$  media di  $304.07$  m/s  $\pm 47.73$ ; il secondo si estende da 18 metri fino a 36 ed è caratterizzato da un  $V_s$  pari  $387.7$  m/s, mentre da 36 metri la  $V_s$  passa a  $490.3$  m/s. Una lieve inversione di velocità. risulta ad una profondità compresa tra 4.8 m e 12.8 m.

Profondità H(m)	Vs (m/s)
0.00	304.07
2.00	294.34
4.80	260.11
8.40	259.45
12.80	323.54
18.00	387.73
36.00	490.37

**Tabella.** Modello di velocità teorico relativo alla curva teorica di fig. 13



**Figura 12.** Modello di velocità del sottosuolo.



**Figura 13.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con pallini bianchi).

**VS30**

:

Sismostrato	Profondità	Spessore30 (h - (m-))	$V_s$ (m/s)	$h/V_s$ (sec)	$V_{s30}$
1	0.00	2.00	304.1	0.0065774	319.45
2	2.00	2.80	294.3	0.009513	
3	4.80	3.60	260.1	0.0138402	
4	8.40	4.40	259.4	0.0169592	
5	12.80	5.20	323.5	0.0160723	
6	18.00	12.00	387.7	0.0309493	

**M.A.S.W. \_3-**

**Coord. Geografiche**

LAT 36.81379°

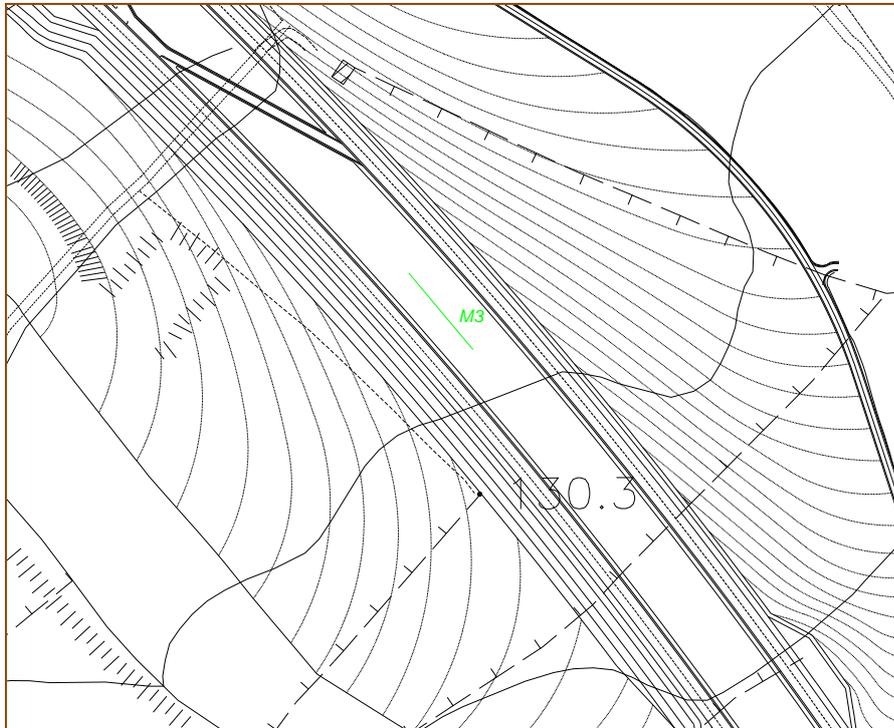
LONG 14.65719°

**Quota:**

137m s.l.m.

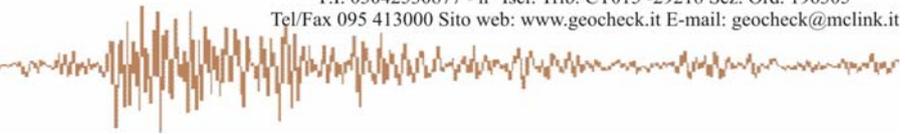
**Lunghezza  
stendimento:**

60 ml

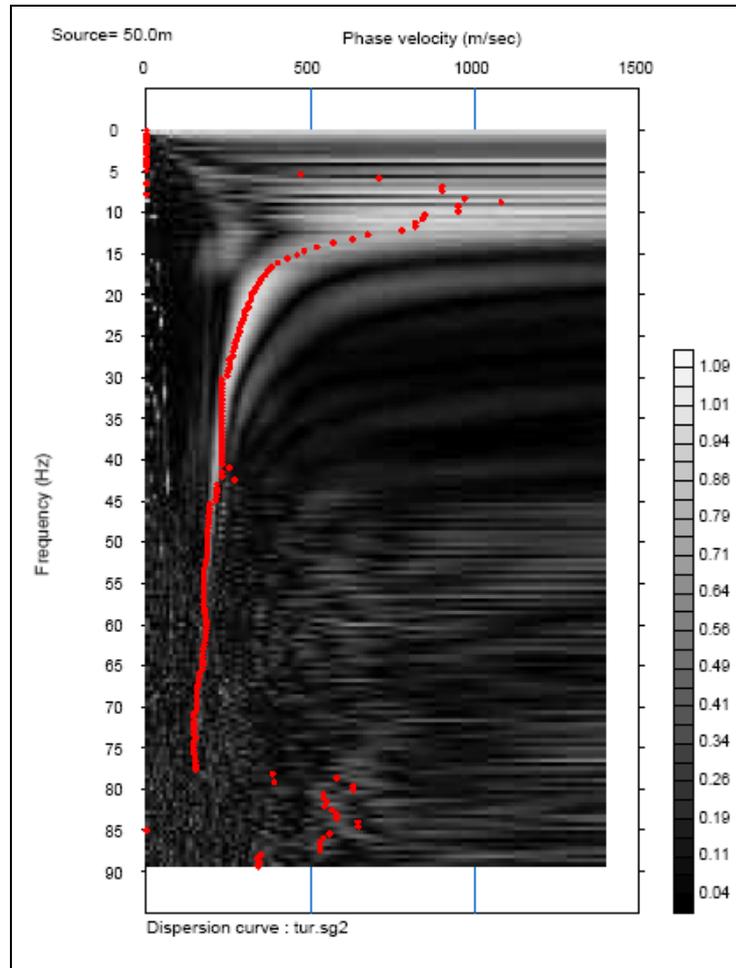


**Figura 14.** Ubicazione prova e documentazione fotografica – MASW\_3-

La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 9.375 Hz e 50.3 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è



compresa, rispettivamente, tra 890.9 m/s e 201.2 m/s (Fig.15). La curva di dispersione, estratta nel campo di frequenza analizzato, mostra avere, nel suo complesso, un andamento normal-dispersivo.

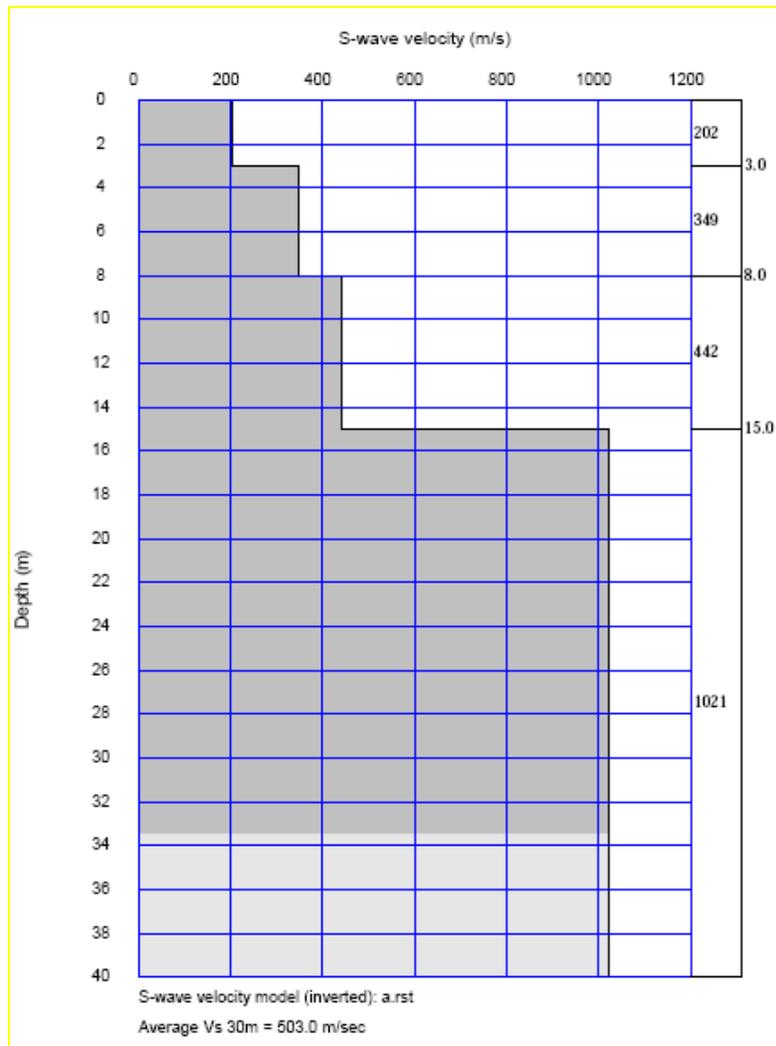


**Figura 15.** Densità spettrale normalizzata nel piano Velocità di fase apparente /frequenza

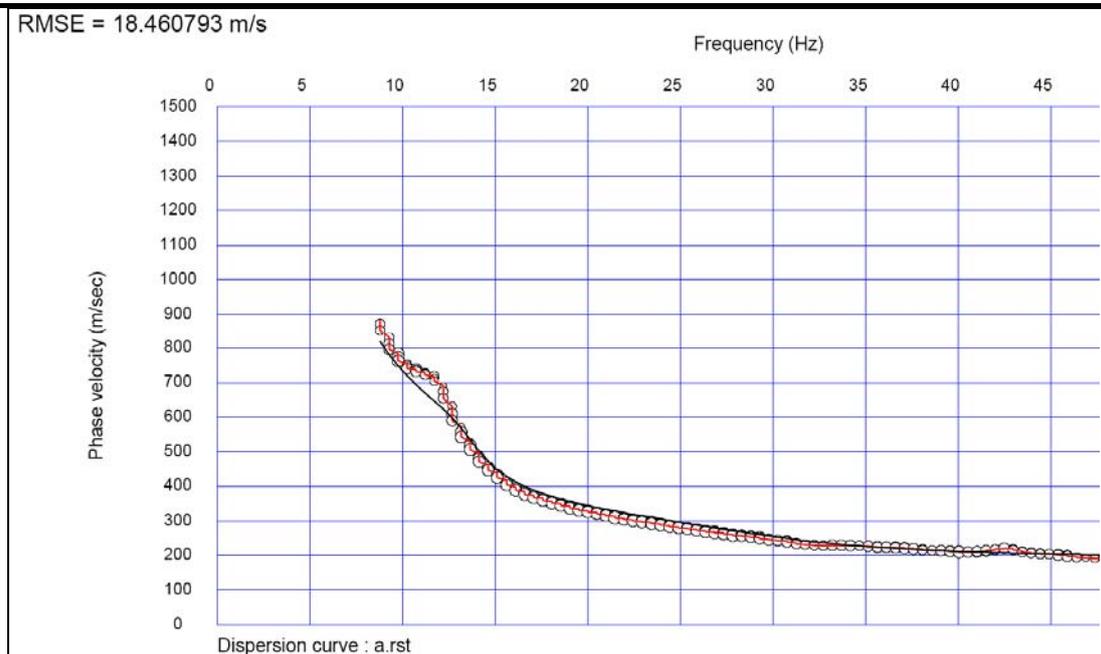
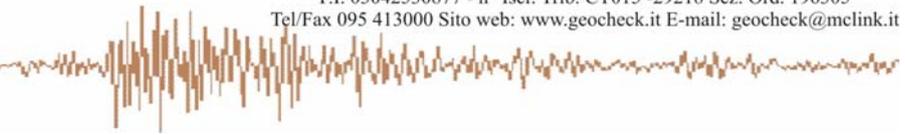
La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 16) ha uno scarto pari  $RMSE = 18.46$  m/s con la curva di dispersione sperimentale. Il profilo di velocità del sottosuolo mostra la presenza di una copertura soffice potente 15,0 metri con  $V_s$  crescente (da 202.90 462 m/s) sovrastare un bedrock sismico ( $V_s = 1021.96$  m/s).

Profondità H(m)	Vs (m/s)
0	202.48
3	349.36
8	442.01
15	1021.96

**Tabella.** Modello di velocità teorico relativo alla curva teorica di fig. 17



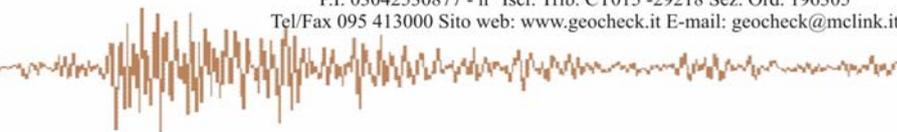
**Figura 16.** Modello di velocità del sottosuolo.



**Figura 17.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con pallini bianchi).

**VS30**

Sismostrato	Profondità	Spessore30 (h - (m-))	$V_s$ (m/s)	$h/V_s$ (sec)	$V_{s30}$
1	0.00	3.00	202.5	0.0148161	503
2	3.00	5.00	349.4	0.0143115	
3	8.00	7.00	442.0	0.0158365	
4	15.00	15.00	1022.0	0.0146776	



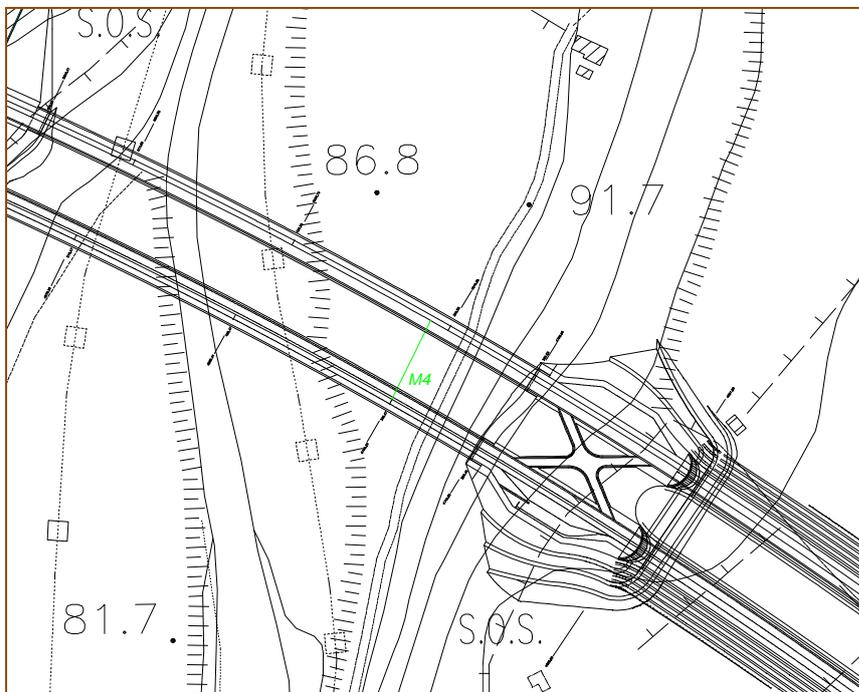
**M.A.S.W. 4-**

**Coord.  
Geografiche**

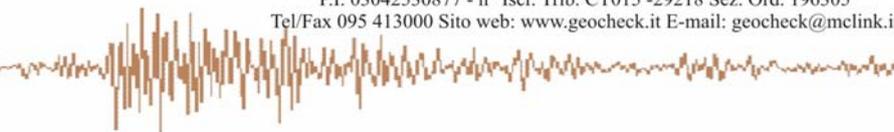
LAT 36.81940°  
LONG 14.65042°

**Quota:**  
86m s.l.m.

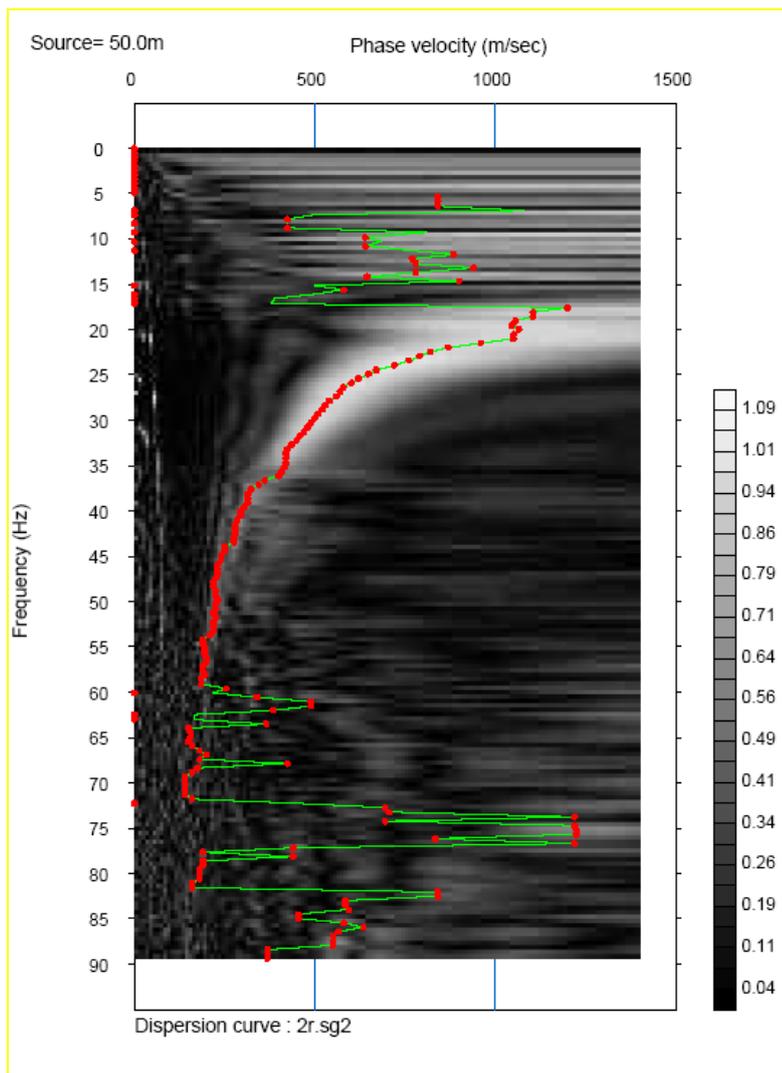
**Lunghezza  
stendimento:**  
60 ml



**Figura 18.** Ubicazione prova e documentazione fotografica – MASW\_4-



La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 17.12 Hz e 59.12 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 1080.9 m/s e 202.8 m/s (Fig.19). La curva di dispersione, estratta nel campo di frequenza analizzato, mostra avere, nel suo complesso, un andamento normal-dispersivo.

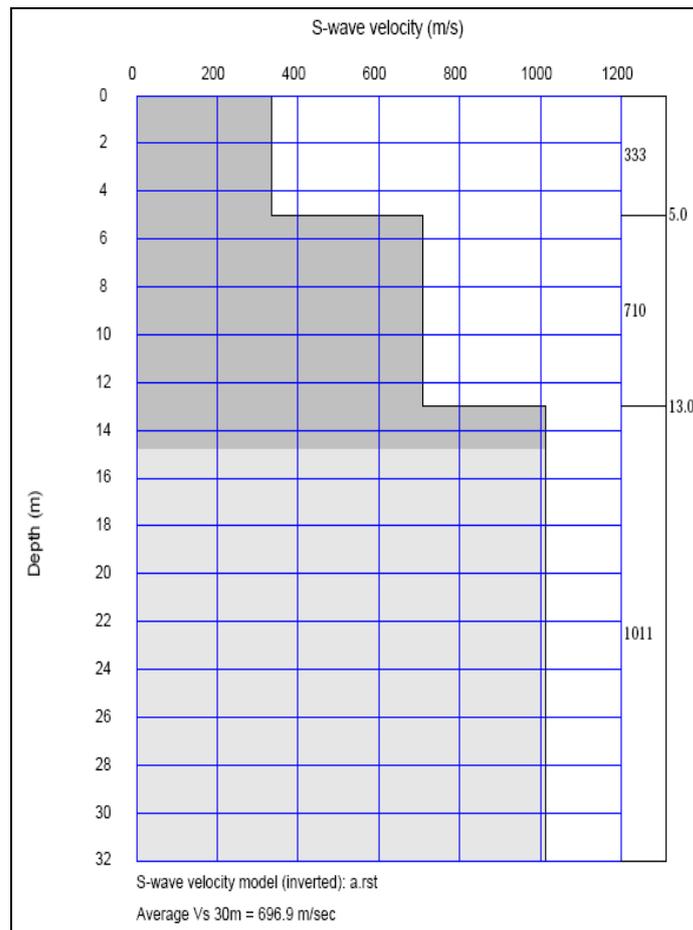


**Figura 19.** Densità spettrale normalizzata nel piano Velocità di fase apparente /frequenza

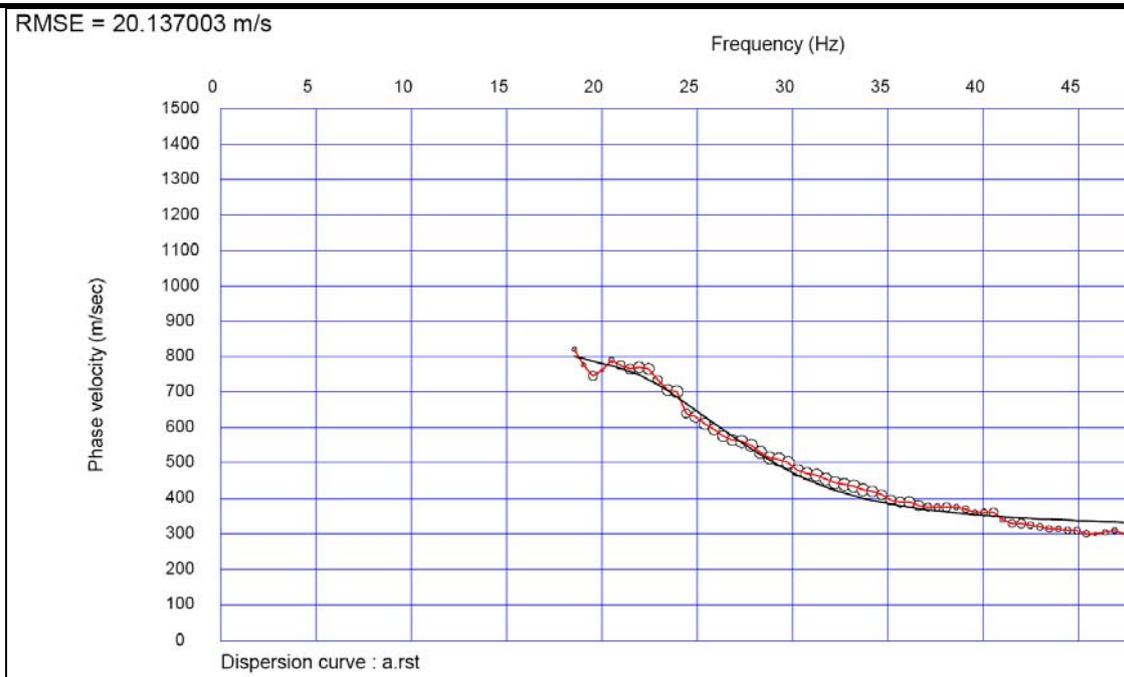
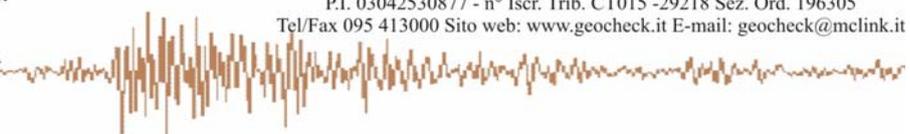
La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 20) ha uno scarto pari  $RMSE = 20.13$  m/s con la curva di dispersione sperimentale. Il profilo di velocità del sottosuolo mostra la presenza di una copertura potente 13 m sovrastare un bedrock sismico ( $V_s$  1011 m/s).

Profondità H(m) Vs (m/s)	
0.00	333.74
5.00	710.16
13.00	1011.97

**Tabella.** Modello di velocità teorico relativo alla curva teorica di fig. 21



**Figura 20.** Modello di velocità del sottosuolo.



**Figura 21.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con pallini bianchi).

**VS30**

Sismostrato	Profondità	Spessore30 (h - (m-))	$V_s$ (m/s)	$h/V_s$ (sec)	$V_{s30}$
1	0.00	5.00	333.7	0.0149817	696.93
2	5.00	8.00	710.2	0.0112651	
4	13.00	17.00	1012.0	0.016799	