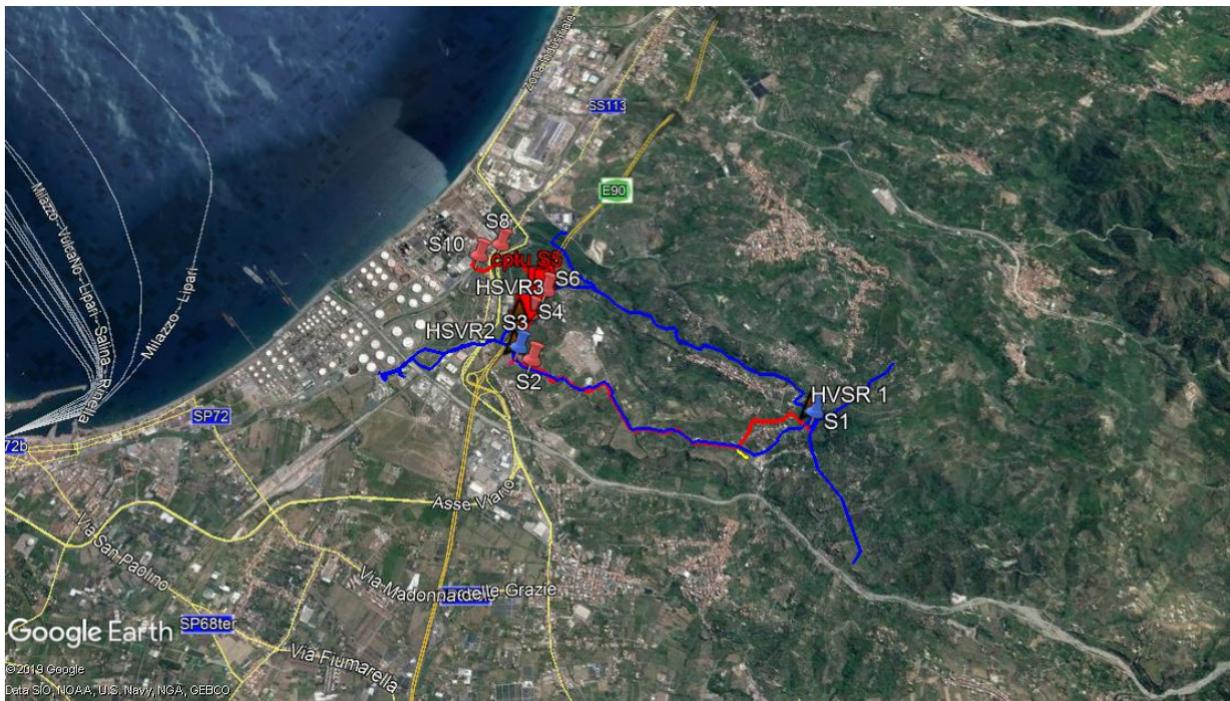


**Indagini geognostiche per il metanodotto "A2A – San Filippo del Mela (ME) DN 500 (20") DP 75 bar**

**RAPPORTO GEOFISICO**



DIRETTORI LABORATORI		DOCUMENTO REDATTO	DOCUMENTO APPROVATO	CONSEGNA
<i>Dott. Ing. Salvatore Ognibene</i>	<i>Dott. Geol. Filippo Furia</i>	<i>Dott. Geol. Marco Andolina</i>	<i>Dott. Geol. Filippo Furia</i>	Gennaio 2020
LABORATORIO L&R	LABORATORIO M.T.R.			
IL PRESENTE DOCUMENTO E' 'PROPRIETA' CONSORZIO LABORATORI RIUNITI A TERMINE DI LEGGE OGNI DIRITTO E' RISERVATO				COMMESSA N° IP853/2019

 Member of CISO Federation <b>RINA</b> CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001	 <b>certyceq</b> ISO 14001:2015	 <b>SNAS</b> Reg. No. 374/R-078	 <b>certyceq</b> OHSAS 18001:2007
--	--	--	--

<b>1PREMESSA</b>	<b>3</b>	
<b>2ELABORATI</b>	<b>3</b>	
<b>3INDAGINI GEOFISICHE</b>	<b>4</b>	
3.1	Tomografia Sismica	5
3.2	Risposta sismica del sito HVSR (Horizontal/vertical spectral ratio)	6
3.3	Prova Sismica Multicanale MASW (Multichannell Analysisi of Surface Waves)	7

## 1 PREMESSA

A seguito dell'affidamento del servizio di indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche, conferito alla scrivente azienda dalla ditta COMIS s.r.l., a supporto della progettazione per "l'allacciamento A2A ENERGIEFUTURE di San Filippo del Mela (ME) DN 500 (20") DP 75 bar", sono state eseguite le indagini qui di seguito esposte.

Le indagini riguardano nello specifico il tratto di metanodotto ricadente nel territorio del comune di San Filippo del Mela (ME).

I lavori sono stati programmati e diretti dalla Committenza nella figura del dott. geol. Giovanni Polloni che ha coordinato lo svolgimento delle indagini in sito e in laboratorio.

La campagna delle indagini è stata programmata e sviluppata come di seguito riportato:

- 1) N° 4 tomografie sismiche;
- 2) N° 4 Masw;
- 3) N°4 HVSR;

I risultati delle varie tipologie di indagini sono allegati alla presente relazione.

## 2 ELABORATI

Tutti i dati raccolti ed analizzati sono stati utilizzati per la stesura della presente relazione, corredata dai seguenti elaborati:

- Annesso n° 1: Planimetria con ubicazione delle indagini
- Annesso n° 2: Report geofisica

### 3 INDAGINI GEOFISICHE

Le prove geofisiche oggetto del presente rapporto sono state eseguite nell'ambito di uno studio geognostico finalizzato alla definizione sismo-stratigrafica, alla valutazione della risposta sismica locale ed alla stima del profilo di velocità delle onde di taglio per il calcolo del parametro  $V_{seq}$  secondo quanto previsto dal DM 2018.

A tal fine sono state commissionate ed eseguite prove geofisiche non invasive di tipo sismico a rifrazione di superficie con analisi tomografica (Tomografia Sismica Rifrazione Assiale Di Superficie), misura del rumore sismico con analisi HVSr (Tecnica di Nakamura (1989)) ed una prospezione sismica basata sulla propagazione di onde superficiali di Rayleigh (surface wave method – SWM) di tipo attivo (Multichannel Analysis of Surface Waves - M.A.S.W.).

Di seguito sono tabulate le quantità, le denominazioni e le configurazioni geometriche eseguite:

ID Tomografia Sismica	Tipologia	Lunghezza (m)
ST_1	Onde P	360
ST_2		360
ST_3		60
ST_4		60
ID M.A.S.W.	Tipologia	Lunghezza (m)
MW 1	Onde Rayleigh	42
MW 2		42
MW 3		42
MW 4		42
ID HVSr	Tipologia	Durata registrazione (min)
N1	Rumore sismico	20
N2		20
N3		20
N4		20

**Tabella 1** – Elenco e configurazione dei transetti sismici eseguiti.

Le indagini geofisiche sono state eseguite secondo le seguenti norme tecniche:

- ✓ ASTM D5777-00 (2006) –Tomografia sismica
- ✓ RUMORE SISMICO ED ANALISI HVSr (Project N° EVG1-CT-2000-00026 SESAME, 2005.
- ✓ M.A.S.W. (ASTM D6429-99: "Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods):

### 3.1 Tomografia Sismica

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. Lo sviluppo metrico lineare delle indagini sismiche effettuate è risultato pari a 900 m.

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 M.A.E. A6000S, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- frequenza di campionatura segnali compresa tra 0.01 e  $3.33 \cdot 10^{-5}$  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 fucile sismico a cartuccia industriale.

I segnali sismici registrati in formato digitale sono stati analizzati nel dominio del tempo con apposito software (CWP/SU) per la stima del primo arrivo delle onde sismiche generate (P).

Il G.S.A.O., metodo basato sulla tecnica Monte Carlo<sup>1</sup>, 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.

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

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

☐ Calcolo dei traveltimes 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

<sup>1</sup> Metropolis, N., A. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller (1953). Equations of state calculation by fast computing machines, J. Chem. Phys. 21 , 1087-1092.

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):

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

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

dove  $P_c$  è la probabilità di accettare la condizione,  $T$  è chiamata temperatura;

$\Delta E = E_0 - E_1$ ,  $q$  è una costante d’integrazione (che si determina empiricamente), e  $E_{\min}$  è il valore oggettivo della funzione dei minimi totali. Teoricamente si ha  $E_{\min} = 0$ .

L’equazione (2) significa che il nuovo modello è accettato quando la “least – square error” è inferiore a quella della iterazione precedente. L’equazione (3) prevede l’accettazione condizionata di modelli con una più ampio least – square error”. 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.

## 3.2 Risposta sismica del sito HVSR (Horizontal/vertical spectral ratio)<sup>2</sup>

Il comportamento dei siti conseguentemente ad un input sismico è inteso in termini di differente energia e/o diversa distribuzione in frequenza della stessa a causa degli effetti di amplificazione o attenuazione selettiva di determinate frequenze (risposta in frequenza del sito). Tale azione selettiva è

<sup>2</sup> L’elaborazione dei dati è stata eseguita tramite codici di calcolo SAC sviluppati per ambiente LINUX

funzione delle caratteristiche fisiche - geometriche (litologici e strutturali) dei mezzi attraversati da un'onda sismica.

In genere i terreni rigidi presentano curve spettrali H/V (terreni rocciosi o terreni sedimentari compatti) poco amplificate e con risposte centrate nella banda "audio - frequency" ( $f > 20$  Hz) legate allo stato di alterazione superficiale del sito roccioso, mentre le curve spettrali H/V relative ai terreni soffici sono caratterizzate da amplificazioni a frequenze  $< 10$  Hz e con livelli di ampiezza legati al contrasto di impedenza sismica. Nel presente lavoro la valutazione della risposta sismica del sito è stata esaminata attraverso il campionamento di "microtremori" al fine di quantizzare, tramite analisi dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e verticale del moto del suolo, gli effetti di amplificazione sismica locale.

La tesi di partenza si basa sul fatto che l'energia dei microtremori consiste principalmente in onde di Rayleigh, e che l'effetto di amplificazione del sito è legato al contrasto di rigidità tra due mezzi attraversati dall'onda sismica. Recentemente è stato dimostrato [Per una rassegna si veda Bard, 1999], che i rapporti spettrali H/V utilizzati con misure di microtremore, mostrano una significativa coerenza con le forme di spettri H/V calcolati mediante registrazioni di terremoti.

In accordo con quanto descritto sugli effetti di sito [Nakamura, 1989; Lachet & Bard, 1994; Lermo & Chàvez-García, 1994], in questo lavoro è stata applicata la tecnica dei rapporti spettrali H/V [Nakamura, 1989].

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}$$

presupponendo un probabile contrasto di rigidità sismica tra i terreni costituenti il substrato.

### 3.3 Prova Sismica Multicanale MASW (Multichannell Analysis of Surface Waves)

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

fase e velocità di gruppo o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

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

- Velocità di campionamento dei segnali compresa tra 0.002 e 0.000033 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 con interspazio (Gx) 3 metri;
- n. 2 energizzazioni ad offset (Sx) variabile come multiplo del Gx in A/R;
- lunghezza delle tracce sismiche pari a 4.096 sec.;
- massa battente pesante di 10 Kg.

Le configurazioni adottate hanno consentito di mitigare gli effetti near-field dovuti alle onde di volume ed ha altresì consentito di avere le seguenti risoluzioni spazio-temporali: lungo i numeri d'onda  $k$  la risoluzione è stata pari a 0.261 m<sup>-1</sup>, mentre la risoluzione in frequenza è stata pari a 0.244 Hz.

# **Annesso 1**

## **Planimetria con ubicazione delle indagini**

**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg  
delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

## Ubicazione indagini geofisiche

Scrivi una descrizione per la tua mappa.



**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874. Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

## **Annesso 2**

### **Report di Geofisica**



**ALLACCIAMENTO A2A ENERGIE FUTURE  
DI SAN FILIPPO DEL MELA (ME)  
DN 500 (20") – DP 75 BAR**

**SISMICA ATTIVA TOMOGRAFICA A  
RIFRAZIONE ASSIALE DI SUPERFICIE (TSRAS) – M.A.S.W – HVSR  
RAPPORTO TECNICO**

REV.	Data e località	Committente	Redatto	Controllato	Approvato	COMM.-JOB:
0	DICEMBRE 2019 MILAZZO (ME)		Dott. Geol. G. Coco			

**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg  
delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

INDICE

pag.

<b>1.0 -PREMESSE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.0 – NORME TECNICHE .....</b>	<b>4</b>
<b>3.0 –UBICAZIONE.....</b>	<b>4</b>
<b>4.0 - TOMOGRAFIA SISMICA .....</b>	<b>7</b>
4.1 - Generalità.....	7
4.1.1 - Metodologia e strumentazione utilizzata .....	7
4.1.2 - Metodologia di calcolo - G. S. A. O. (Generalized Simulated-Annealing Optimization) .....	8
<b>4.2- RISULTATI TOMOGRAFIE SISMICHE .....</b>	<b>9</b>
• ST_1 LINEA SISMICA A-A' .....	11
• ST_2 LINEA SISMICA B-B' .....	13
• ST_3 LINEA SISMICA C-C' .....	15
• ST_4 LINEA SISMICA D-D' .....	17
<b>5.0- RISPOSTA SISMICA DEL SITO HVSr (Horizontal/vertical spectral ratio).....</b>	<b>19</b>
5.1 - Descrizione del metodo.....	19
5.2 - Acquisizione ed elaborazione dati .....	20
5.3 - CRITERI PER LA INTERPRETAZIONE DELLA CURVA H/V E RISULTATI .....	23
• N1 .....	24
• N2.....	24
• N3.....	25
• N4.....	25
<b>6.0 - PROVA SISMICA MULTICANALE MASW (Multichannel Analysis of Surface WAVES).....</b>	<b>26</b>
6.1 - Premessa .....	26
6.2 - Strumentazione e Configurazione Geometrica.....	26
6.3 - Elaborazione Dati .....	27
6.4 - Risultati prova MASW .....	29
6.4.1 - M.A.S.W. 1 .....	30
6.4.1 - M.A.S.W. 2 .....	32
6.4.1 - M.A.S.W. 3 .....	34
6.4.1 - M.A.S.W. 4 .....	36

## 1.0 -PREMESSE

Le prove geofisiche oggetto del presente rapporto sono state eseguite nell'ambito di uno studio geognostico finalizzato alla definizione sismo-stratigrafica, alla valutazione della risposta sismica locale ed alla stima del profilo di velocità delle onde di taglio per il calcolo del parametro  $V_{seq}$  secondo quanto previsto dal DM 2018, in relazione al progetto di intervento per "l'Allacciamento A2A Energie future di San Filippo del Mela (ME) DN 500 (20") – DP 75 bar".

A tal fine sono state commissionate ed eseguite prove geofisiche non invasive di tipo sismico a rifrazione di superficie con analisi tomografica (Tomografia Sismica Rifrazione Assiale Di Superficie), misura del rumore sismico con analisi HVSR (Tecnica di Nakamura (1989)) ed una prospezione sismica basata sulla propagazione di onde superficiali di Rayleigh (surface wave method – SWM) di tipo attivo (Multichannel Analysis of Surface Waves - M.A.S.W.).

Di seguito sono tabulate le quantità, le denominazioni e le configurazioni geometriche eseguite:

ID Tomografia Sismica	Tipologia	Lunghezza (m)
ST_1	Onde P	360
ST_2		360
ST_3		60
ST_4		60
ID M.A.S.W.	Tipologia	Lunghezza (m)
MW 1	Onde Rayleigh	42
MW 2		42
MW 3		42
MW 4		42
ID HVSR	Tipologia	Durata registrazione (min)
N1	Rumore sismico	20
N2		20
N3		20
N4		20

**Tabella 1** – Elenco e configurazione dei transetti sismici eseguiti.

## 2.0 – NORME TECNICHE

Le indagini geofisiche sono state eseguite secondo le seguenti norme tecniche:

- ✓ ASTM D5777-00 (2006) –Tomografia sismica
- ✓ RUMORE SISMICO ED ANALISI HVSR (Project NÂ° EVG1-CT-2000-00026 SESAME, 2005.
- ✓ M.A.S.W. (ASTM D6429-99: “Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods):

## 3.0 –UBICAZIONE

Le prove prima elencate sono state ubicate nella cartografia di seguito riportata.

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

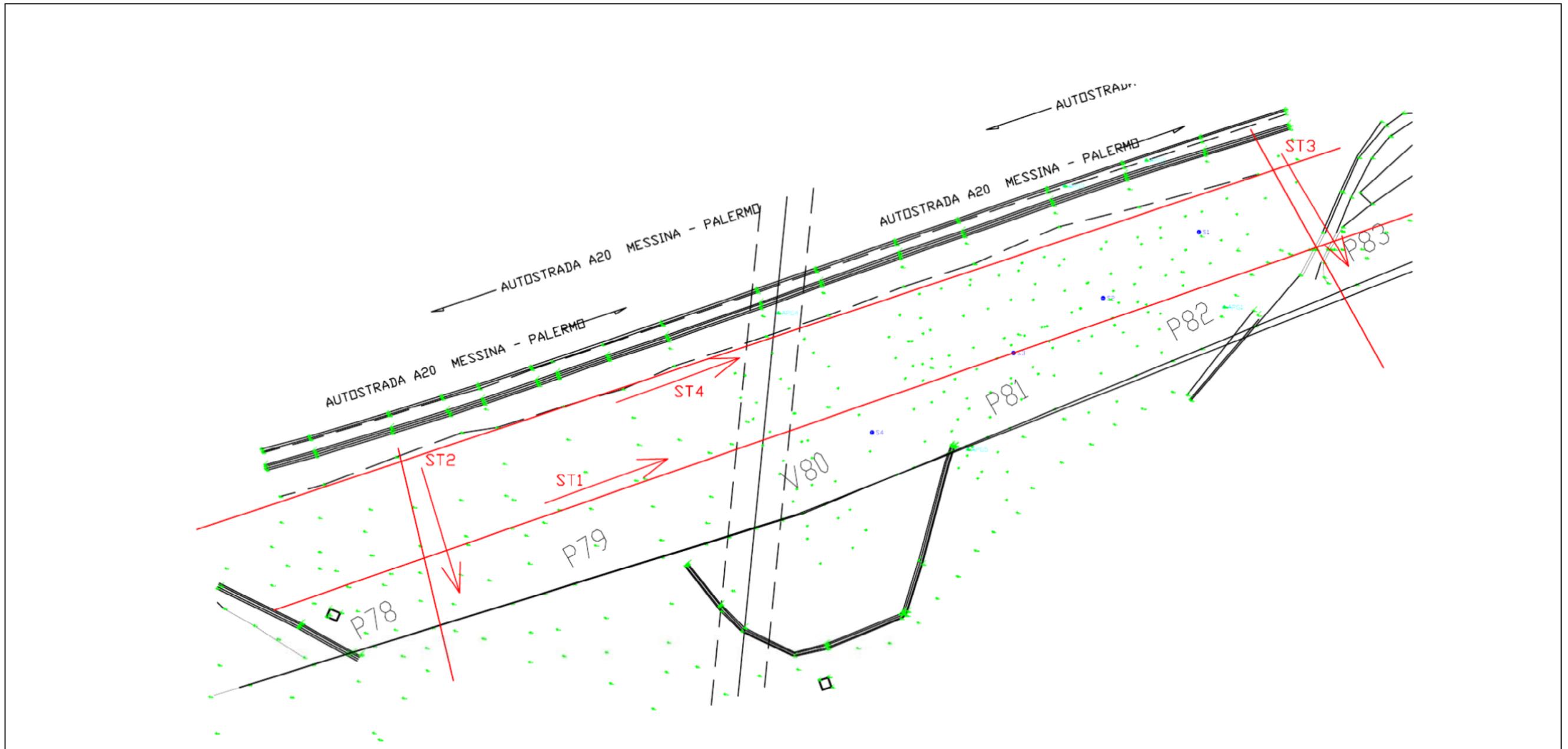
**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)



**Figura 1 – Ubicazione prove**

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874. Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it  
www.LR-SRL.it

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

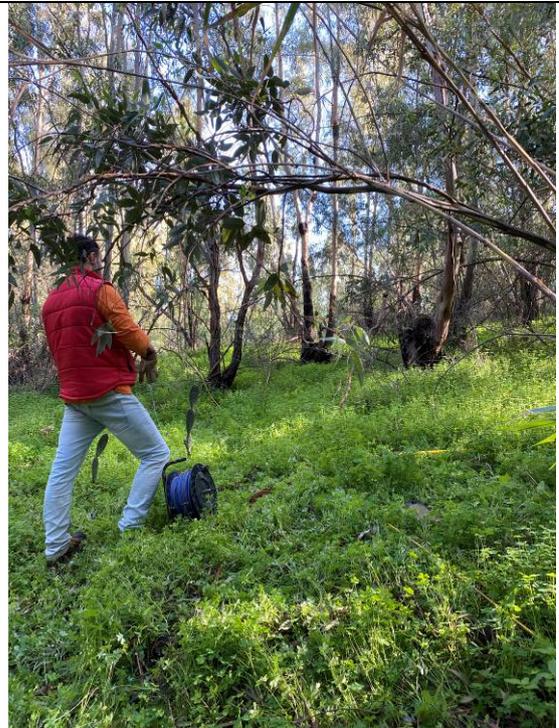
**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

**Foto cantiere**



**ST\_1**



**HVSR**



**M.A.S.W.**

**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
 Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
 95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
 94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
 94018 Troina (EN)

## 4.0 - TOMOGRAFIA SISMICA

### 4.1 - 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. Lo sviluppo metrico lineare delle indagini sismiche effettuate è risultato pari a 600 m.

#### 4.1.1 - 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 M.A.E. A6000S, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- frequenza di campionatura segnali compresa tra 0.01 e  $3.33 \cdot 10^{-5}$  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 fucile sismico a cartuccia industriale.

I segnali sismici registrati in formato digitale sono stati analizzati nel dominio del tempo con apposito software (CWP/SU) per la stima del primo arrivo delle onde sismiche generate (P).

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

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

Il G.S.A.O., metodo basato sulla tecnica Monte Carlo<sup>1</sup>, 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.

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

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

□ Calcolo dei traveltimes 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):

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

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

dove  $P_c$  è la probabilità di accettare la condizione,  $T$  è chiamata temperatura;  $\Delta E = E_0 - E_1$ ,  $q$  è una costante d'integrazione (che si determina empiricamente), e  $E_{\min}$  è il valore oggettivo della funzione dei minimi totali. Teoricamente si ha  $E_{\min} = 0$ .

<sup>1</sup> Metropolis, N., A. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller (1953). Equations of state calculation by fast computing machines, J. Chem. Phys. 21, 1087-1092.

L'equazione (2) significa che il nuovo modello è accettato quando la "least – square error" è inferiore a quella della iterazione precedente. L'equazione (3) prevede l'accettazione condizionata di modelli con una più ampio least – square error". 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.

## 4.2- RISULTATI TOMOGRAFIE SISMICHE

I risultati consistono nella restituzione dell'immagine sismica del sottosuolo espressa in termini di velocità di propagazione delle onde sismiche P (modello di velocità default e modello di velocità normalizzato al valore massimo riscontrato) e di densità di raggi sismici (modello della densità dei raggi sismici). Quest'ultimo indica il numero di volte che la cella viene attraversata dai raggi sismici, in altri termini, seguendo il principio di Fermat, corrisponde al percorso più breve che il raggio sismico compie nel percorso sorgente-ricevitore.

Di seguito si riportano i risultati delle tomografie sismiche e le ubicazioni dei transetti sismici su base topografica geo-referenziata.

Dai **modelli di velocità** risulta che la  $V_p$  è compresa tra 202.5 m/sec e 1562.0 m/sec e che tali valori sono da attribuire alla variazione dello stato di alterazione della coltre di copertura superficiale ed allo stato di consistenza dei terreni di natura prevalentemente argillosa che costituiscono il substrato dell'area di studio.

Le variazioni di velocità rilevate sono sia prevalentemente verticali e sono da correlare con il diverso stato di alterazione e di consistenza dei terreni argillosi.

Le **sezioni densità raggi sismici** mostrano la presenza di due orizzonti sismici: il primo coincide con il passaggio tra la copertura superficiale costituita da terreni a grana grossolana in matrice limo sabbiosa (detrito) e le argille mediamente consistenti il secondo, invece, si rileva al passaggio tra i le stesse argille mediamente consistenti e le argille consistenti.

In funzione dei modelli di velocità delle sezioni di densità dei raggi sismici, si propone la seguente sismo-stratigrafia:

- **$V_p < 1200$  m/sec**  $\Rightarrow$  1° sismostrato. È attribuibile a sabbie argillose ghiaiose con grado di addensamento crescente con la profondità. In seno allo stesso

sismostrato, le aree con velocità < 750 m/sec sono da riferire all'aerato, ovvero mezzo fisico non completamente saturo (scarso stazionamento dell'acqua) laddove avvengono gli interscambi con l'atmosfera (presenza d'aria). Quest'ultimo sismostrato è riferibile alla copertura superficiale costituita da terreni a grana grossolana in matrice limo sabbiosa (suolo agrario).

- **1201 < Vp < 1600 m/sec** ⇒ 2° sismostrato. Argille limose e/o argille mediamente consistenti
- **Vp > 1601 m/sec** ⇒ 3° sismostrato. Argille consistenti.

Di seguito si riportano, i modelli di velocità normalizzati, i modelli densità dei raggi sismici e le sezioni sismo-stratigrafiche.

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

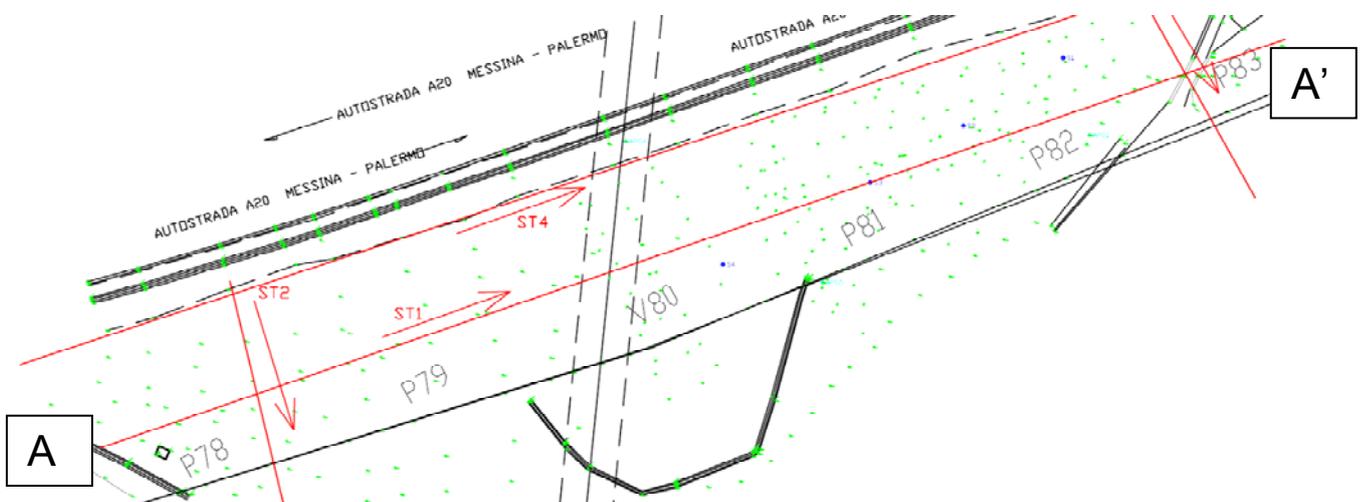
Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

- **ST\_1 LINEA SISMICA A-A'**

La velocità di propagazione delle onde sismiche P è risultata compresa tra 207,5 m/s e 1552,7 m/s. Le variazioni di velocità sono prevalentemente verticali e sono da attribuire al passaggio stratigrafico dei terreni prima descritti. In rosso è rappresentato il passaggio ai terreni argilloso marnosi che costituiscono il substrato dell'area in studio. Dal punto di vista litologico le variazioni di velocità possono riferite alle variazioni del grado consistenza dei terreni argillosi sottostanti la copertura superficiale.



**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

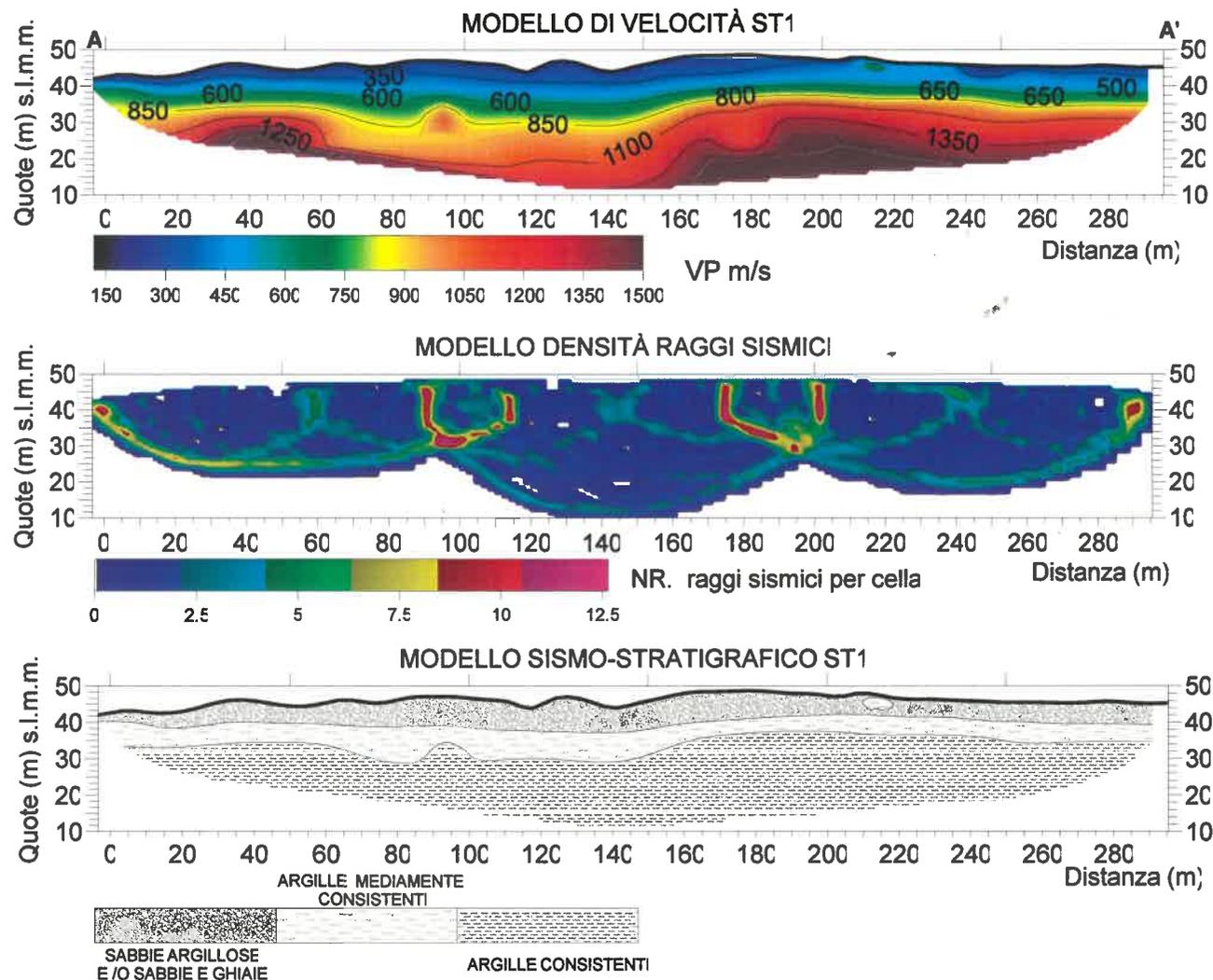
**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

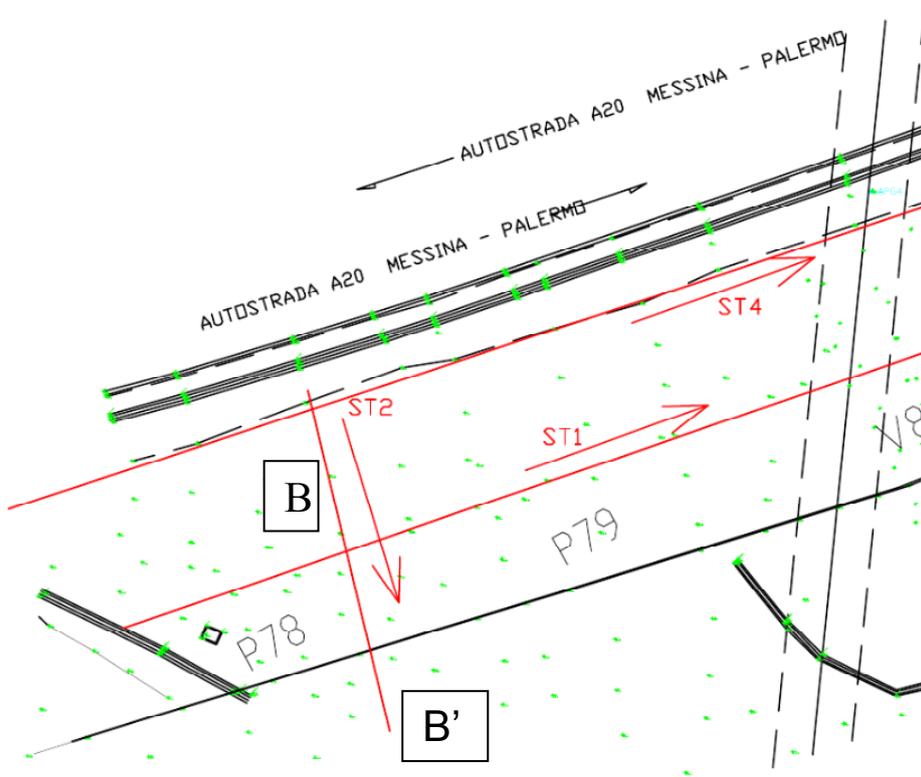
Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)



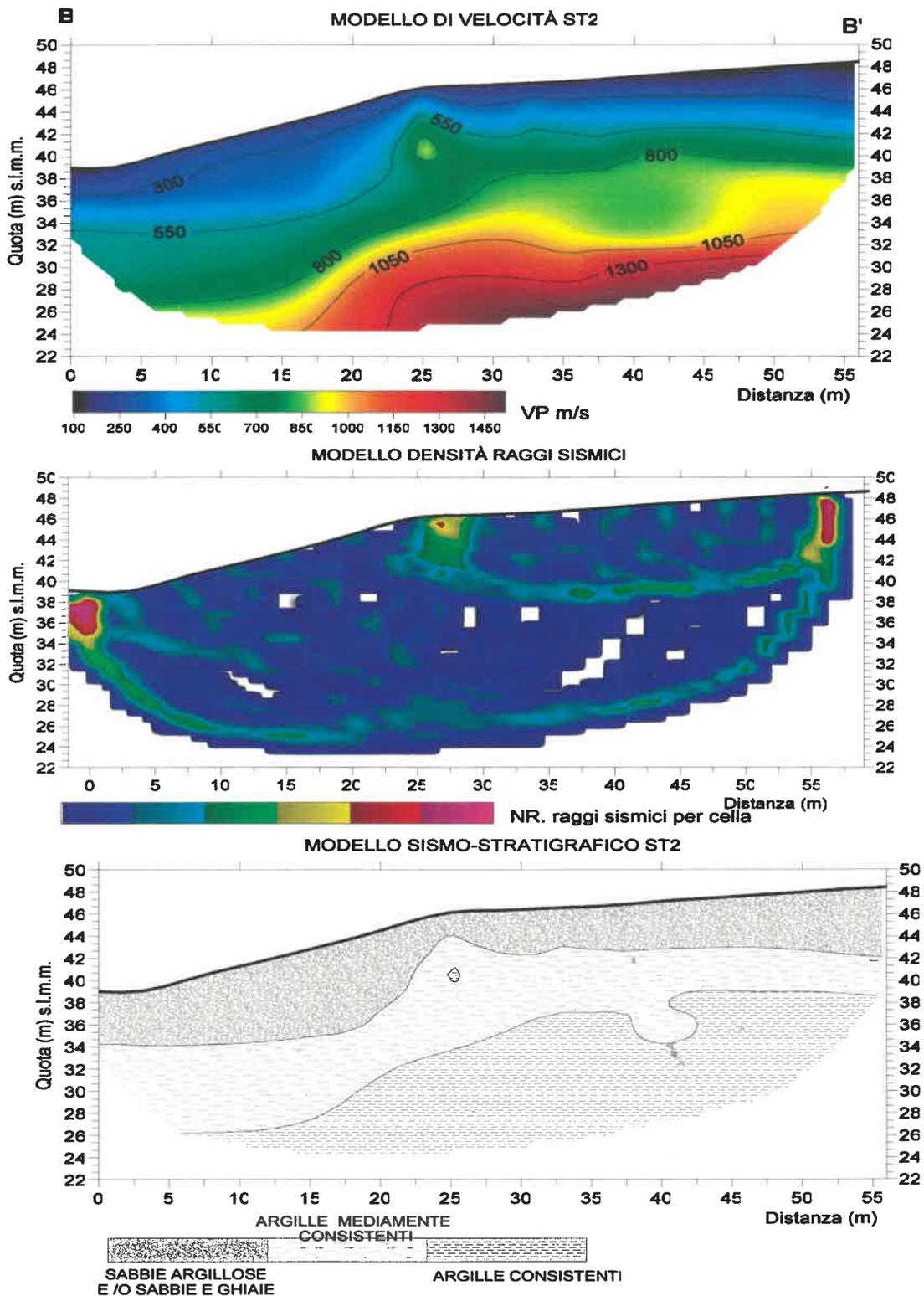
**Figura 2.**

Modello Di  
 Velocità Normalizzato  
 Contour, Modello  
 Densità Raggi  
 Sismici, Modello  
 Sismo-stratigrafico –  
 Linea Sismica ST1

- **ST\_2 LINEA SISMICA B-B'**

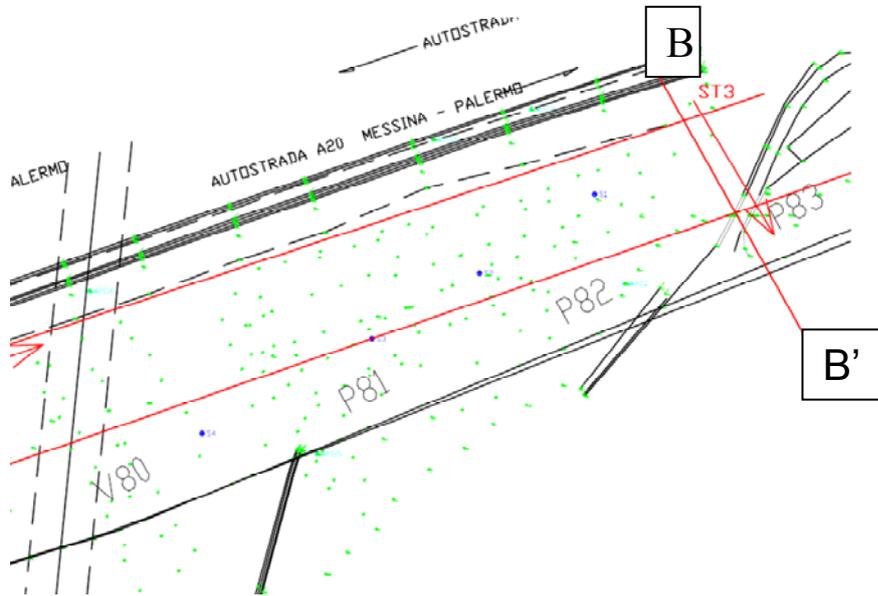


La velocità di propagazione dell'onda sismica longitudinale è risultata compresa tra 278,76m/sec e 1495,21m/sec. Tali variazioni di velocità sono verticali.



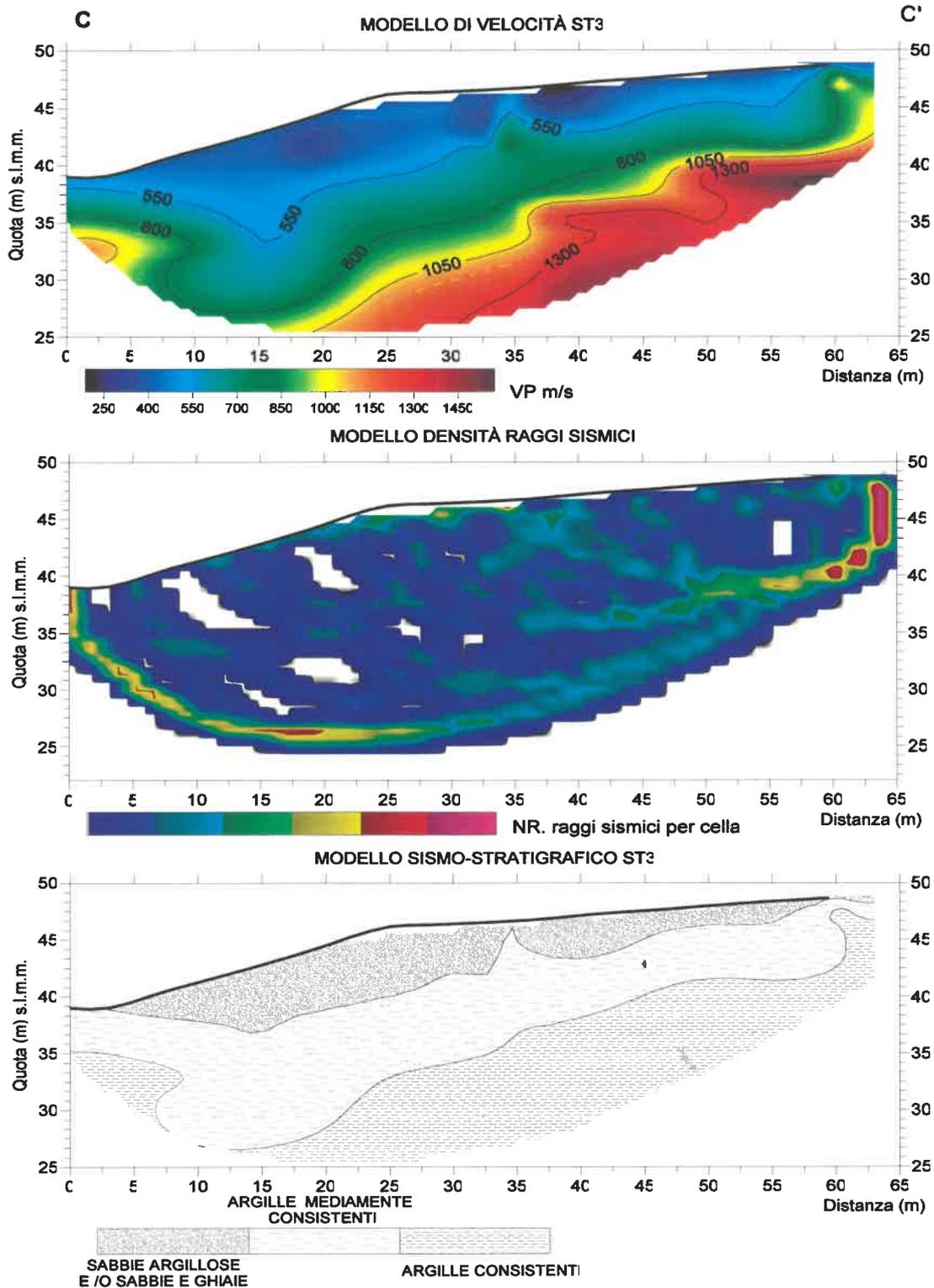
**Figura 3.** Modello Di Velocità Normalizzato Contour, Modello Densità Raggi Sismici, Modello Sismo-stratigrafico – Linea Sismica ST\_3

- **ST\_3 LINEA SISMICA C-C'**



La velocità di propagazione dell'onda P è risultata compresa tra 205,9 m/sec e 1544,1 m/sec. Le variazioni di velocità rilevate sono prevalentemente verticali.

Alla distanza di circa 7 metri dall'origine si riscontra un aumento dello spessore della copertura superficiale morfologia sinforme.



**Figura 4. Modello Di Velocità Normalizzato Contour, Modello Densità Raggi Sismici, Modello Sismo-stratigrafico – Linea Sismica ST\_3**

**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
 Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
 95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona Industriale, Capannone n. 5  
 94010 Catenanuova (EN)

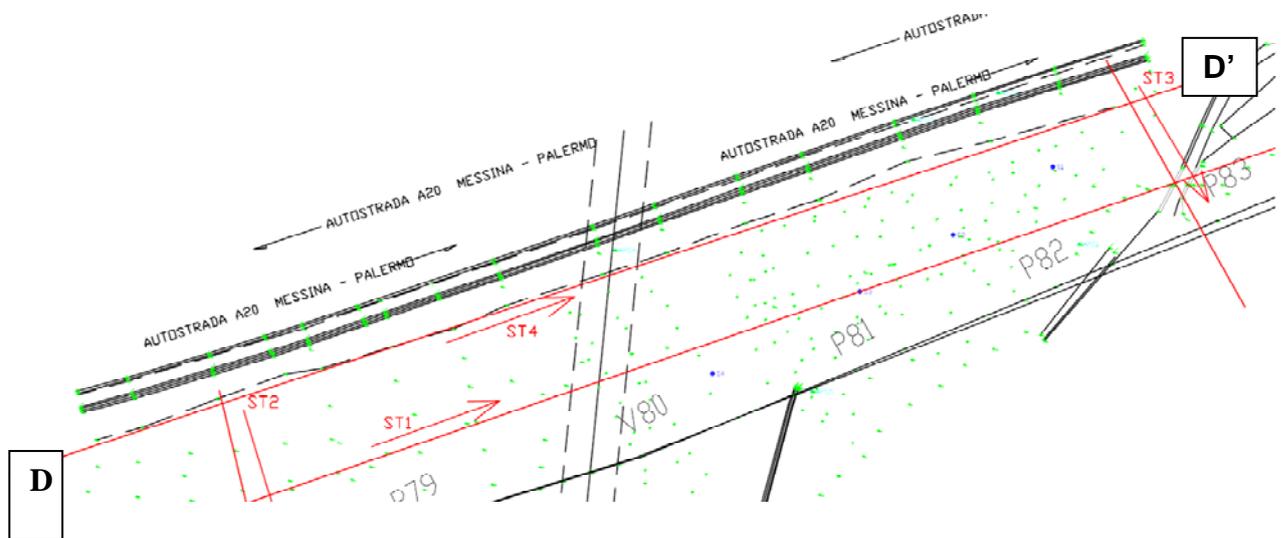
Fax +39 095 7336297

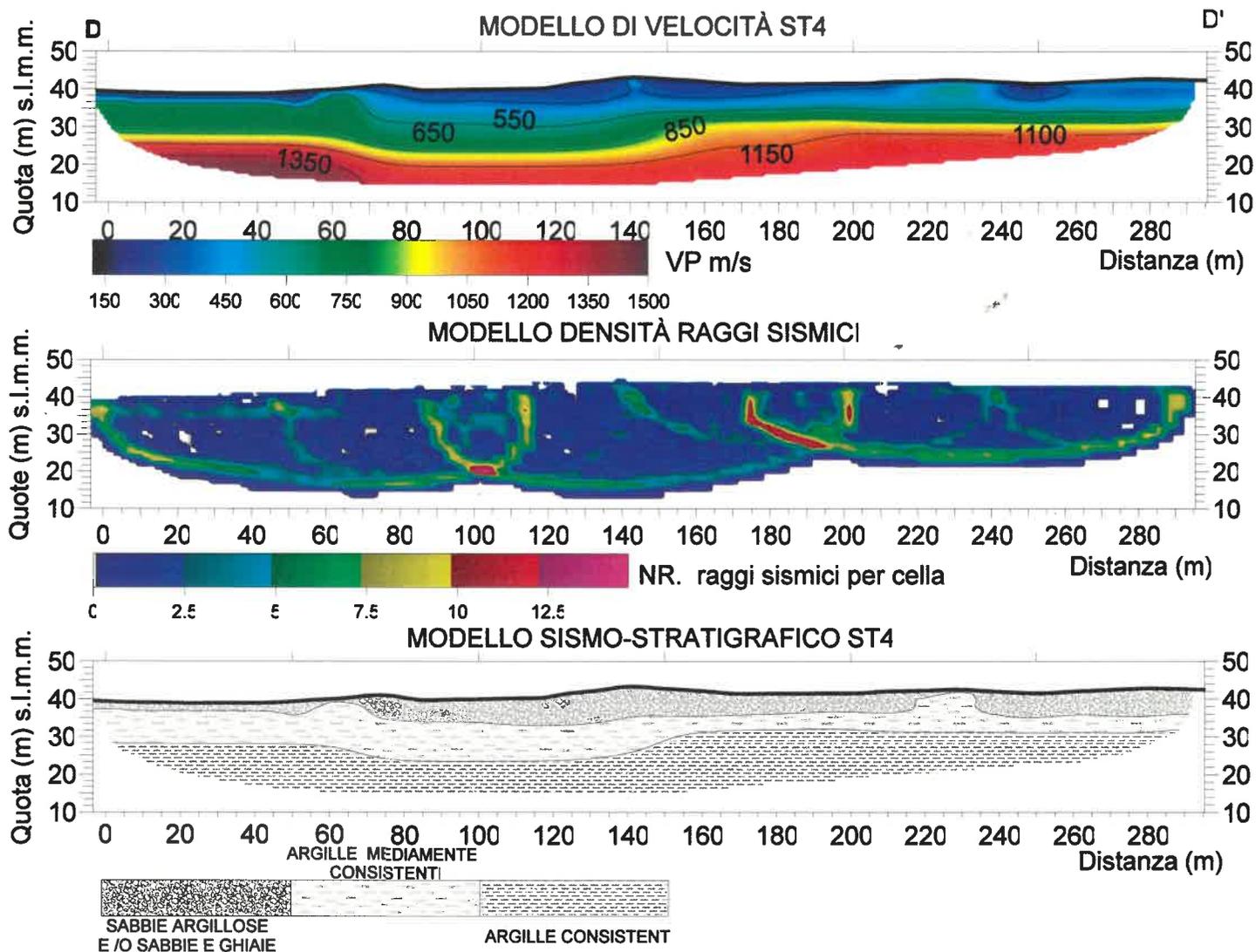
**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
 94018 Troina (EN)

- **ST\_4 LINEA SISMICA D-D'**

La velocità di propagazione delle onde sismiche P è risultata compresa tra 200,5 m/s e 1502,7 m/s. Le variazioni di velocità sono prevalentemente verticali e sono da attribuire al passaggio stratigrafico dei terreni prima descritti. Dal punto di vista litologico le variazioni di velocità possono riferite alle variazioni del grado consistenza dei terreni argillosi sottostanti la copertura superficiale.





**Figura 5.**  
 Modello Di Velocità Normalizzato Contour, Modello Densità Raggi Sismici, Modello Sismo-stratigrafico – Linea Sismica ST\_4

## 5.0- RISPOSTA SISMICA DEL SITO HVSR (Horizontal/vertical spectral ratio)<sup>2</sup>

Il comportamento dei siti conseguentemente ad un input sismico è inteso in termini di differente energia e/o diversa distribuzione in frequenza della stessa a causa degli effetti di amplificazione o attenuazione selettiva di determinate frequenze (risposta in frequenza del sito). Tale azione selettiva è funzione delle caratteristiche fisiche - geometriche (litologici e strutturali) dei mezzi attraversati da un'onda sismica.

In genere i terreni rigidi presentano curve spettrali H/V (terreni rocciosi o terreni sedimentari compatti) poco amplificate e con risposte centrate nella banda "audio - frequency" ( $f > 20$  Hz) legate allo stato di alterazione superficiale del sito roccioso<sup>3</sup>, mentre le curve spettrali H/V relative ai terreni soffici sono caratterizzate da amplificazioni a frequenze  $< 10$  Hz e con livelli di ampiezza legati al contrasto di impedenza sismica. Nel presente lavoro la valutazione della risposta sismica del sito è stata esaminata attraverso il campionamento di "microtremori" al fine di quantizzare, tramite analisi dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e verticale del moto del suolo, gli effetti di amplificazione sismica locale.

### 5.1 - Descrizione del metodo

La tesi di partenza si basa sul fatto che l'energia dei microtremori consiste principalmente in onde di Rayleigh, e che l'effetto di amplificazione del sito è legato al contrasto di rigidità tra due mezzi attraversati dall'onda sismica. Recentemente è stato dimostrato [Per una rassegna si veda Bard, 1999], che i rapporti spettrali H/V utilizzati con misure di microtremore, mostrano una significativa coerenza con le forme di spettri H/V calcolati mediante registrazioni di terremoti.

<sup>2</sup> L'elaborazione dei dati è stata eseguita tramite codici di calcolo SAC sviluppati per ambiente LINUX

<sup>3</sup>BARD P.Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? in *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema Rotterdam, 1251-1279.

CRANSWICK E., 1988. The information content of high-frequency seismograms and the near-surface geologic structure of hard-rock recording sites. *Pageoph* 128, 333-363.

IRIKURA K. AND KAWANAKA T.: Characteristics of microtremors on ground with discontinuous underground structure; *Bull. Disaster Prev. Inst., Kyoto Univ.*, 30, 81-96 – 1980.

LACHET, C & BARD P-Y (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*, 42, 377-397, 1994.

LERMO J. & CHÁVEZ-GARCÍA F. : Are microtremor Useful in Site Responce Evaluation ?. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 5, 1350-1364, Oct. 1994

MARRA F., AZZARA R., BELLUCCI F., CASERTA A., CULTRERA G., MELE G., PALOMBO B., ROVELLI A., AND BOSCHI E. (in press) – Large amplification of ground motion at rock sites within a fault zone in Nocera Umbra (Central Italy).

NAKAMURA, Y., 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Rept. RTRI. Jpn.* 30, 25-33.

TOKIMATSU K., 1995: Geotechnical site characterization using surface waves; First international conference on earthquake geotechnical engineering. - IS-TOKYO '95.

In accordo con quanto descritto sugli effetti di sito [Nakamura, 1989; Lachet & Bard, 1994; Lermo & Chàvez-García, 1994], in questo lavoro è stata applicata la tecnica dei rapporti spettrali

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)},$$

H/V [Nakamura, 1989]

presupponendo un probabile contrasto di rigidità sismica tra i terreni costituenti il substrato.

## 5.2 - Acquisizione ed elaborazione dati

Al fine di applicare la tecnica dei rapporti spettrali H/V, è necessario campionare i microtremori registrando le tre componenti del moto del suolo. Specificatamente è stato utilizzato un trasduttore del moto del suolo 3D, avente periodo fondamentale di 1 s., interfacciato ad un sistema di conversione analogico – digitale.

Le caratteristiche tecniche del sistema sopra descritto sono:

- SAMPLE RATE 0.01 e 0.00005 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
- n.1 geofono 3D periodo 1 Hz.

Per il sito in esame è stata registrata una serie temporale della durata di 30 min. Tale segnale è stato suddiviso in finestre temporali di 40.96 sec, selezionando quelle il cui rapporto STA/LTA non supera le 2 unità. Nella figura seguente sono riportati i criteri che hanno consentito la scelta delle serie temporali da elaborare.

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

**Automatic Window Selection Parameters** ✕

Window length for the short term (sta) in sec:

Window length for the long term (lta) in sec:

Minimum level for sta/lta threshold:

Maximum level for sta/lta threshold:

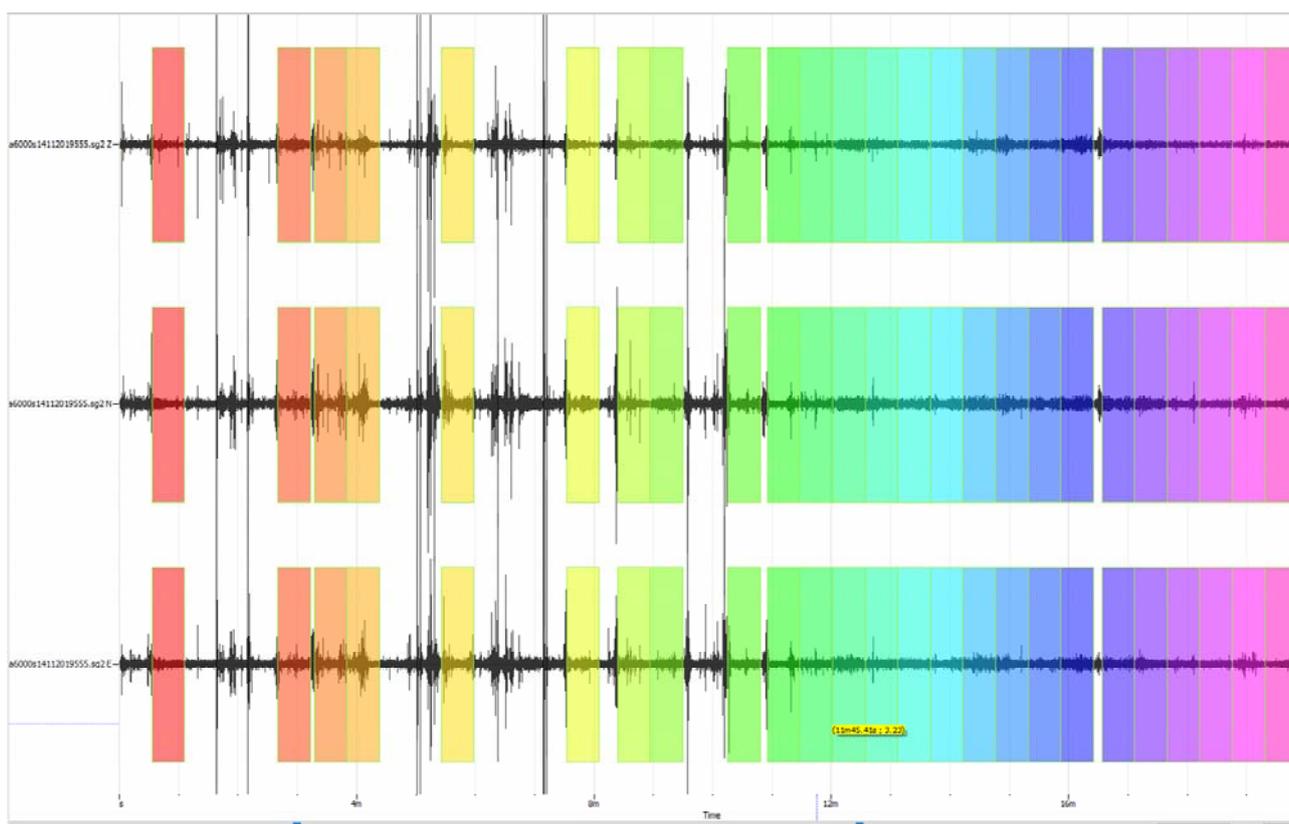
Window length for selected windows in sec:

Overlap percentage for selected windows:

Tolerance level for bad points (sec):

Saturation check:
  Removal of very noisy windows:

**Figura 6**– Parametri per la selezione delle finestre temporali



**Figura 7**– Finestre temporali selezionate sulla base dei parametri di fig. 2.

**CONSORZIO L.R.**  
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647  
consorzio@lr-srl.it  
[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)  
  
Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

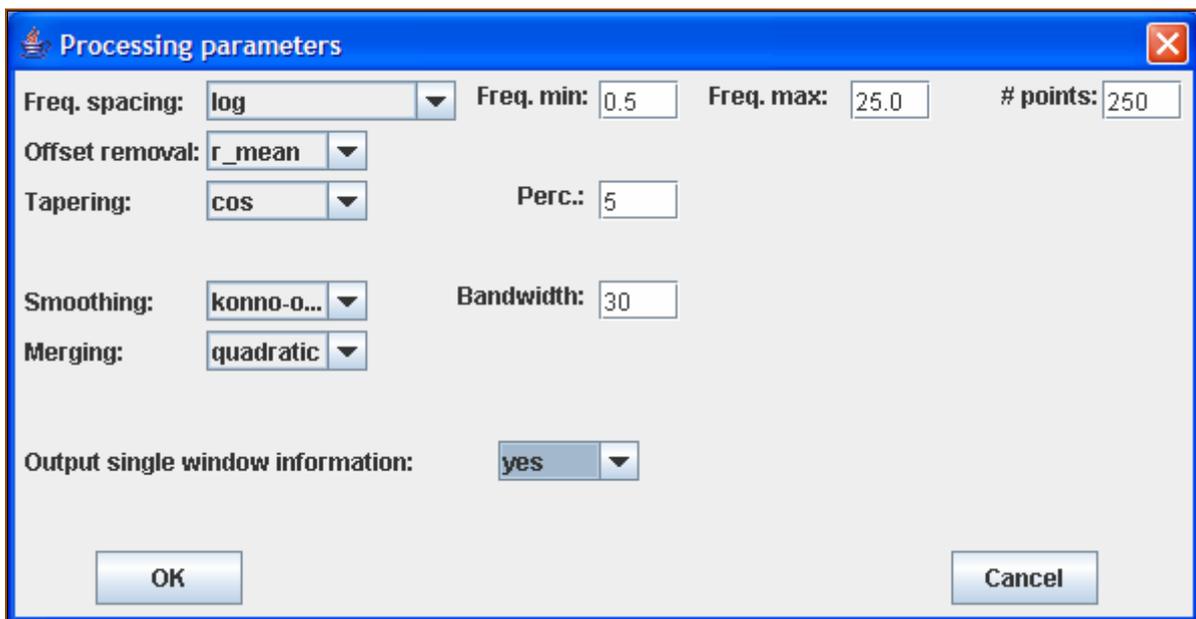
Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)  
  
Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.**  
Terre e Rocce

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

Le finestre temporali selezionate sono state processate nel seguente modo:

- applicazione di una funzione “base - line” al fine di eliminare off - set e trend anomali;
- applicazione di una funzione “cosine-taper (5%) ” per evitare l’insorgenza di effetti di bordo;
- applicazione di filtro a banda passante tra 0.5 e 25 Hz;
- per ciascuna finestra temporale è stata applicata una “smoothing function” del tipo Konno-ohmachi con una bandwidth = 30;
- calcolo degli spettri dei microtremori relativi ad ogni finestra temporale tramite il comune algoritmo della Fast Fourier Transform (FFT);
- calcolo dei rapporti spettrali (media geometrica  $\pm$  1 s.d) H/V.



**Processing parameters**

Freq. spacing:  Freq. min:  Freq. max:  # points:

Offset removal:

Tapering:  Perc.:

Smoothing:  Bandwidth:

Merging:

Output single window information:

**Figura 8–** Parametri utilizzati per il calcolo dei rapporti H/V

### 5.3 - CRITERI PER LA INTERPRETAZIONE DELLA CURVA H/V E RISULTATI

Di seguito sono riportati i criteri utilizzati per la validità della curva H/V, per la definizione del picco H/V ed i risultati spettrali delle misure effettuate.

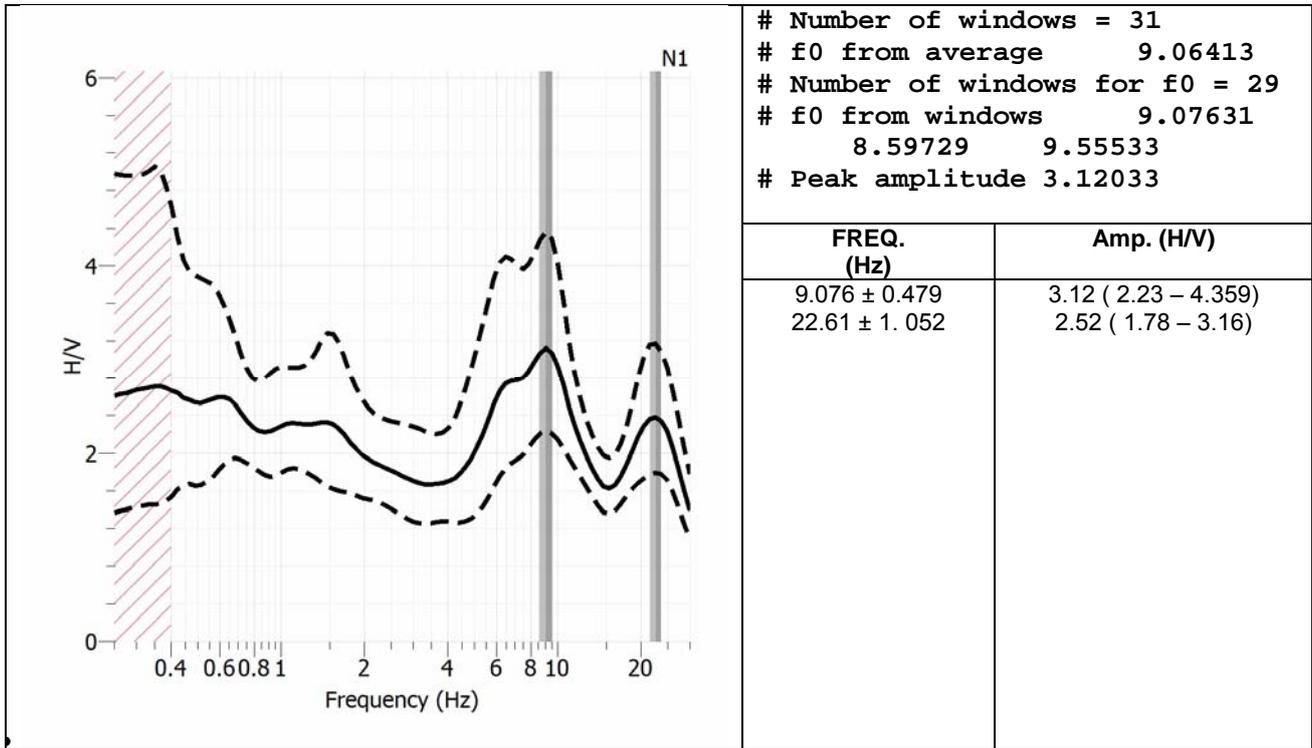
Tali criteri riguardano la validità sia della curva H/V sia della frequenza di picco. In particolare per quanto riguarda la validità della curva H/V devono essere rispettati tutti i requisiti, mentre per la frequenza di picco occorre che siano soddisfatti cinque criteri su sei.

CRITERI PER LA VALIDITA' CURVA H/V	CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEL PICCO H/V
1. $f_0 > \frac{10}{l_w}$	1. $\exists f^- \in \left[ \frac{f_0}{4}, f_0 \right] \mid A_{\frac{H}{V}}(f^-) < \frac{A_0}{2}$
2. $n_c(f_0) > 200$	2. $\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{\frac{H}{V}}(f^+) < \frac{A_0}{2}$
	3. $A_0 > 2$
3. $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	4. $f_{\text{picco}} \left[ A_{\frac{H}{V}}(f) \pm \sigma_A(f) \right] = f_0 \pm 5\%$
<b>oppure</b>	5. $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	6. $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

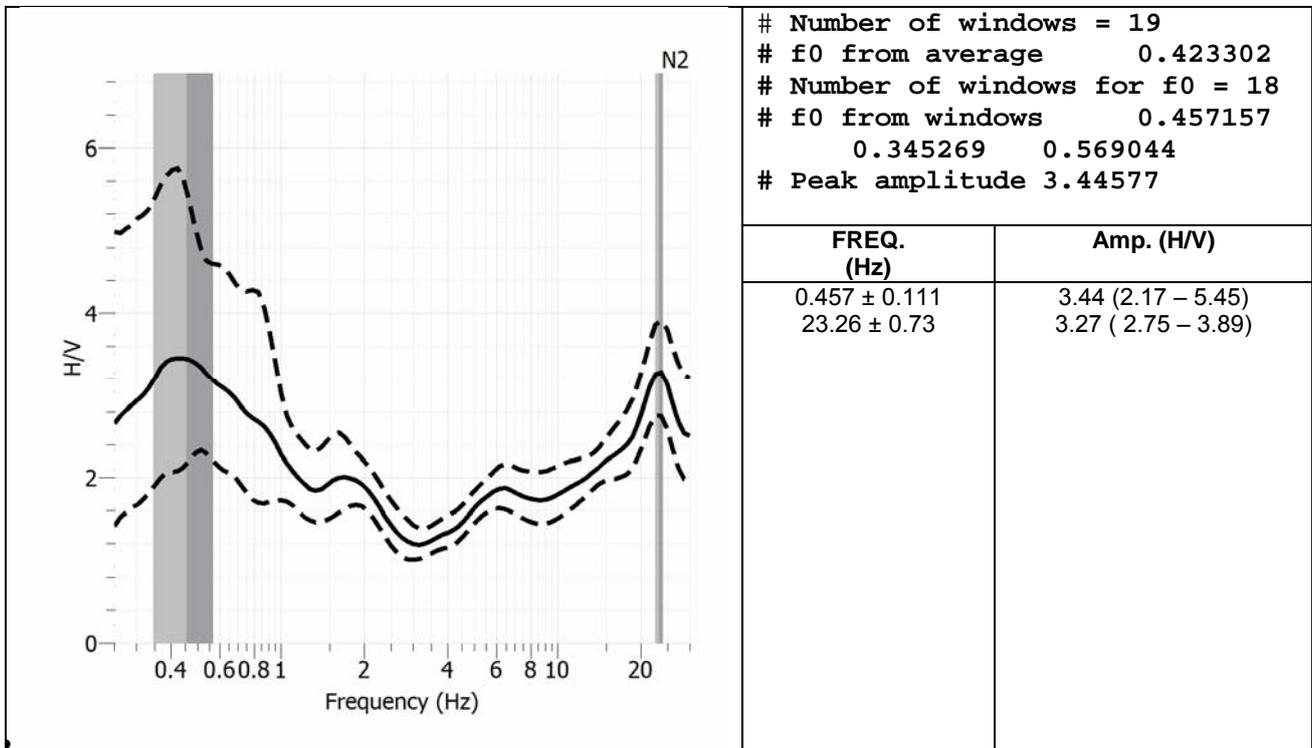
- $l_w$ = lunghezza della finestra temporale					
- $n_w$ = numero di finestre temporali selezionate per il calcolo della curva media H/V					
- $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ numero significativo di cicli					
- $f$ = frequenza (Hz)					
- $f_0$ = frequenza del picco H/V					
- $\sigma_f$ = standard deviation della frequenza del picco H/V ( $f_0 \pm \sigma_f$ )					
- $\varepsilon(f_0)$ = soglia di stabilità per le condizioni $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$					
- $A_0$ = Ampiezza del picco H/V alla frequenza $f_0$					
- $A_{H/V}(f)$ = Ampiezza della curva H/V alla frequenza $f$					
- $f^-$ = frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ per la quale $A_{H/V}(f) < A_0/2$					
- $f^+$ = frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ per la quale $A_{H/V}(f) < A_0/2$					
- $\sigma_A(f)$ = standard deviation di $A_{H/V}(f)$ , dove $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva media $A_{H/V}$ va divisa e moltiplicata					
- $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation di $\log A_{H/V}(f)$ , dove $\sigma_{\log H/V}(f)$ è il valore assoluto per il quale la curva media H/V va sommata o sottratta.					
- $\theta(f_0)$ = valore soglia per le condizioni di stabilità $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$					
<b>valori soglia per <math>\sigma_f</math> e <math>\sigma_A(f_0)</math></b>					
<b>Banda di frequenza [Hz]</b>	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
<b><math>\varepsilon(f_0)</math> [Hz]</b>	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
<b><math>\theta(f_0)</math> per <math>\sigma_A(f_0)</math></b>	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
<b>Log <math>\theta(f_0)</math> per <math>\sigma_{\log H/V}(f_0)</math></b>	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

TABELLA. 2 – Tabella riepilogativa dei criteri di validità delle curve H/V e dei picchi di frequenza.

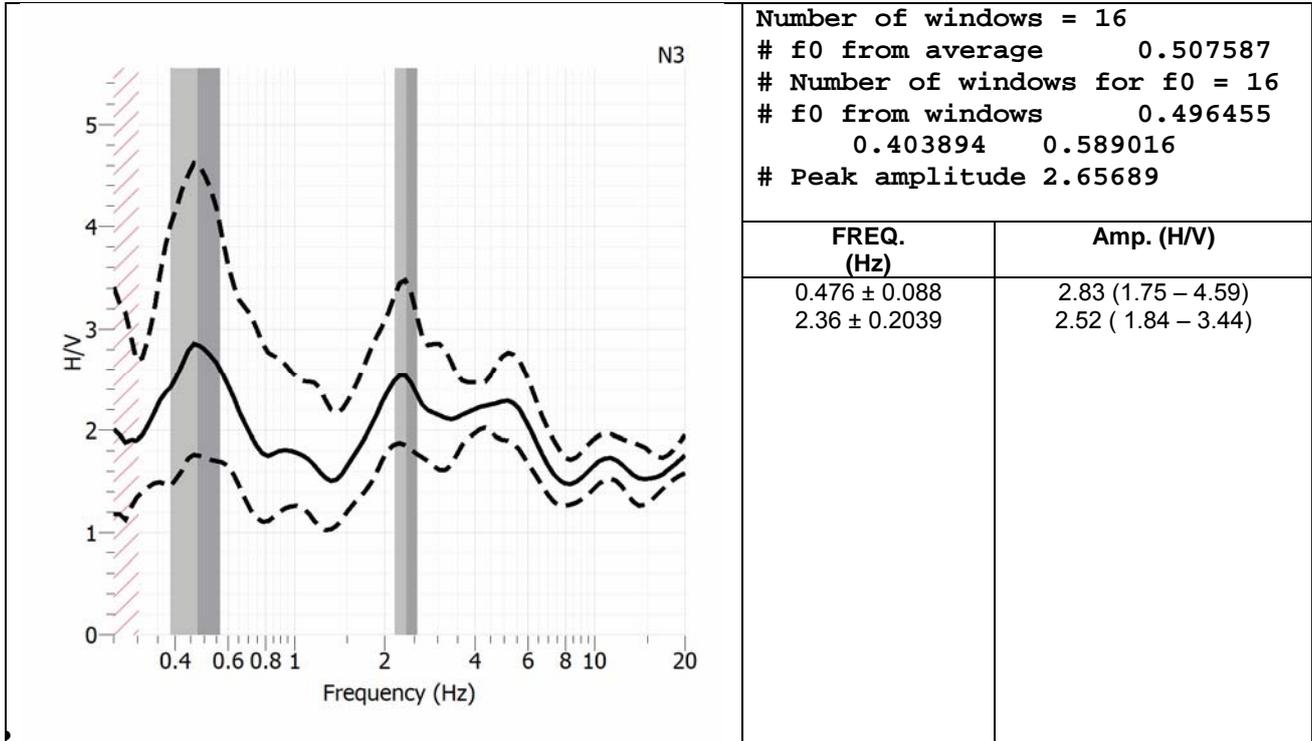
• **N1**



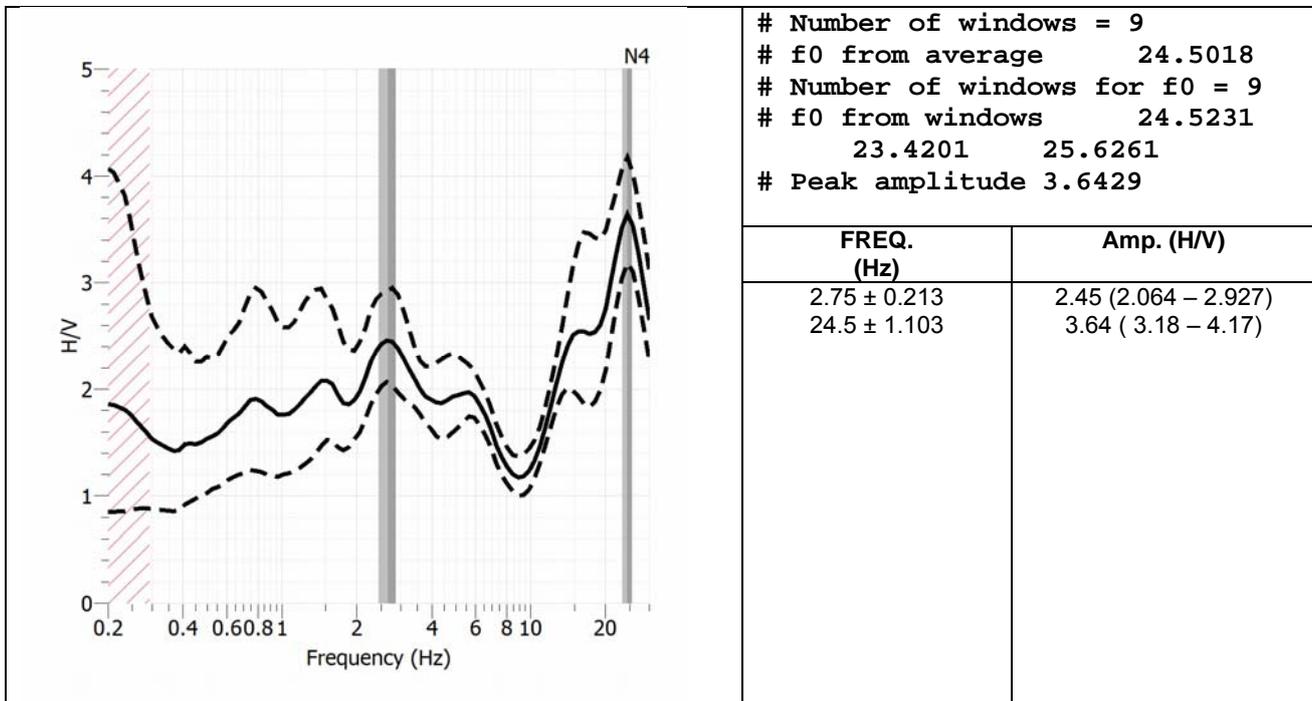
• **N2**



• **N3**



• **N4**



## 6.0 - PROVA SISMICA MULTICANALE MASW (Multichannel Analysis of Surface WAVES)

### 6.1 - Premessa

Il metodo MASW è una tecnica di indagine non invasiva che consente la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, 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.

### 6.2 - Strumentazione e Configurazione Geometrica

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

- Velocità di campionamento dei segnali compresa tra 0.002 e 0.000033 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 con interspazio (Gx) 3 metri;
- n. 2 energizzazioni ad offset (Sx) variabile come multiplo del Gx in A/R;
- lunghezza delle tracce sismiche pari a 4.096 sec.;
- massa battente pesante di 10 Kg.

Le configurazioni adottate hanno consentito di mitigare gli effetti near-field dovuti alle onde di volume ed ha altresì consentito di avere le seguenti risoluzioni spazio-temporali: lungo i numeri d'onda k la risoluzione è stata pari a  $0.261 \text{ m}^{-1}$ , mentre la risoluzione in frequenza è stata pari a 0.244 Hz.

**CONSORZIO L.R.  
Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

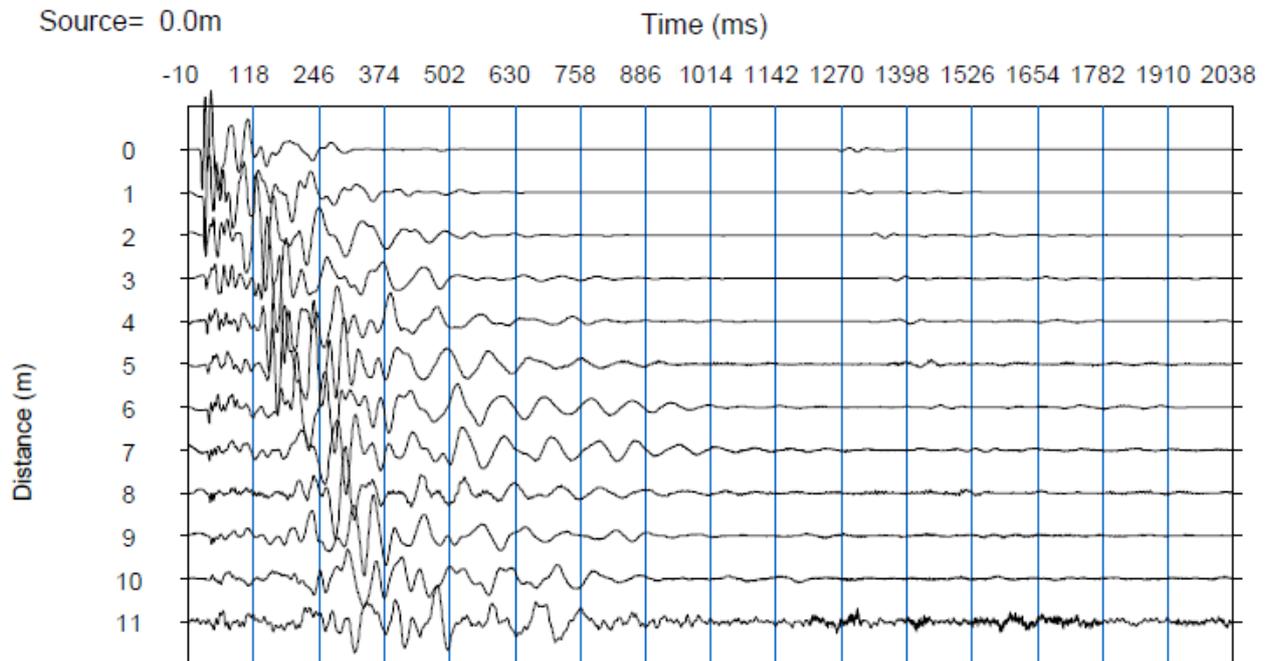
**Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

### 6.3 - Elaborazione Dati

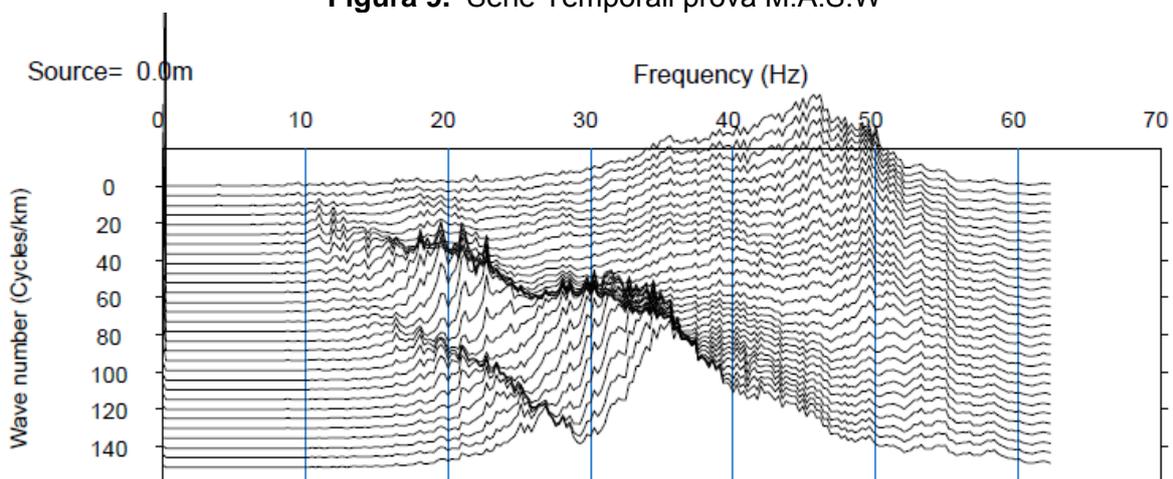
L'analisi MASW può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali (fig. 9) nel dominio frequenza  $f$  – numero d'onda  $K$  (fig. 10);



a.sg2

**Figura 9.** Serie Temporali prova M.A.S.W



3.sg2

**Figura 10.** Analisi frequenza/numero d'onda M.A.S.W

**CONSORZIO L.R.**  
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

- 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  $V_{\text{fase}}$  (m/sec) – frequenza (Hz) (fig. 11).

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

- 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  $V_p$  e la densità di massa  $\rho$  degli strati che costituiscono il modello del suolo.
- 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.

Le operazioni suddette sono state ripetute per tutte le registrazioni relative agli scoppi.

**CONSORZIO L.R.**  
**Laboratori Riuniti**

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg  
delle Imprese di Catania n. 05184000874.  
Iscritta al R.E.A. 270647

[consorzio@lr-srl.it](mailto:consorzio@lr-srl.it)

[www.LR-SRL.it](http://www.LR-SRL.it)

**Uffici e Sede legale**

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

**Tel. +39 095 336490**

**Laboratorio Aut. L. 1086/71**

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

**Fax +39 095 7336297**

**Laboratorio Aut.**  
**Terre e Rocce**

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)

## 6.4 - Risultati prova MASW

I risultati della prova MASW consistono nella stima della curva di dispersione e nel calcolo del modello di velocità. Di seguito si riportano la curva di dispersione sperimentale, il modello di velocità finale calcolato, la sovrapposizione della curva sperimentale con quello teorica, il calcolo del parametro  $V_{S,eq}$  (2) per l'attribuzione della categoria del sottosuolo e la tabella dei moduli elastici calcolati.

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

(2)

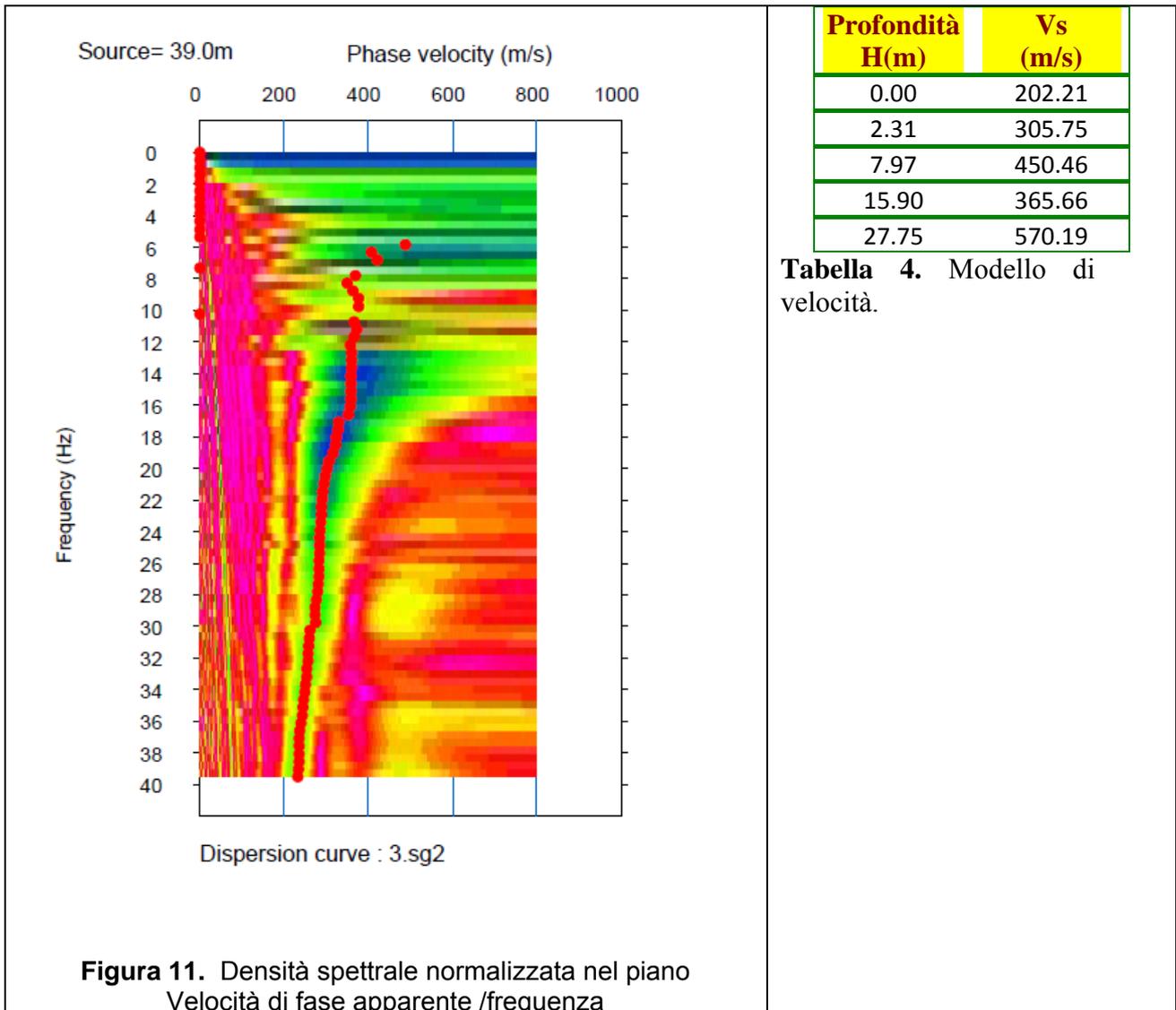
CATEGORIA	TIPOLOGIA SUOLO
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

**Tabella 3** “Range” VsEQ da normativa NTC 2018 – Approccio semplificato

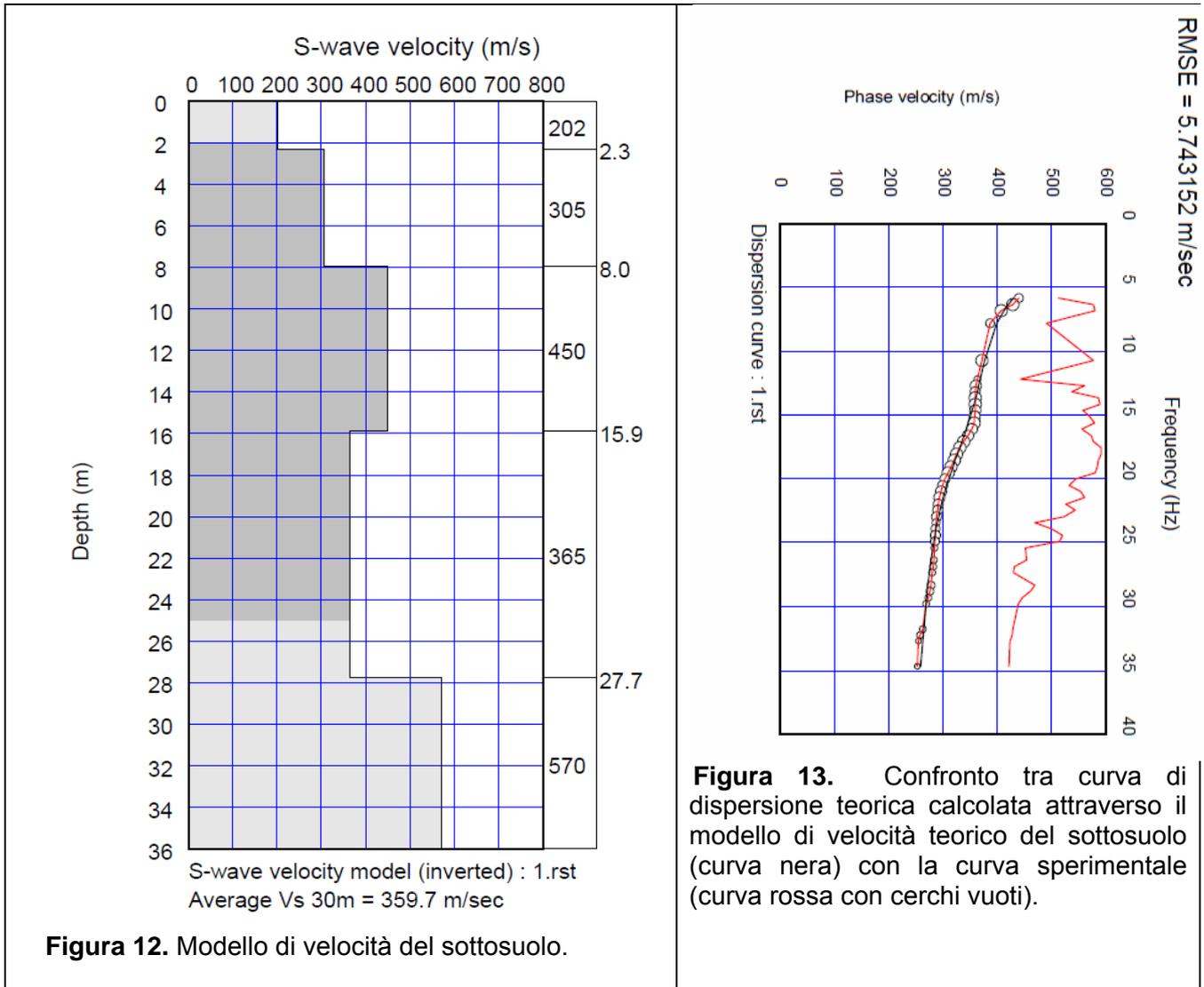
<sup>4</sup> Il valore del VS30 è stato calcolato dal piano campagna.

### 6.4.1 - M.A.S.W. 1

La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 5.81 Hz e 40.2 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 408.7 m/s e 225.05 m/s (Fig. 11). La curva di dispersione ha un andamento normale dispersivo.



La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 12) ha uno scarto RMSE pari a 5.74 m/s con la curva di dispersione sperimentale, che rappresenta il modo fondamentale.



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

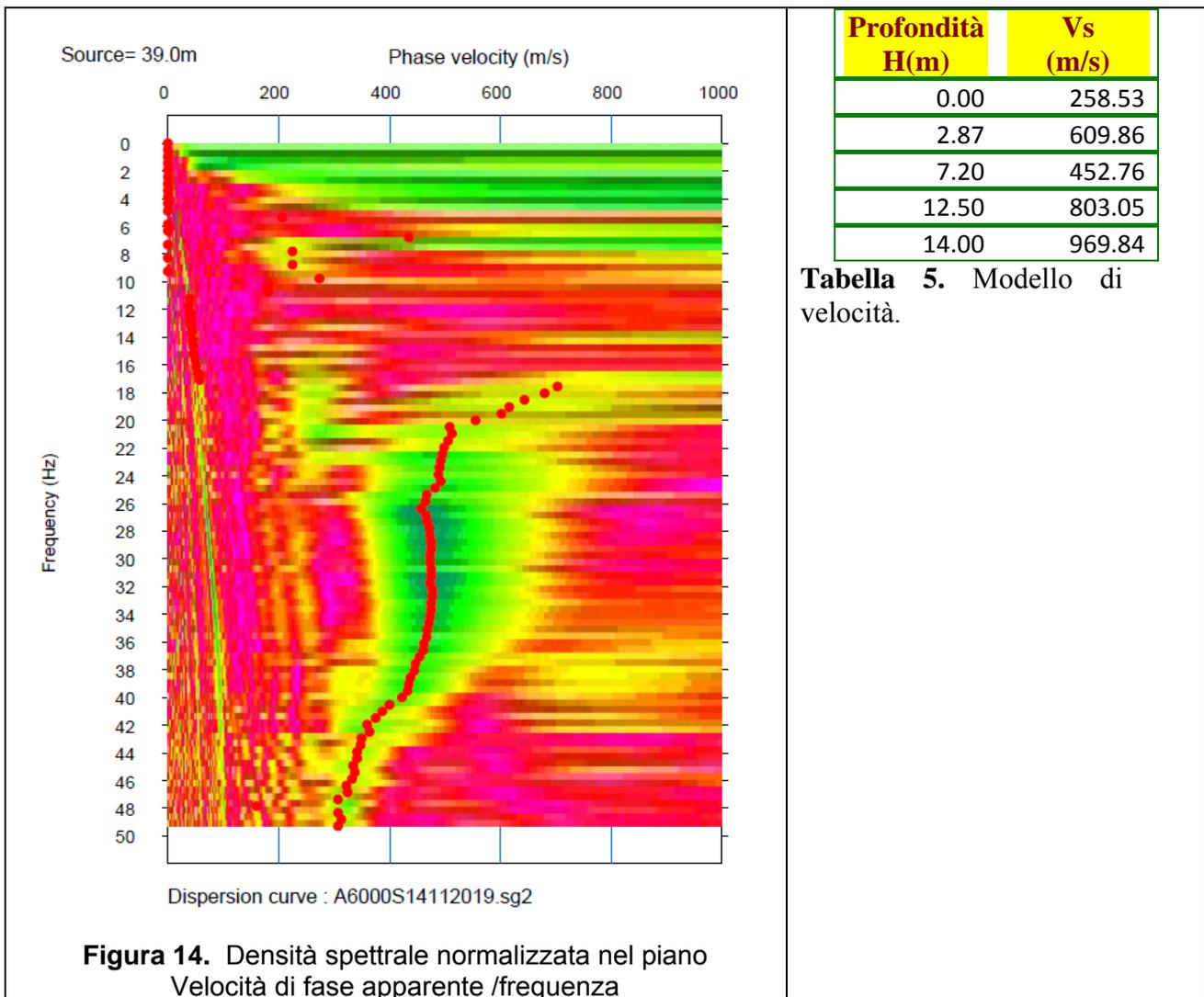
**Figura 13.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con cerchi vuoti).

Sismostrato	Profondità (m-)	Spessore30 - h -(m-)	V <sub>s</sub> (m/s)	h/V <sub>s</sub> (sec <sup>-1</sup> )	V <sub>sEQ</sub> (30) (m/s)
1	0.00	2.31	202.21	0.0114	357.57
2	2.31	5.65	305.75	0.0185	
3	7.97	7.93	450.46	0.0176	
4	15.90	11.85	365.66	0.0324	
5	27.75	2.25	570.19	0.0039	

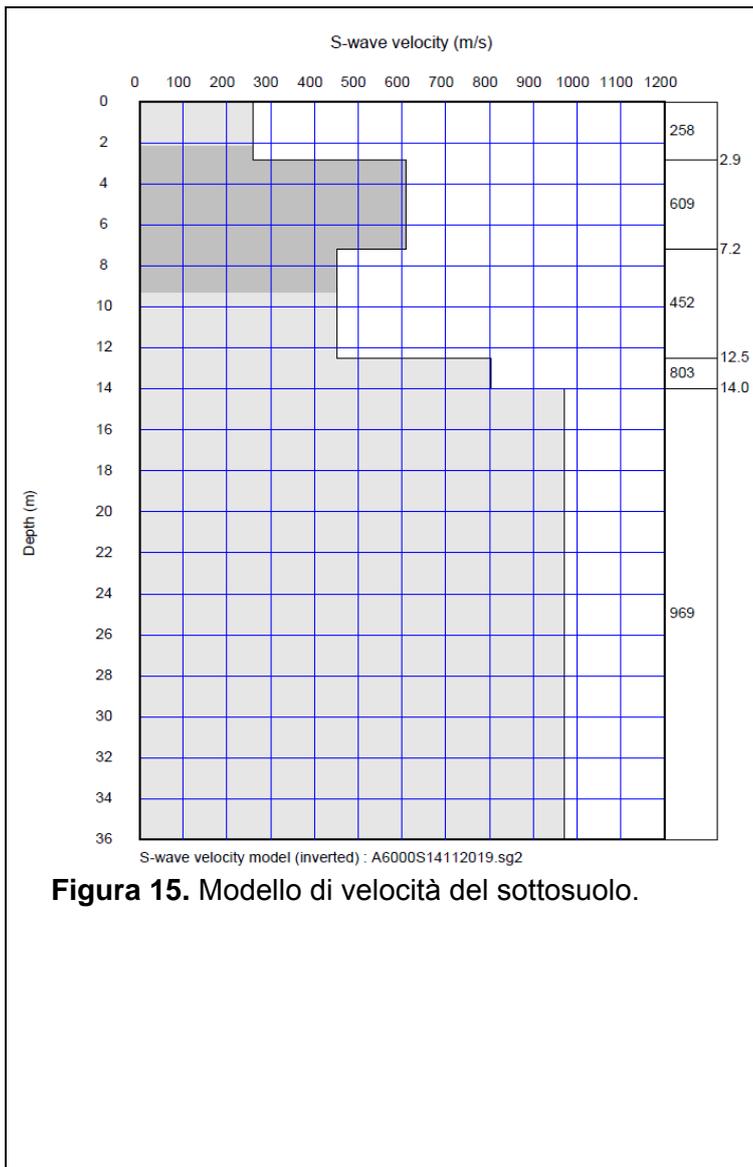
Alla Vseq calcolata corrisponde una categoria di sottosuolo C.

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

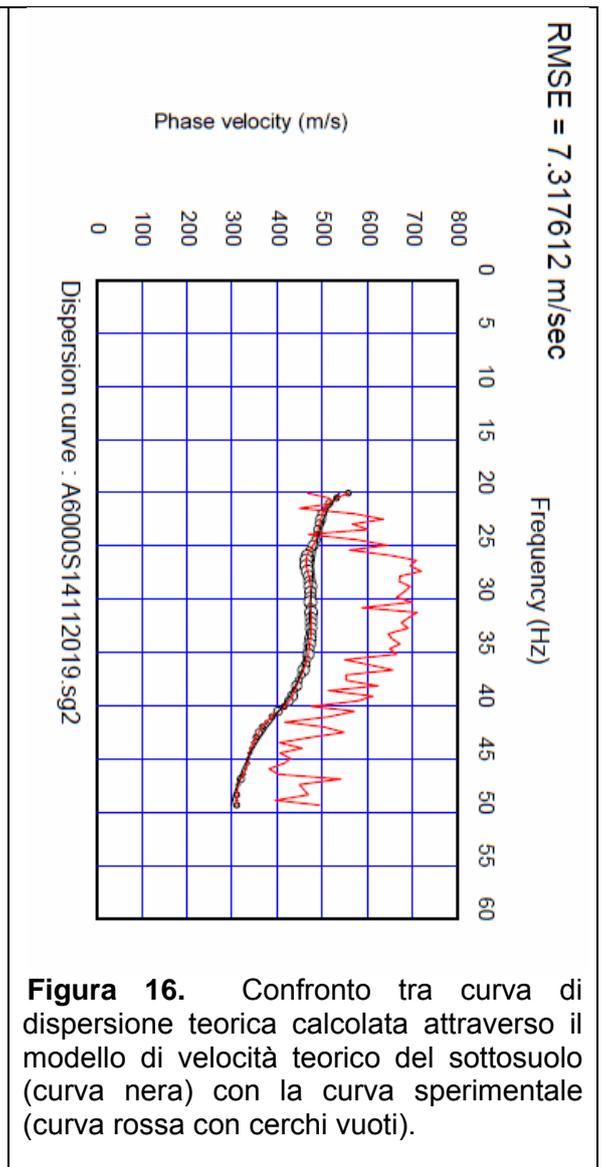
La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 17.81 Hz e 490.2 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 658.7 m/s e 321.05 m/s (Fig. 14). La curva di dispersione ha un andamento normale dispersivo.



La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 15) ha uno scarto RMSE pari a 7.3 m/s con la curva di dispersione sperimentale, che rappresenta il modo fondamentale.



**Figura 15.** Modello di velocità del sottosuolo.



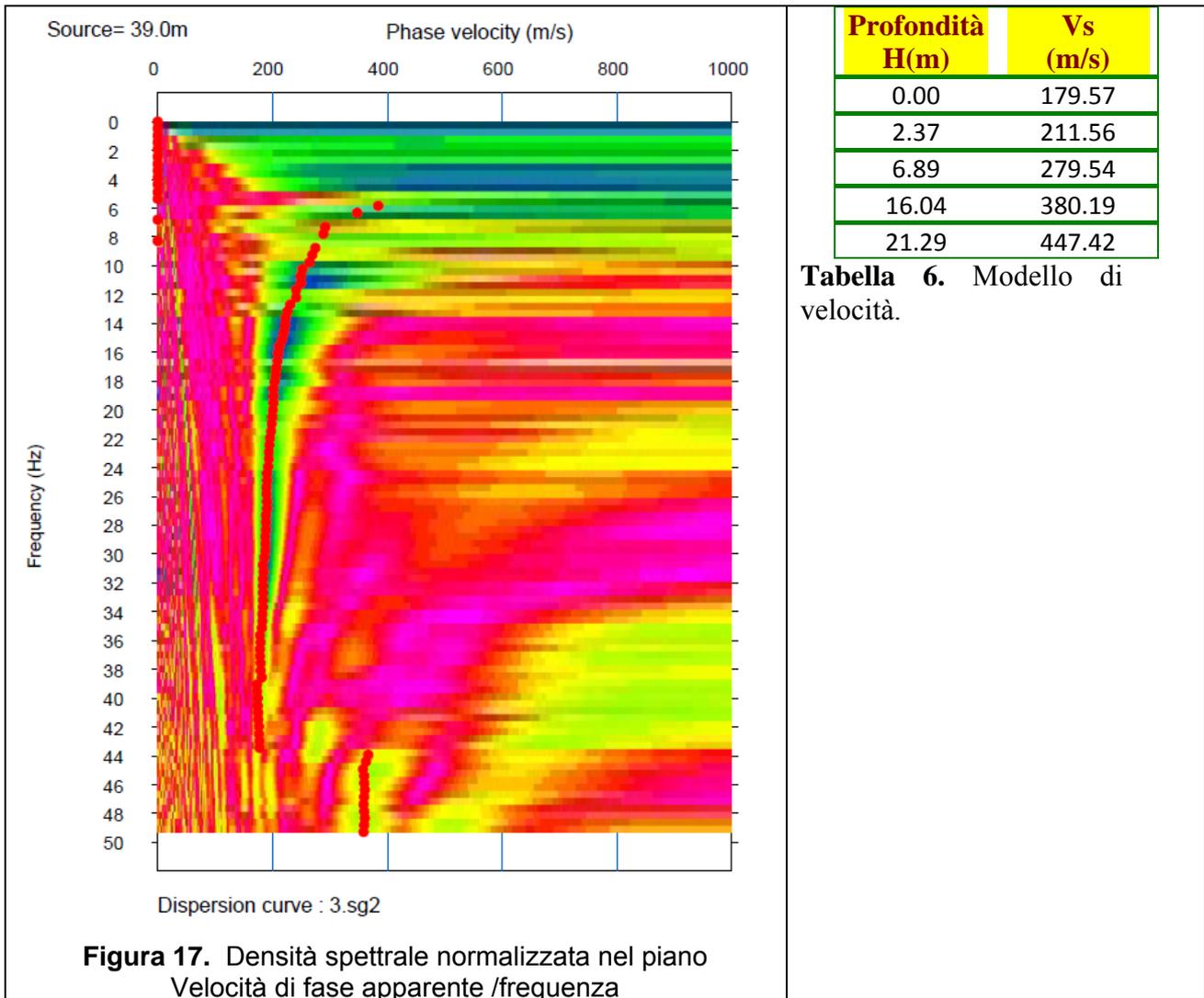
**Figura 16.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con cerchi vuoti).

Sismostrato	Profondità (m-)	Spessore30 – h -(m-)	$V_s$ (m/s)	$h/V_s$ (sec <sup>-1</sup> )	$V_{sEQ}$ (7.2 m) (m/s)
1	0.00	2.87	258.53	0.0111	417.97
2	2.87	4.33	609.86	0.0071	
3	7.20	5.30	452.76	0.0117	
4	12.50		803.05		
5	14.00		969.84		

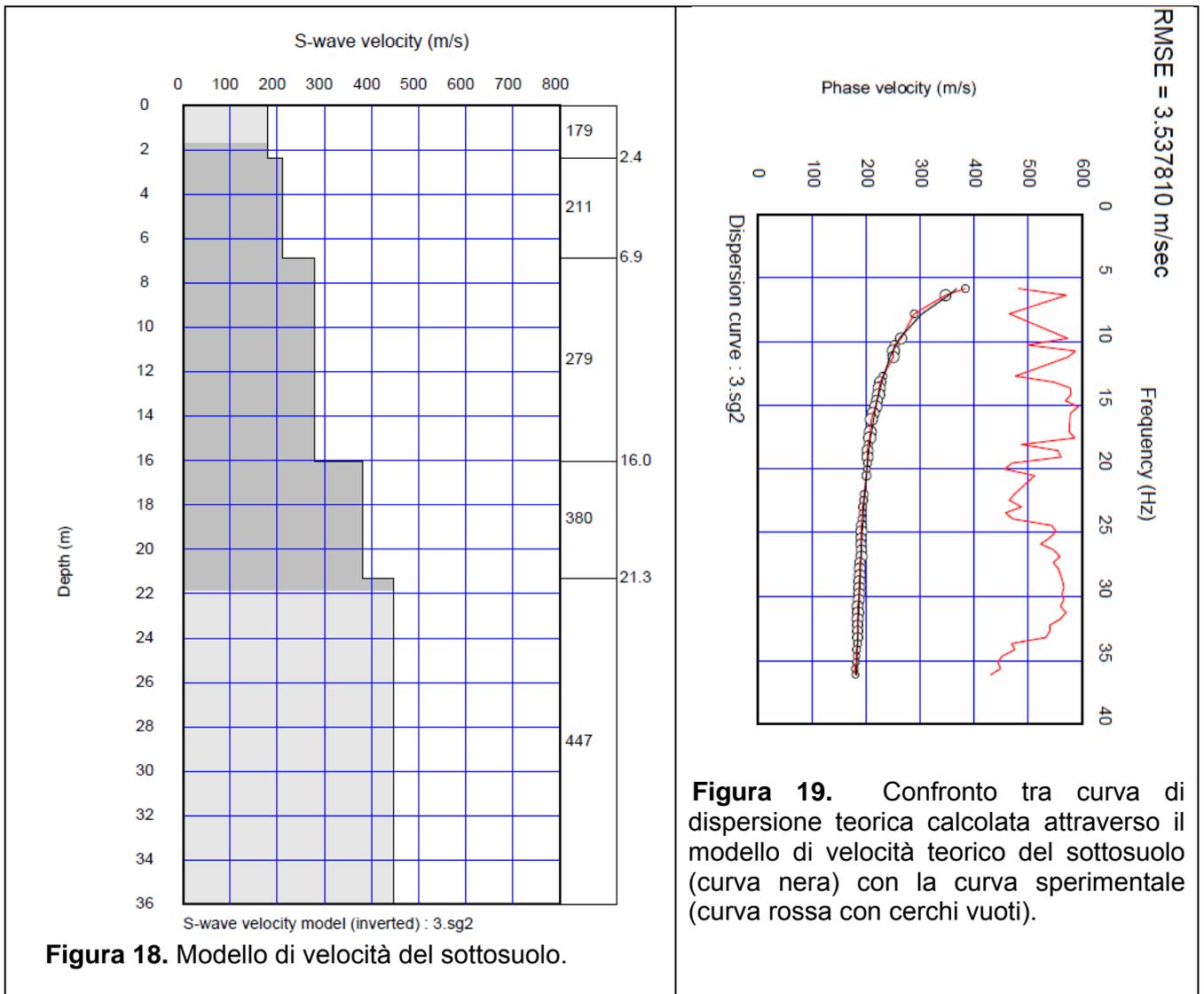
Alla  $V_{seq}$  calcolata corrisponde una categoria di sottosuolo B.

### 6.4.1 - M.A.S.W. 3

La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 5.9 Hz e 38.2 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 401.7 m/s e 191.05 m/s (Fig. 17). La curva di dispersione ha un andamento normale dispersivo.



La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 18) ha uno scarto RMSE pari a 3.53 m/s con la curva di dispersione sperimentale, che rappresenta il modo fondamentale.

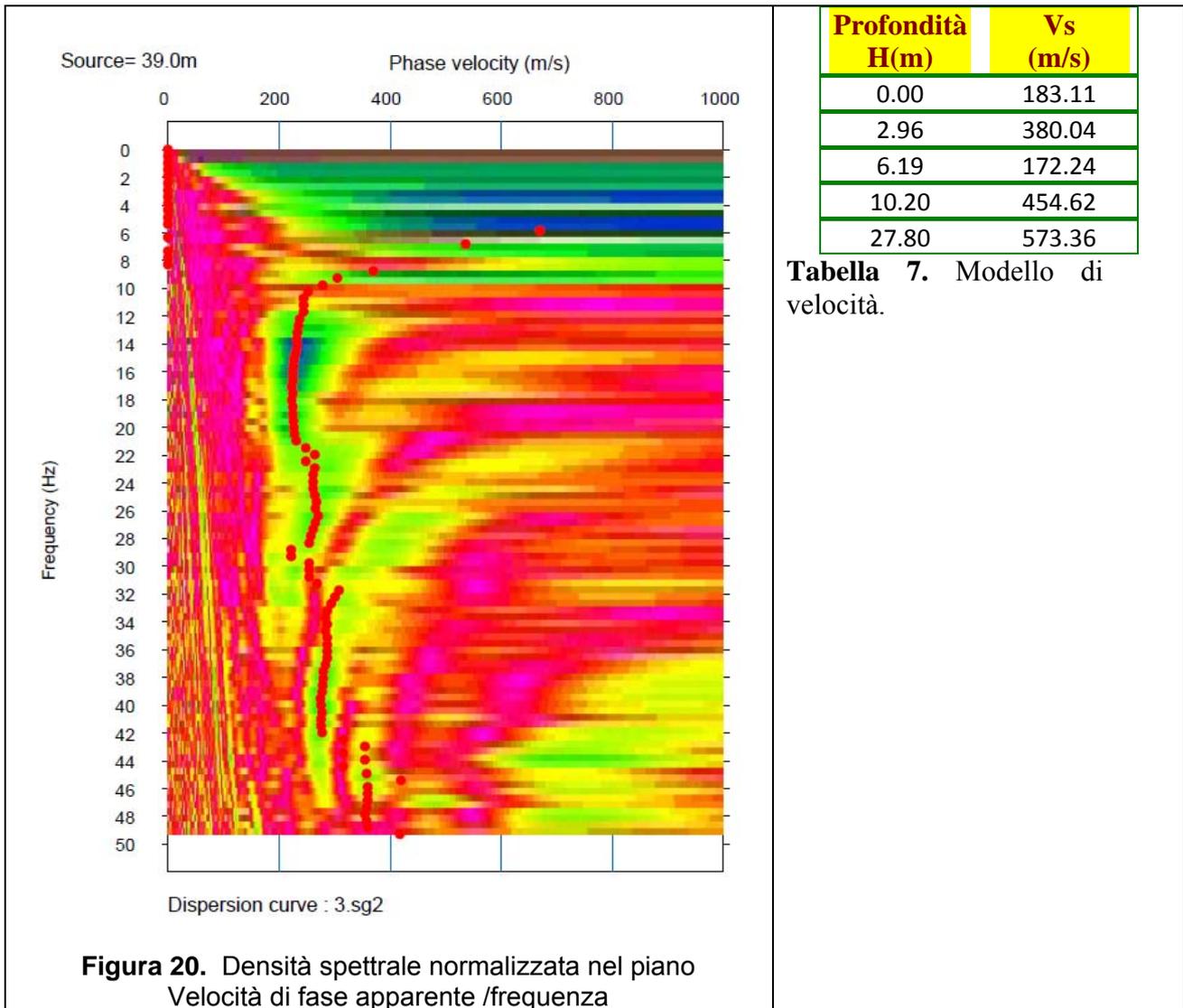


Sismostrato	Profondità (m-)	Spessore30 – h (m-)	V <sub>s</sub> (m/s)	h/V <sub>s</sub> (sec <sup>-1</sup> )	V <sub>sEQ</sub> (30) (m/s)
1	0.00	2.37	179.57	0.0132	298.28
2	2.37	4.52	211.56	0.0214	
3	6.89	9.15	279.54	0.0327	
4	16.04	5.25	380.19	0.0138	
5	21.29	8.71	447.42	0.0195	

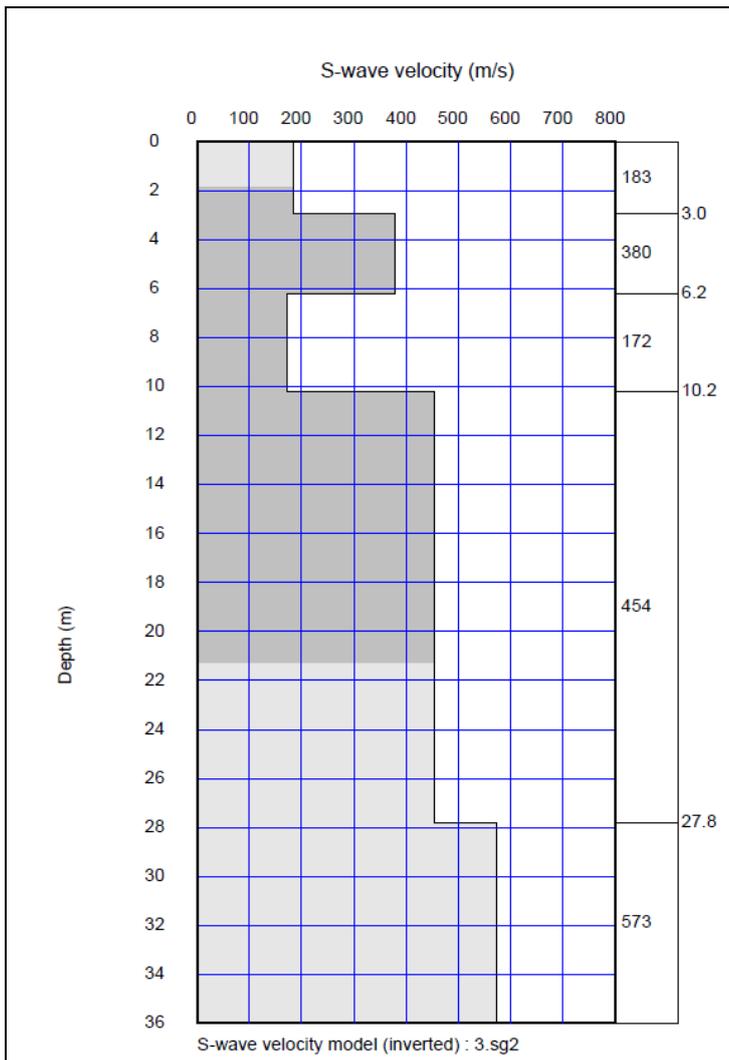
Alla Vseq calcolata corrisponde una categoria di sottosuolo C.

### 6.4.1 - M.A.S.W. 4

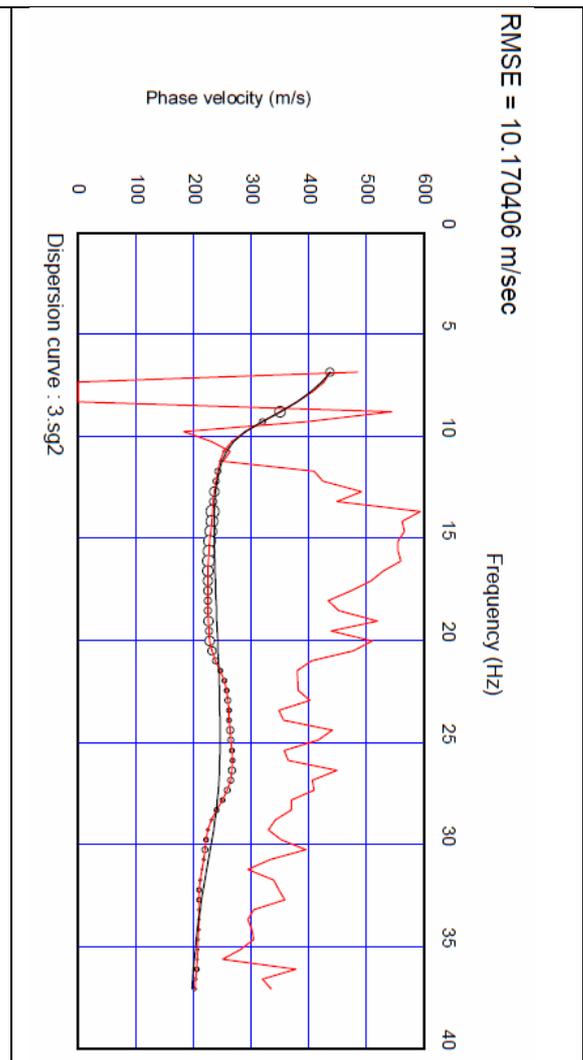
La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/s) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 6.11 Hz e 40.2 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 508.7 m/s e 251.05 m/s (Fig. 11). La curva di dispersione ha un andamento normale dispersivo.



La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità (Fig. 21) ha uno scarto RMSE pari a 10.173 m/s con la curva di dispersione sperimentale, che rappresenta il modo fondamentale.



**Figura 21.** Modello di velocità del sottosuolo.



**Figura 22.** Confronto tra curva di dispersione teorica calcolata attraverso il modello di velocità teorico del sottosuolo (curva nera) con la curva sperimentale (curva rossa con cerchi vuoti).

Sismostrato	Profondità (m-)	Spessore30 – h (m-)	$V_s$ (m/s)	$h/V_s$ (sec <sup>-1</sup> )	$V_{sEQ}$ (30) (m/s)
1	0.00	2.96	183.11	0.0162	<b>331.47</b>
2	2.96	3.23	380.04	0.0085	
3	6.19	4.01	172.24	0.0233	
4	10.20	17.60	454.62	0.0387	
5	27.80	2.20	573.36	0.0038	

Alla  $V_{seq}$  calcolata corrisponde una categoria di sottosuolo C.

**CONSORZIO L.R.**  
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874. Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

Uffici e Sede legale

Via Pablo Picasso n. 2  
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

Laboratorio Aut. L. 1086/71

Zona industriale, Capannone n. 5  
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

Laboratorio Aut.  
Terre e Rocce

Via C. Colombo n. 69  
94018 Troina (EN)