

ITINERARIO RAGUSA-CATANIA

Collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della S.S. 194 "Ragusana"

LOTTO 4 - Dallo svincolo n. 8 "Francofonte" (compreso) allo svincolo della "Ragusana"(escluso)

PROGETTO ESECUTIVO

COD. **PA898**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - COOPROGETTI -GDG - ICARIA - OMNISERVICE

PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri

Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351



IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini

Ordine dei Geologi della Regione Umbria n° 108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia n° A1373

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Luigi Mupo

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

	Dott. Ing.	N.Granieri	Dott. Ing.	M.Abram
	Dott. Ing.	F.Durastanti	Dott. Ing.	F.Pambianco
	Dott. Ing.	V.Truffini	Dott. Ing.	M.Briganti Botta
	Dott. Arch.	A.Bracchini	Dott. Ing.	L.Gagliardini
	Dott. Ing.	L.Nani	Dott. Geol.	G.Cerquiglini

MANDANTI:

	Dott. Ing.	G.Guiducci	Dott. Ing.	G.Lucibello
	Dott. Ing.	A.Signorelli	Dott. Arch.	G.Guastella
	Dott. Ing.	E.Moscatelli	Dott. Geol.	M.Leonardi
	Dott. Ing.	A.Belà	Dott. Ing.	G.Parente
	Dott. Arch.	E.A.E.Crimi	Dott. Ing.	L.Ragnacci
	Dott. Arch.	M.Panfilì	Dott. Arch.	A.Strati
	Dott. Arch.	P.Ghirelli	Archeol.	M.G.Liseno
	Dott. Ing.	D.Pelle		
	Dott. Ing.	D.Carlaccini	Dott. Ing.	F.Aloe
	Dott. Ing.	S.Sacconi	Dott. Ing.	A.Salvemini
	Dott. Ing.	C.Consorti		
	Dott. Ing.	V.Rotisciani	Dott. Ing.	G.Verini Supplizi
	Dott. Ing.	G.Pulli	Dott. Ing.	V.Piunno
	Dott. Ing.	F.Macchioni	Geom.	C.Sugaroni
	Dott. Ing.	P.Agnello		

IL RESPONSABILE DI PROGETTO:



GEOLOGIA
INDAGINI GEOGNOSTICHE - CAMPAGNA 2021
Indagini geofisiche - vol. 1


CODICE PROGETTO			NOME FILE		REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T04GE05GEORE02A			
L0408Z	E	2101	T04GE05GEORE02		A	-
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	
A	Emissione	Giu 2021	G.Cerquiglini	F. Durastanti	N.Granieri	



AQ D.G. 26/18 - C.A. n° 1

Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"

Lotto 4

	A	Stratigrafie sondaggi geognostici				
	B	Stratigrafie pozzetti esplorativi				
	C	Indagini geofisiche: MASW				
	D	Indagini geofisiche: Down-hole				
	E	Indagini geofisiche: Cross-hole				
	F	Indagini geofisiche: tom. Sism. 2D				
	G	Rilievo masse ferrose				
	H	Monitoraggio inclinometrico				
	I	Monitoraggio piezometrico				
	L	Prove di laboratorio geotecnico				
	M	Analisi chimiche				
	N	Rilievi GPS				
	O	Prove di carico su piastra				
	Commissa	Rev.	Periodo di indagine	Data Emissione	Redazione (RS)	Verifica (VRSQ)
526/1	0	Giugno-Ottobre 2021	05/10/2021	dott. geol. Marco Pirrone	dott. geol. Salvatore Manta	dott. ing. Vincenzo Arena

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

PROVA MASW ME207 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME207	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).


La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n° 12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Callianissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 L.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

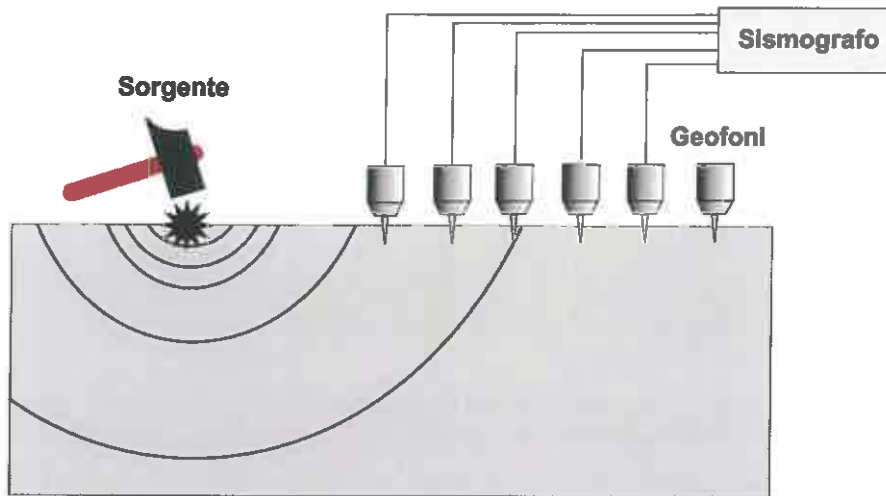


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Colaninno/01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 L.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima ag (e dei parametri Fo, Tc* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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


dove:

hi = spessore dell'i-esimo strato

Vs,i= velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.I.R.C.E.M. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Colfaniello: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 L.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
Data prova	20/07/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

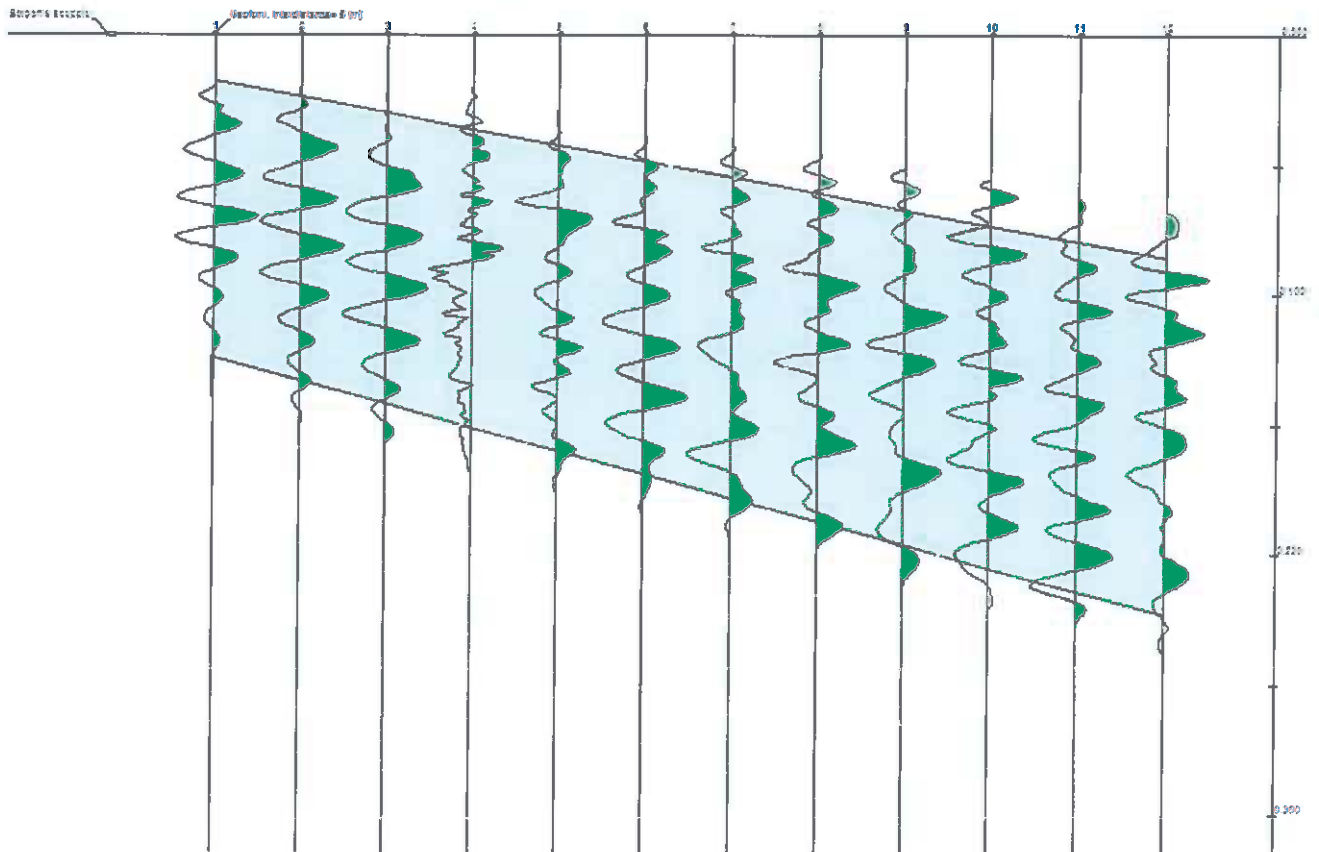


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Gallinella: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

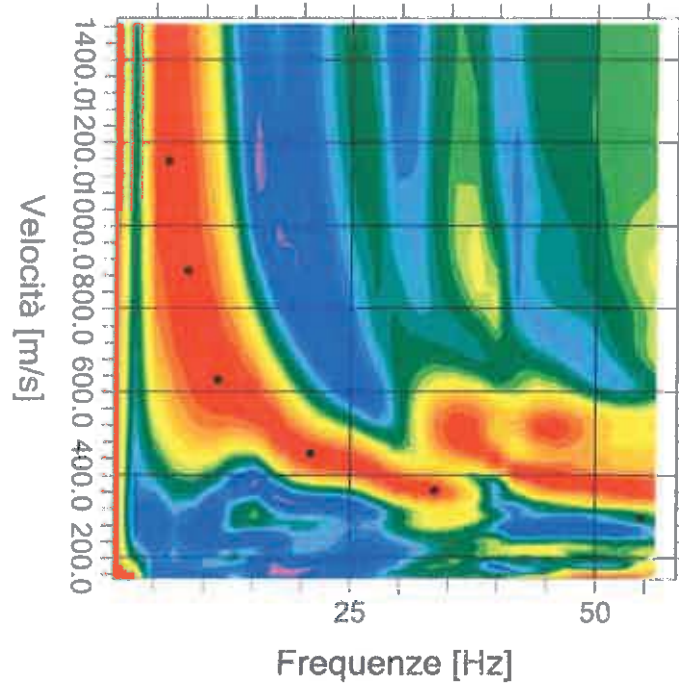


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
Data prova	20/07/2021

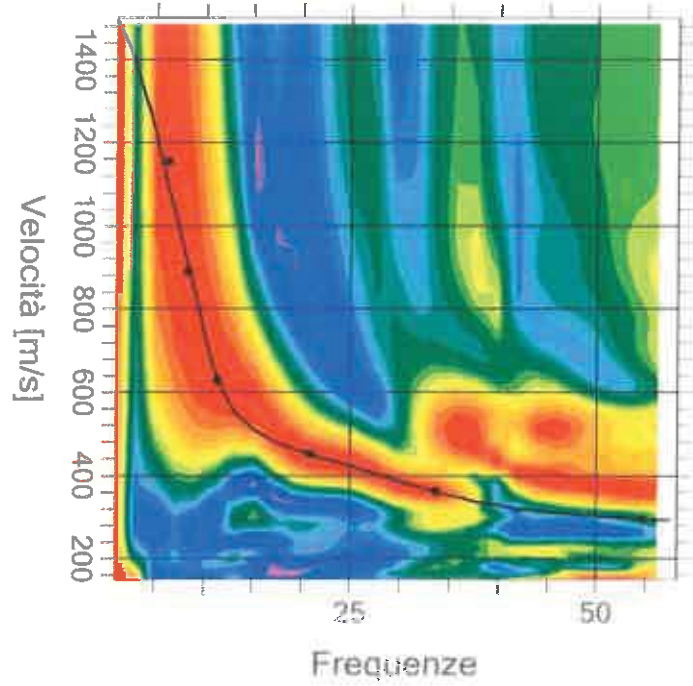


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

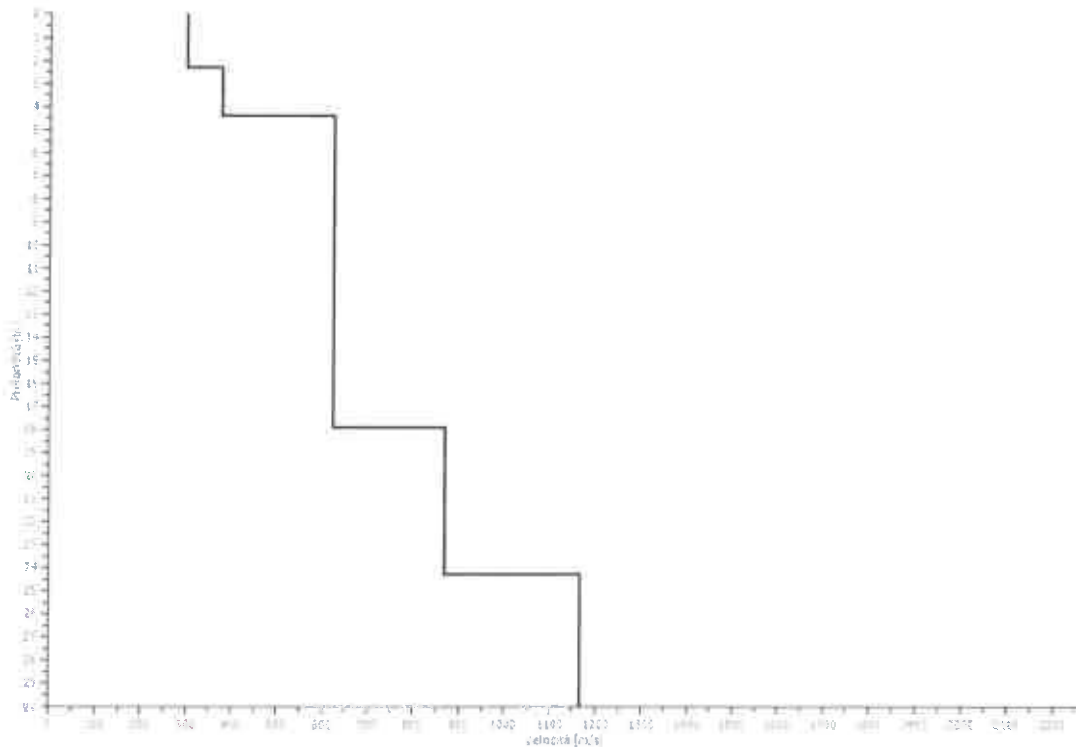


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
Data prova	20/07/2021

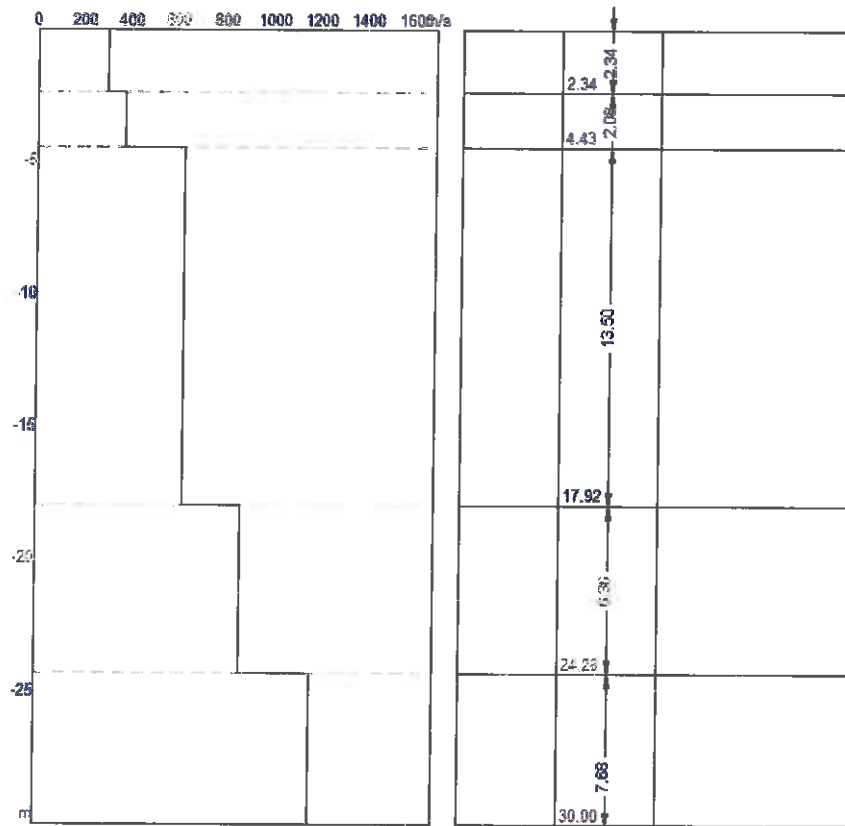



Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	2.34	2.34	298.34	487.19	1937.00	0.20	172.40	459.75	229.87	413.77
2	4.43	2.08	376.27	614.44	1937.00	0.20	274.24	731.30	365.65	658.17
3	17.92	13.50	623.38	1017.98	1800.00	0.20	699.50	1865.32	932.66	1678.79
4	24.28	6.36	869.59	1420.03	1733.00	0.20	1310.46	3494.56	1747.28	3145.10
5	31.96	7.68	1166.62	1905.08	1733.00	0.20	2358.62	6289.64	3144.82	5660.68
6	-	-	1686.71	2754.38	1733.00	0.20	4930.36	13147.6 3	6573.81	11832.8 6

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Colfaniassetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	2.34	2.34	298.34	487.19	511.49	B
2	4.43	2.08	376.27	614.44		
3	17.92	13.50	623.38	1017.98		
4	24.28	6.36	869.59	1420.03		
5	31.96	7.68	1166.62	1905.08		
6	-	-	1686.71	2754.38		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 511.49 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s." per la prospezione eseguita.

 <p>SIDERCEM S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</p>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 299 del 23/07/2021
		Certificato	C-GFS-C 467 del 22/09/2021
		Data prova	20/07/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME207

 SIDERCEM <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

PROVA MASW ME208 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME208	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catanzaro: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774.921,00</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla Vp (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla Vs (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n° 12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

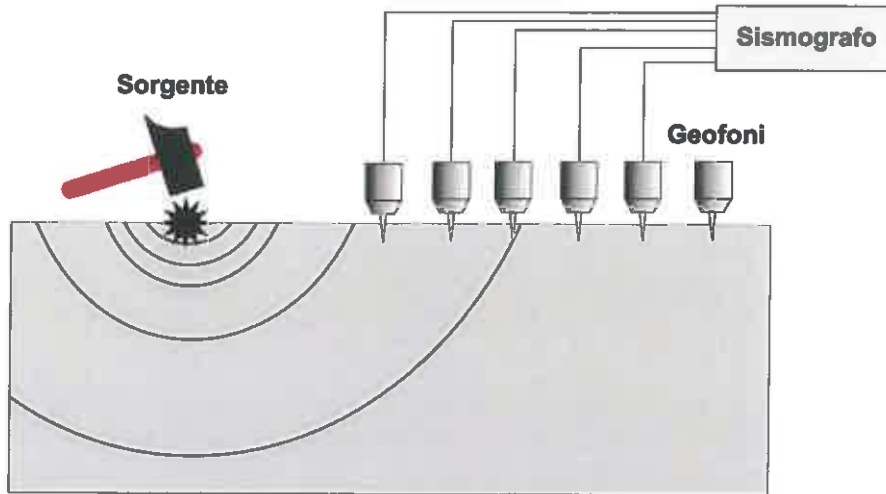


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Callianisella: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima a_g (e dei parametri F_0 , T_c^* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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

dove:

h_i = spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N = numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

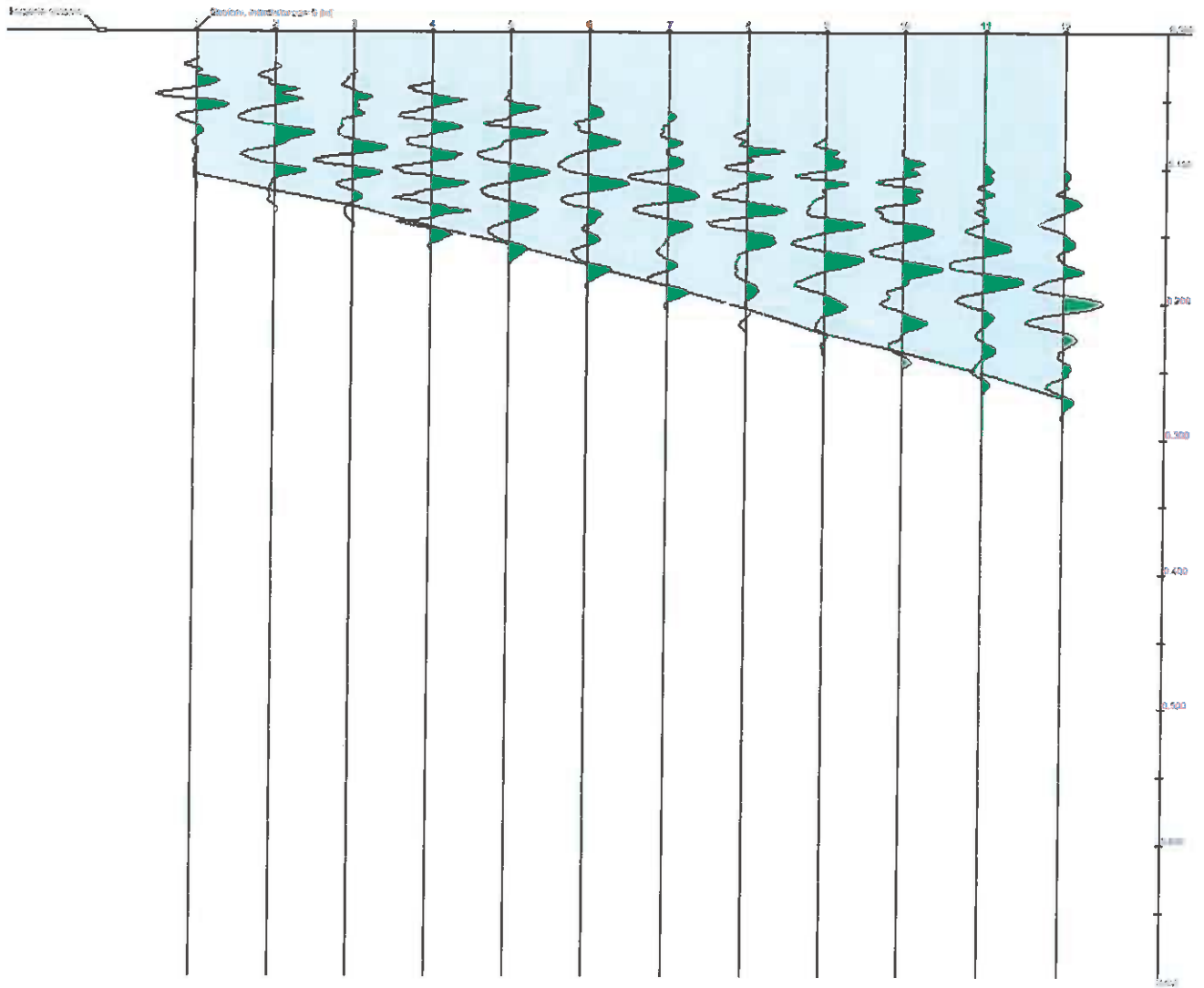


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

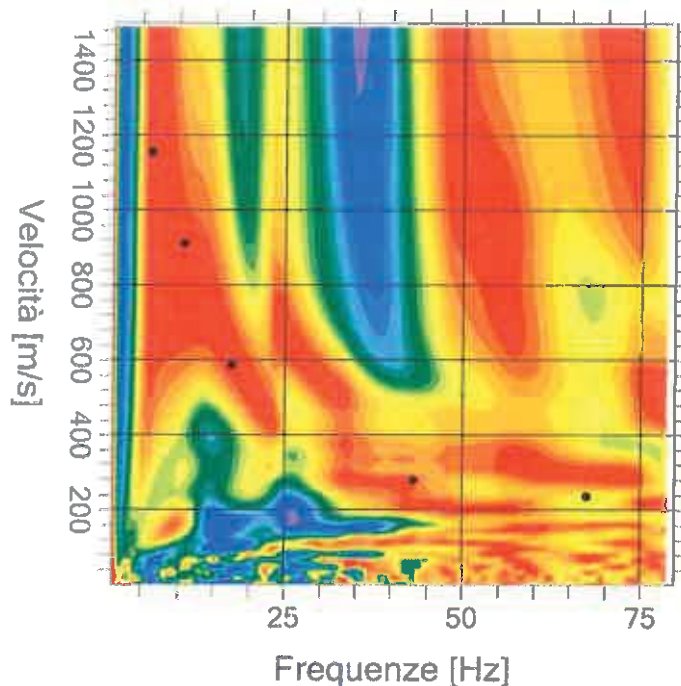


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

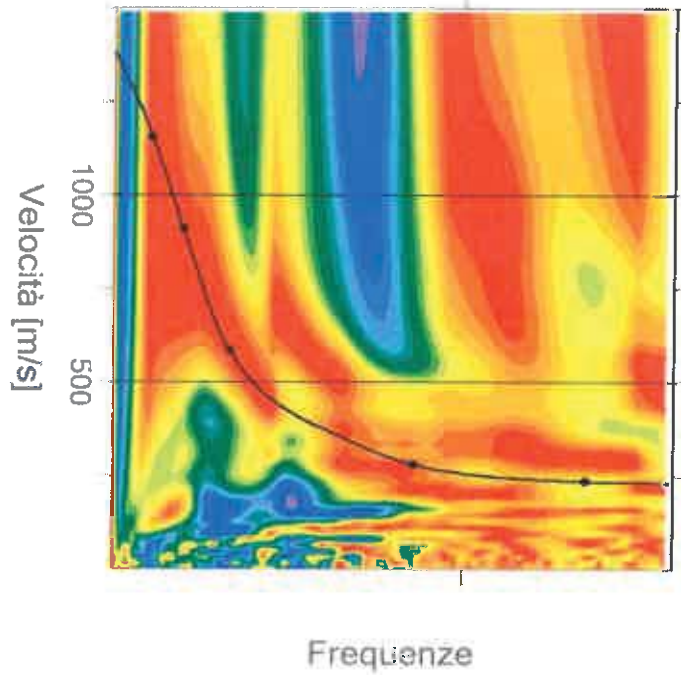


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

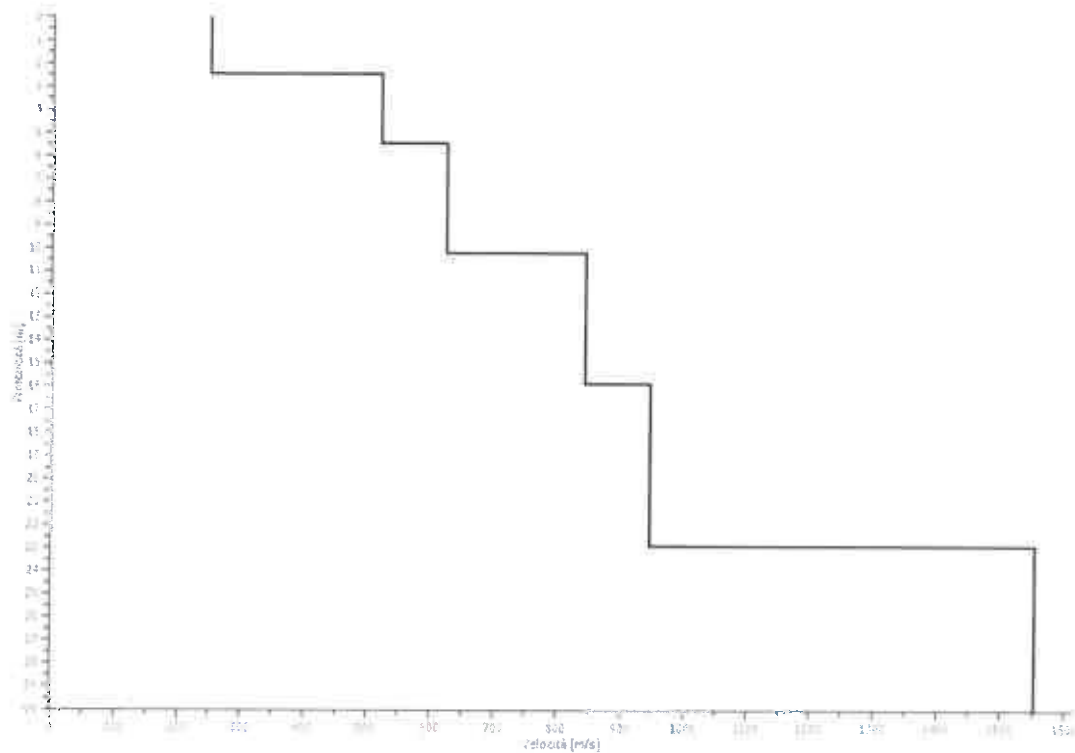


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

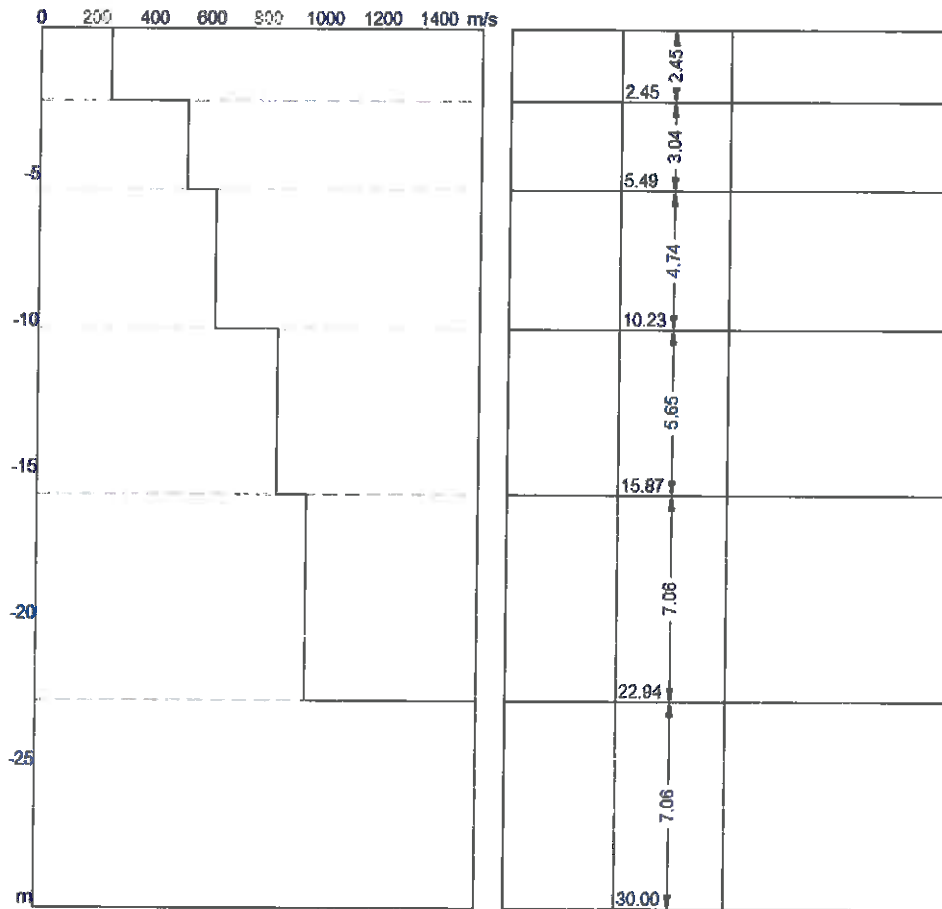


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	2.45	2.45	247.66	404.43	1833.00	0.20	112.43	299.82	149.91	269.84
2	5.49	3.04	518.00	845.90	1833.00	0.20	491.85	1311.59	655.79	1180.43
3	10.23	4.74	623.16	1017.61	1833.00	0.20	711.80	1898.14	949.07	1708.33
4	15.87	5.65	843.14	1376.84	2243.00	0.20	1594.51	4252.03	2126.01	3826.82
5	22.94	7.06	946.37	1545.42	2243.00	0.20	2008.87	5356.99	2678.49	4821.29
6	-	-	1551.19	2533.09	1800.00	0.20	4331.16	11549.76	5774.88	10394.78

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754620874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	2.45	2.45	247.66	404.43	437.60	B
2	5.49	3.04	518.00	845.90		
3	10.23	4.74	623.16	1017.61		
4	15.87	5.65	843.14	1376.84		
5	22.94	7.06	946.37	1545.42		
6	-	-	1551.19	2533.09		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 437,60 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s." per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 431 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME208

 <small>S.p.A.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

PROVA MASW ME209 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME209	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.I.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Colfaniassetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n°1) di 5.0 m.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

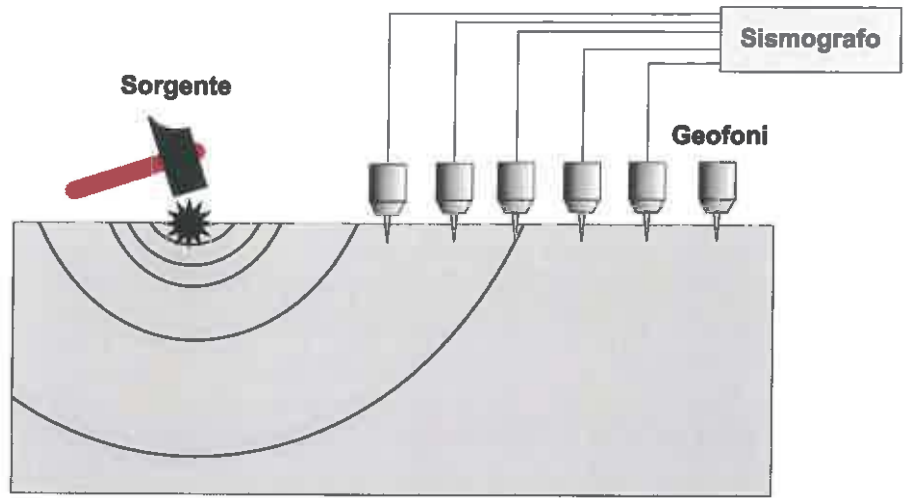



Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{fase}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.P.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Collaniseffa: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774.92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima a_g (e dei parametri F_0 , T_c^* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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

dove:

h_i = spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N = numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

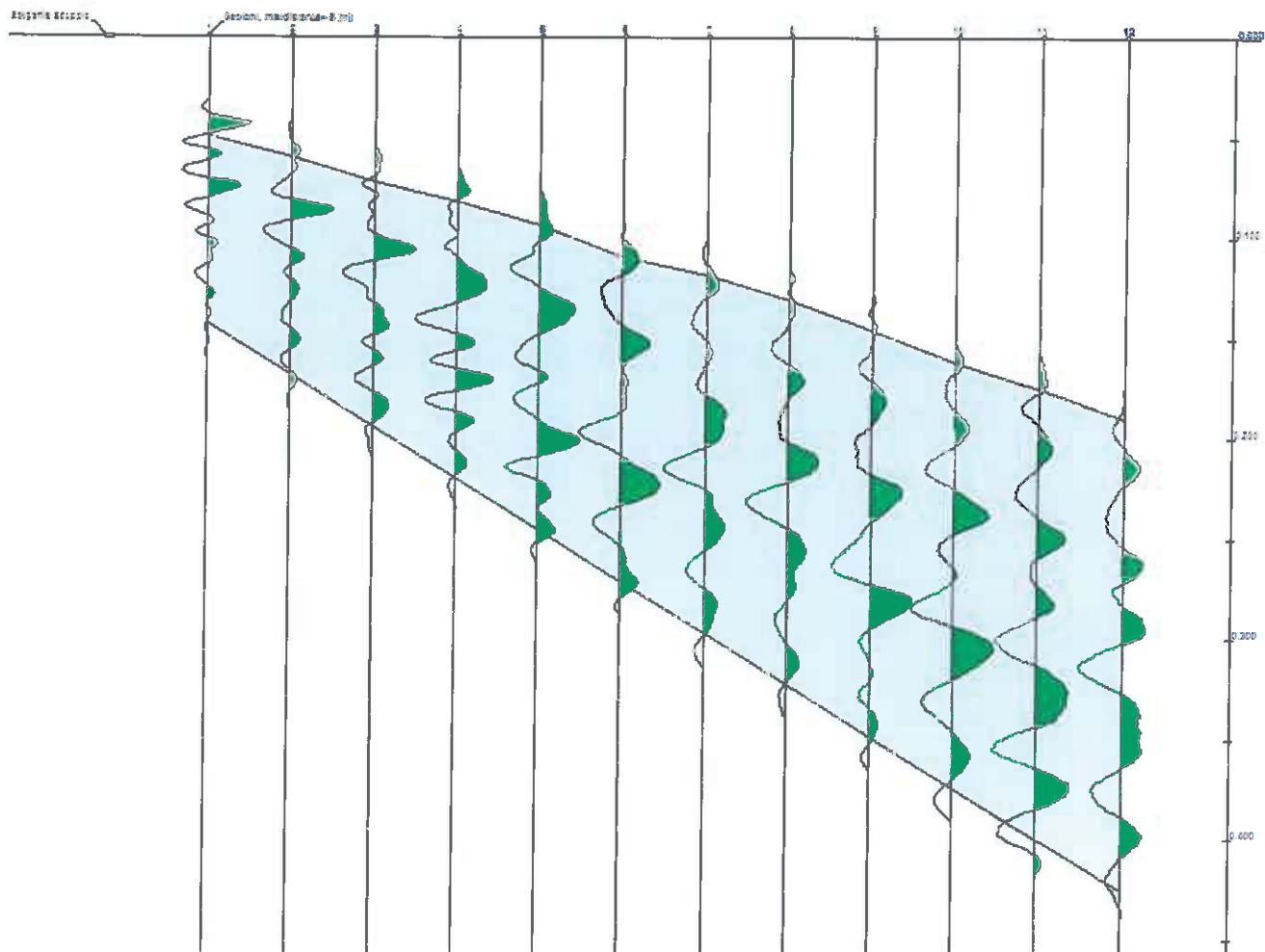


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

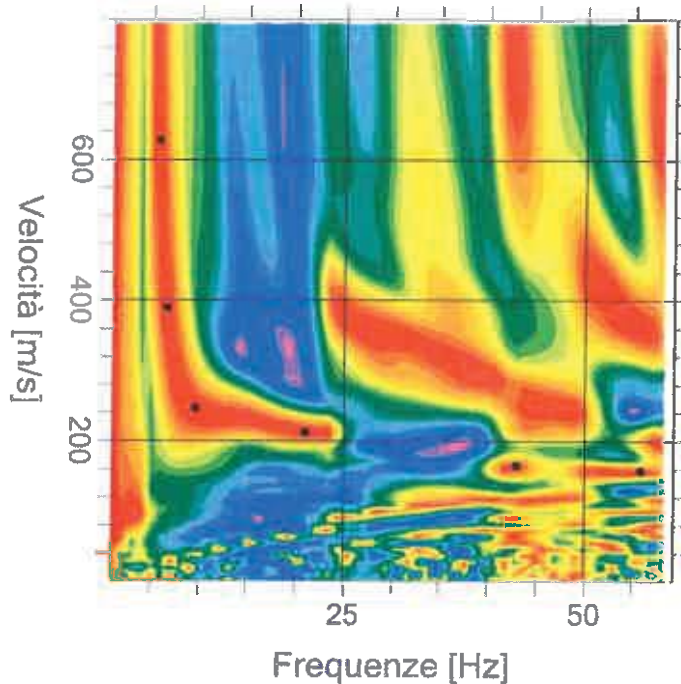


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in quattro sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

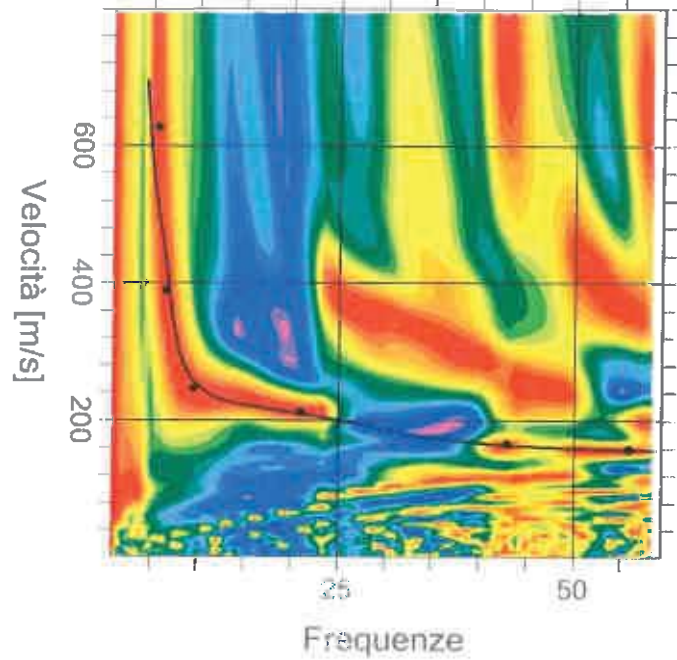


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

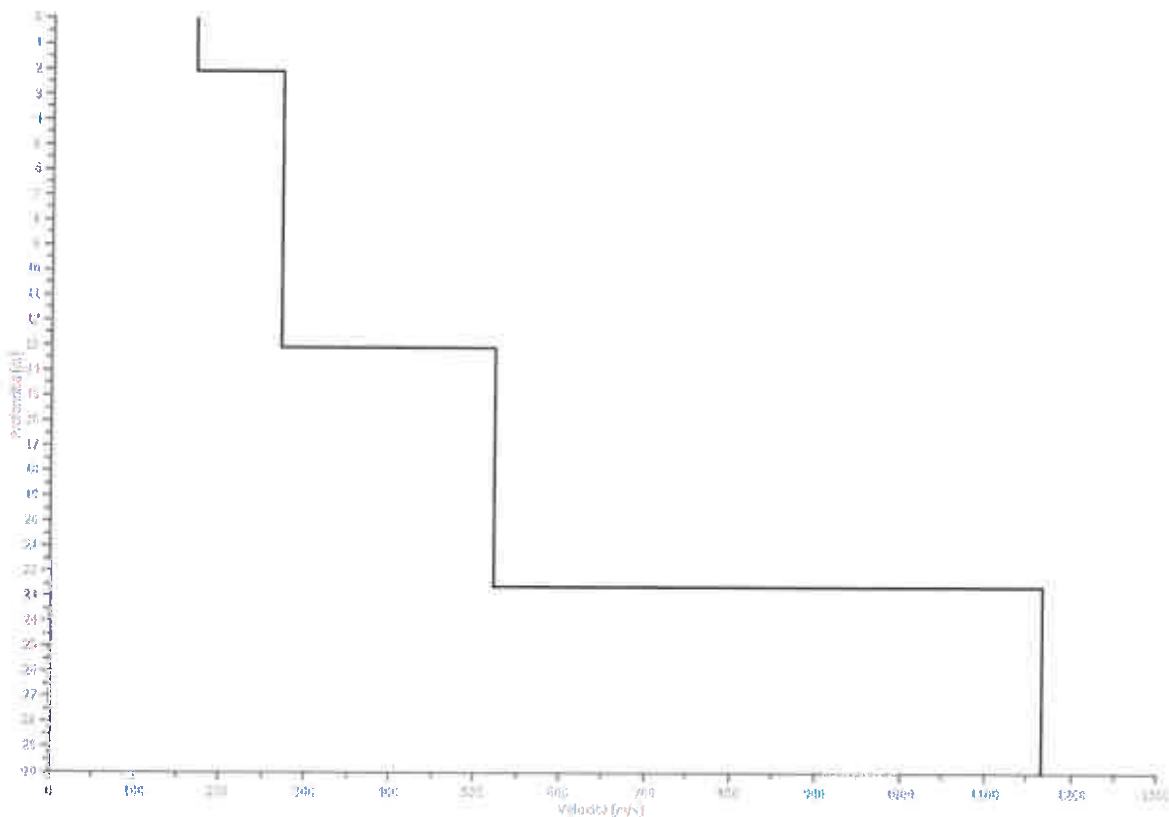


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

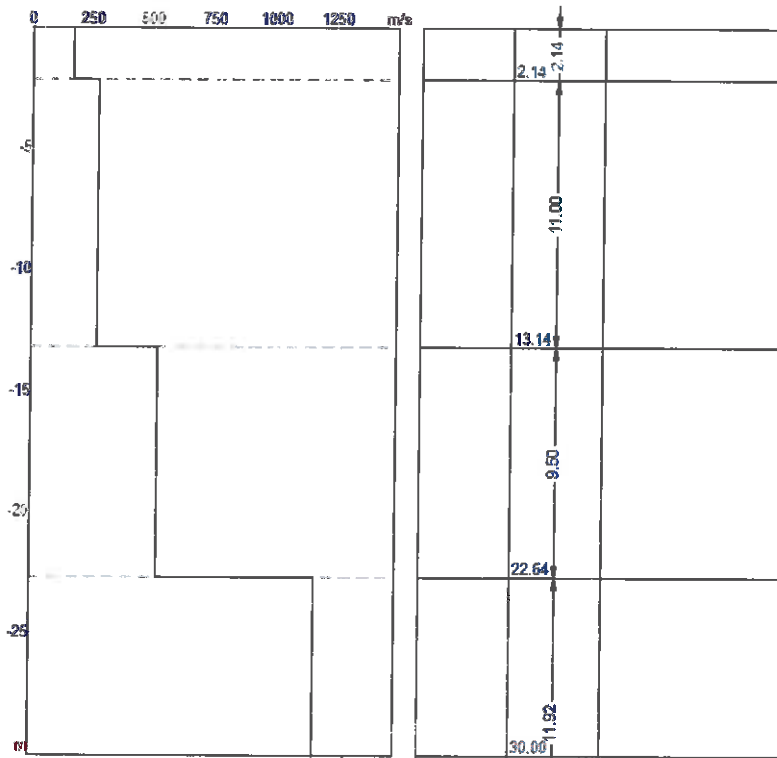


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	2.04	2.04	167.56	273.63	1631.00	0.20	45.79	122.11	61.06	109.90
2	12.03	9.99	263.00	429.47	1733.00	0.20	119.87	319.64	159.82	287.68
3	19.93	7.90	437.59	714.58	1835.00	0.20	351.37	936.99	468.49	843.29
4	27.83	7.90	1101.18	1798.22	1835.00	0.20	2225.13	5933.67	2966.84	5340.31
5	-	-	1226.93	2003.57	1800.00	0.20	2709.64	7225.72	3612.86	6503.14

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	2.04	2.04	167.56	273.63	292.13	E
2	12.03	9.99	263.00	429.47		
3	19.93	7.90	437.59	714.58		
4	27.83	7.90	1101.18	1798.22		
5	-	-	1226.93	2003.57		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.4 sismostrati sovrastanti un semispazio;
- L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a $V_{seq} = 292.13$ m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria E "Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m" per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 432 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME209

 <small>S.p.A.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774.92 I.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

PROVA MASW ME210 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME210	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisella: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Iv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla Vp (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla Vs (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).


La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n°1) di 5.0 m.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catanzaro: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

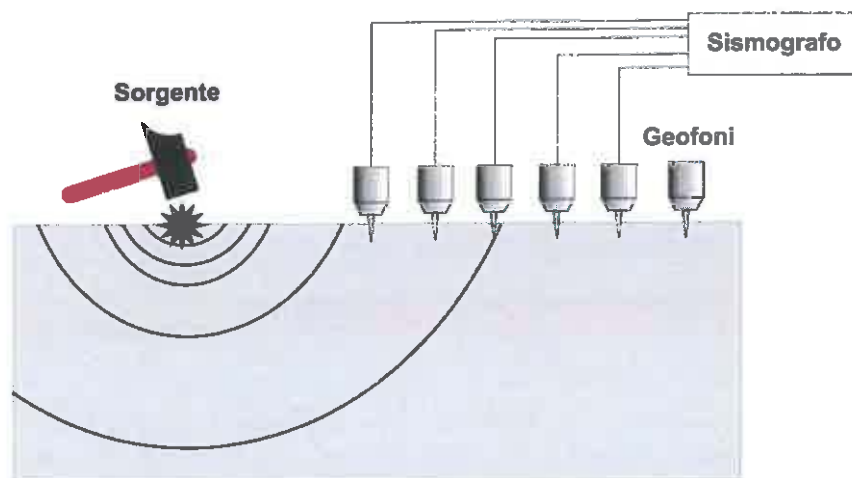


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{fase}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>s.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari sez. 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima a_g (e dei parametri F_0 , T_c^* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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


dove:

h_i = spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N = numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisella: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

 S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

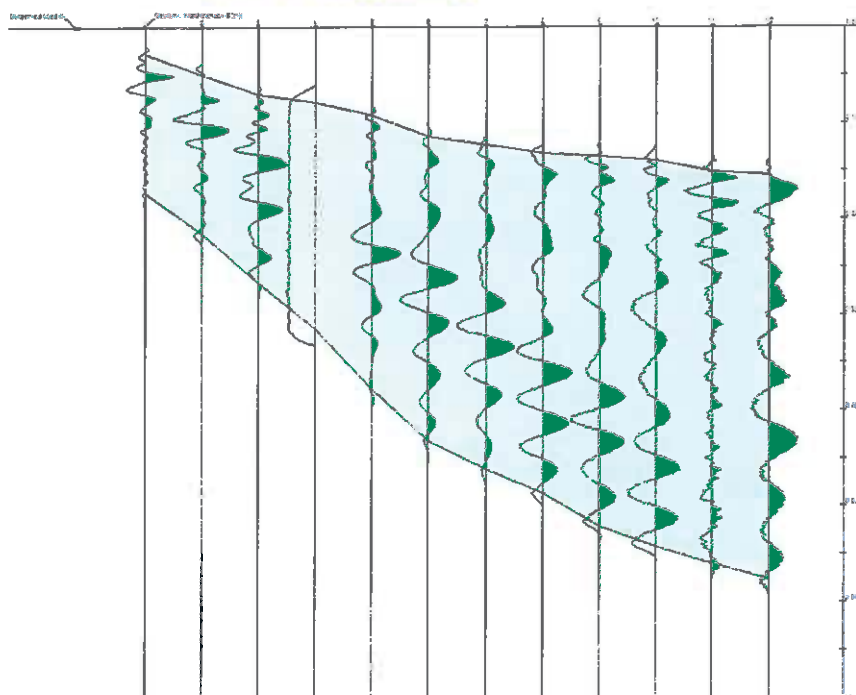



Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianza etna: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

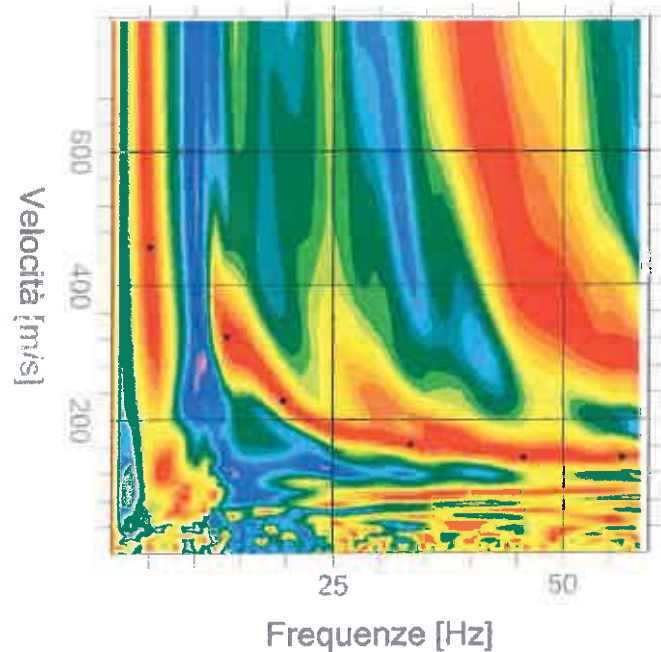


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).

 <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.P. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianiseta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

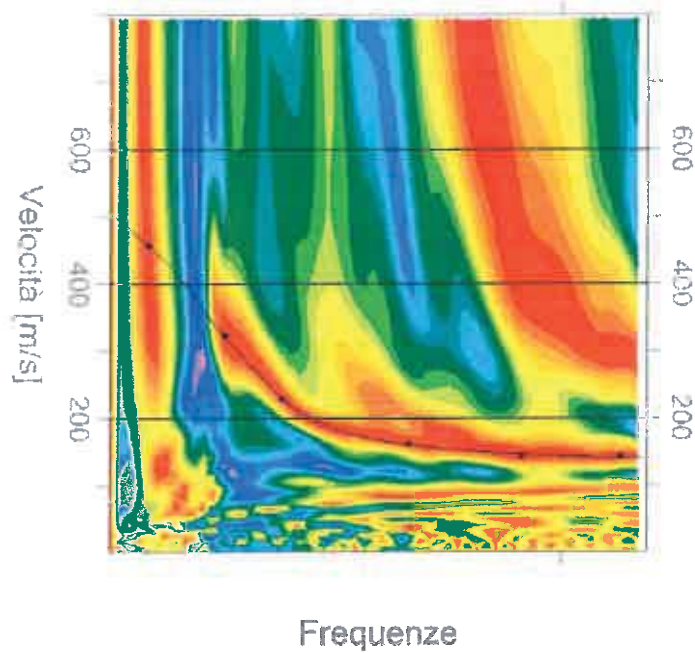


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

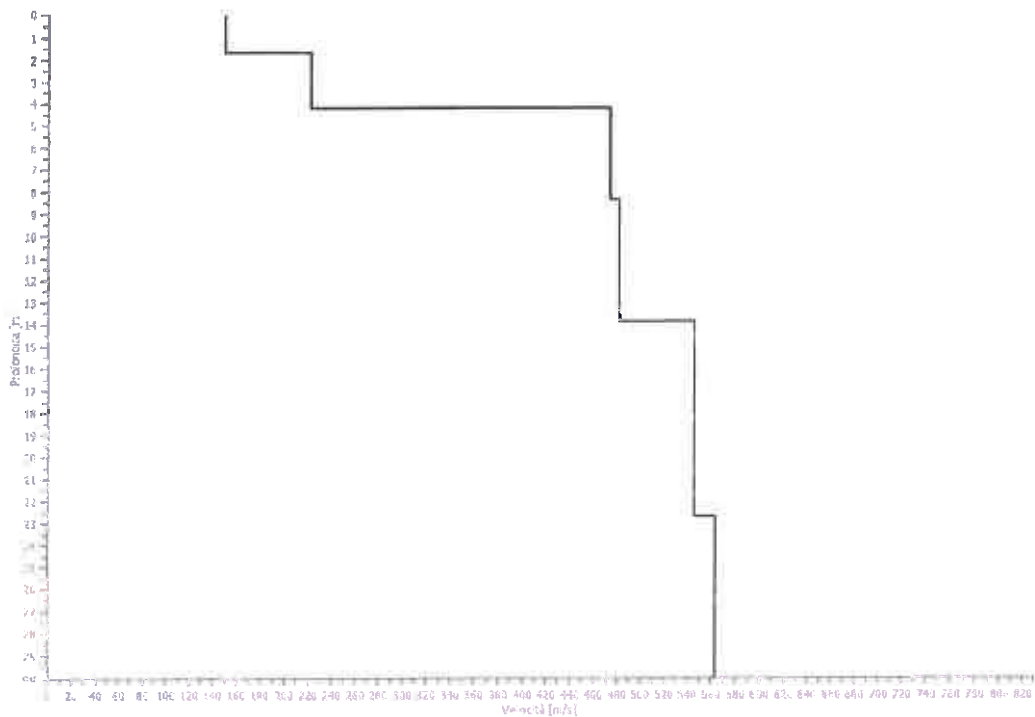


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Collanasseffa: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

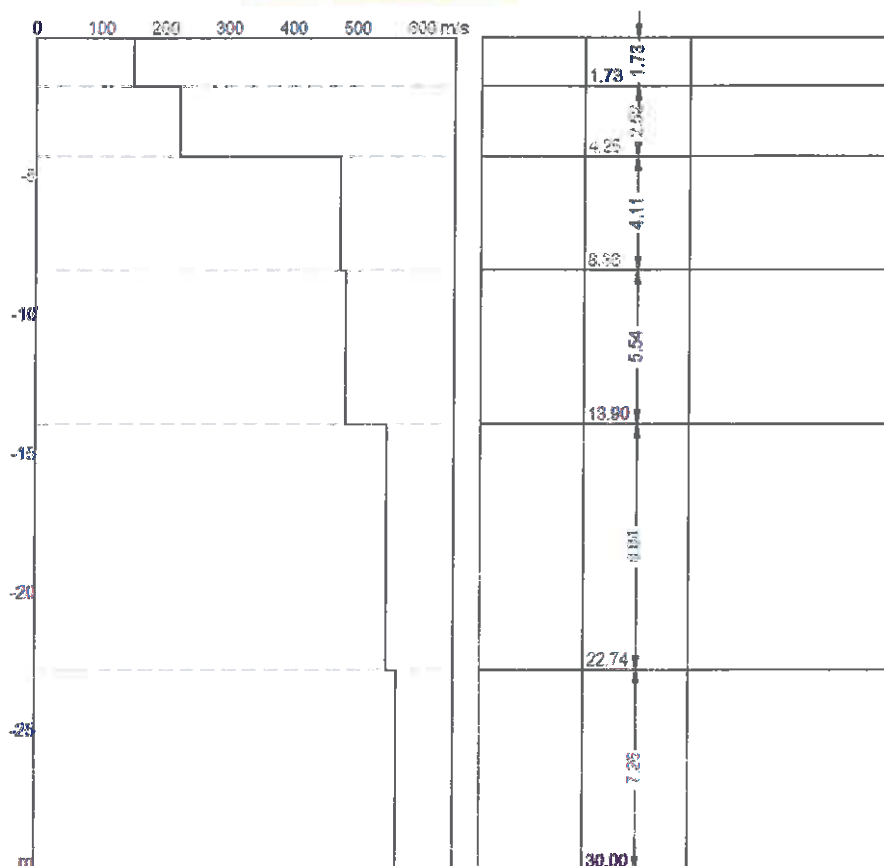


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	1.73	1.73	150.35	245.52	1631.00	0.20	36.87	98.31	49.16	88.48
2	4.25	2.52	221.70	362.04	1631.00	0.20	80.17	213.78	106.89	192.40
3	8.36	4.11	473.93	773.93	1733.00	0.20	389.25	1038.01	519.01	934.21
4	13.90	5.54	482.15	787.35	1937.00	0.20	450.30	1200.79	600.39	1080.71
5	22.74	8.84	546.08	891.75	1937.00	0.20	577.62	1540.33	770.16	1386.30
6	-	-	563.44	920.10	1800.00	0.20	571.44	1523.85	761.92	1371.46

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	1.73	1.73	150.35	245.52	416.07	B
2	4.25	2.52	221.70	362.04		
3	8.36	4.11	473.93	773.93		
4	13.90	5.54	482.15	787.35		
5	22.74	8.84	546.08	891.75		
6	-	-	563.44	920.10		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 416.07 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria **B** "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s" per la prospezione eseguita.

 SIDERCEM [®] <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cellarossa: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-433 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME210

 <small>S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catanzaro: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

PROVA MASW ME211 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME211	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari sezio: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n°1) di 5.0 m.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

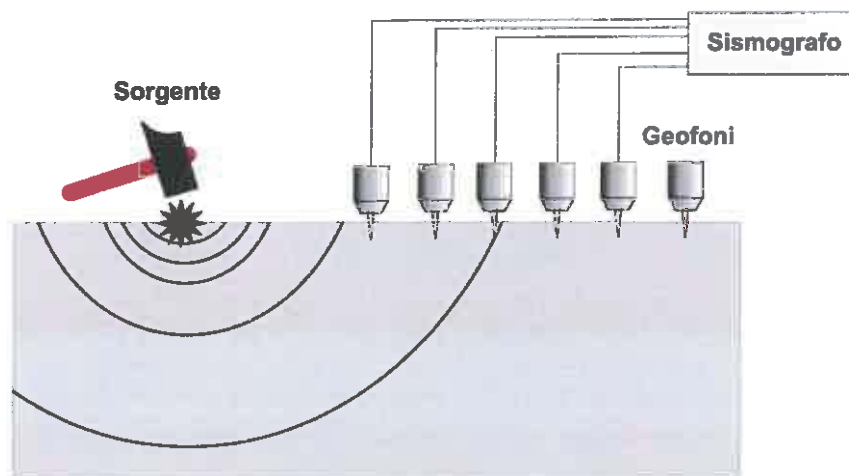


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie f - V_{fase} (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima a_g (e dei parametri F_0 , T_c^* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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

dove:

h_i = spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N = numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisella: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

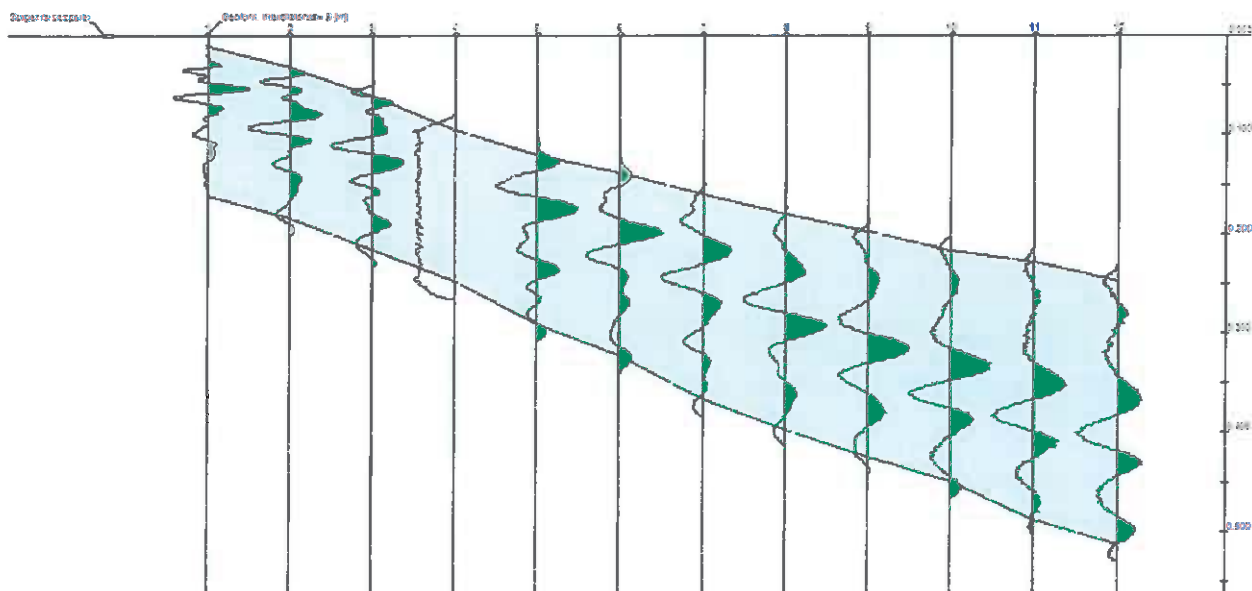


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Callianisetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

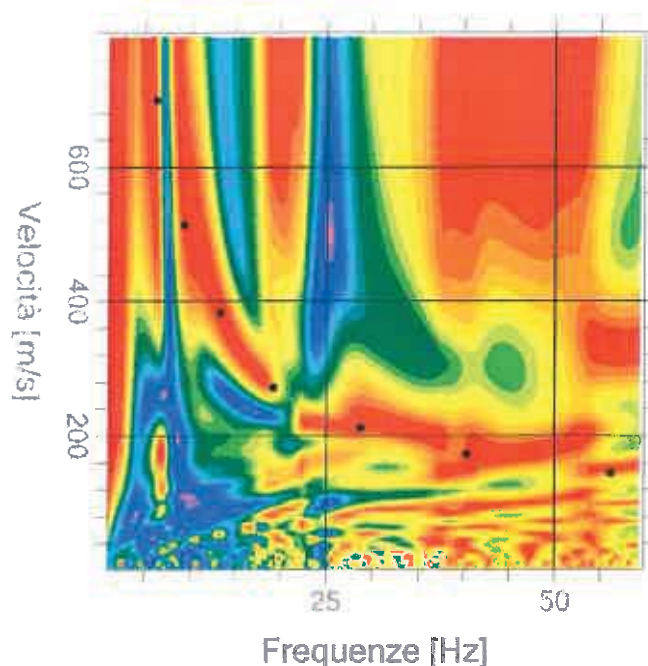


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).

 <p>SIDERCEM® S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari sez. 01754820874 F.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Iv.</p>	<p>Timbro a secco</p>	<p>Protocollo accettazione</p>	<p>C-GFS-A-307 del 13/08/2021</p>
		<p>Certificato</p>	<p>C-GFS-C-434 del 22/09/2021</p>
		<p>Data prova</p>	<p>03/08/2021</p>

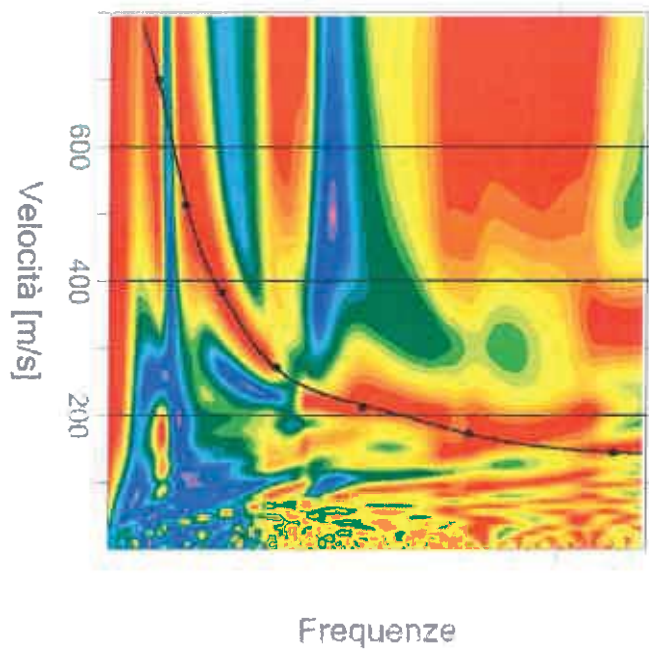


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

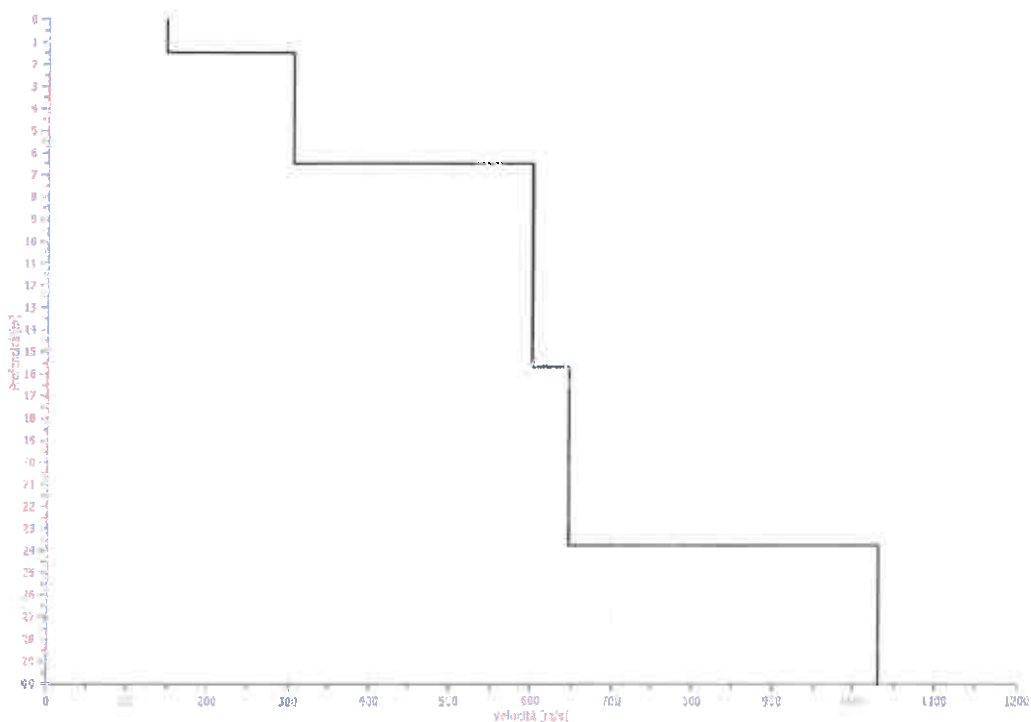


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

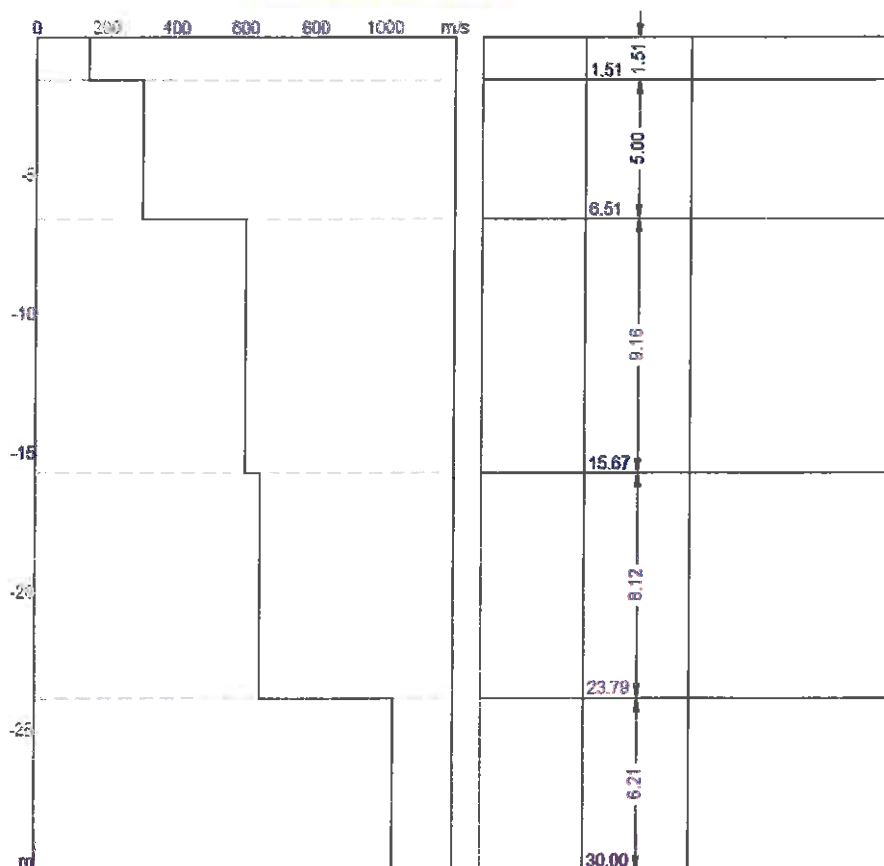


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	1.51	1.51	148.46	242.43	1800.00	0.20	39.67	105.79	52.89	95.21
2	6.51	5.00	305.45	498.80	1800.00	0.20	167.94	447.84	223.92	403.06
3	15.67	9.16	600.86	981.21	1800.00	0.20	649.87	1732.98	866.49	1559.68
4	23.79	8.12	646.26	1055.34	1800.00	0.20	751.77	2004.73	1002.37	1804.26
5	-	-	1030.61	1682.98	1800.00	0.20	1911.88	5098.34	2549.17	4588.51

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Colturano nr. 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	1.51	1.51	148.46	242.43	437.64	B
2	6.51	5.00	305.45	498.80		
3	15.67	9.16	600.86	981.21		
4	23.79	8.12	646.26	1055.34		
5	-	-	1030.61	1682.98		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.4 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 437.64 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s" per la prospezione eseguita.

 <p>SIDERCEM[®] S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.P. - Iscr.C.C.I.A.A. di Colfaniestfa: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Iv.</p>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-434 del 22/09/2021
		Data prova	03/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME211

 <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cofanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

PROVA MASW ME212 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME212	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.p.A.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Colaninsesta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 2 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

 <small>S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.L.A.A. di Caltanissetta: 01734820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

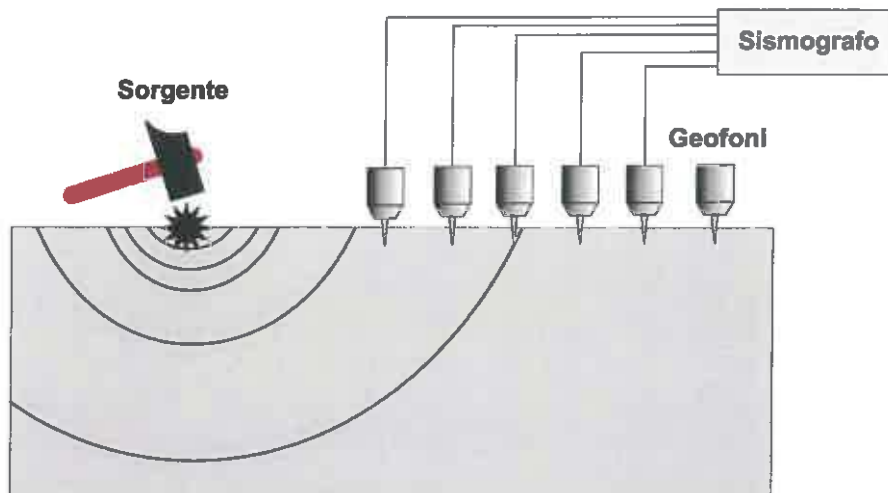


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie f - V_{fase} (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima a_g (e dei parametri F_0 , T_c^* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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


dove:

h_i = spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

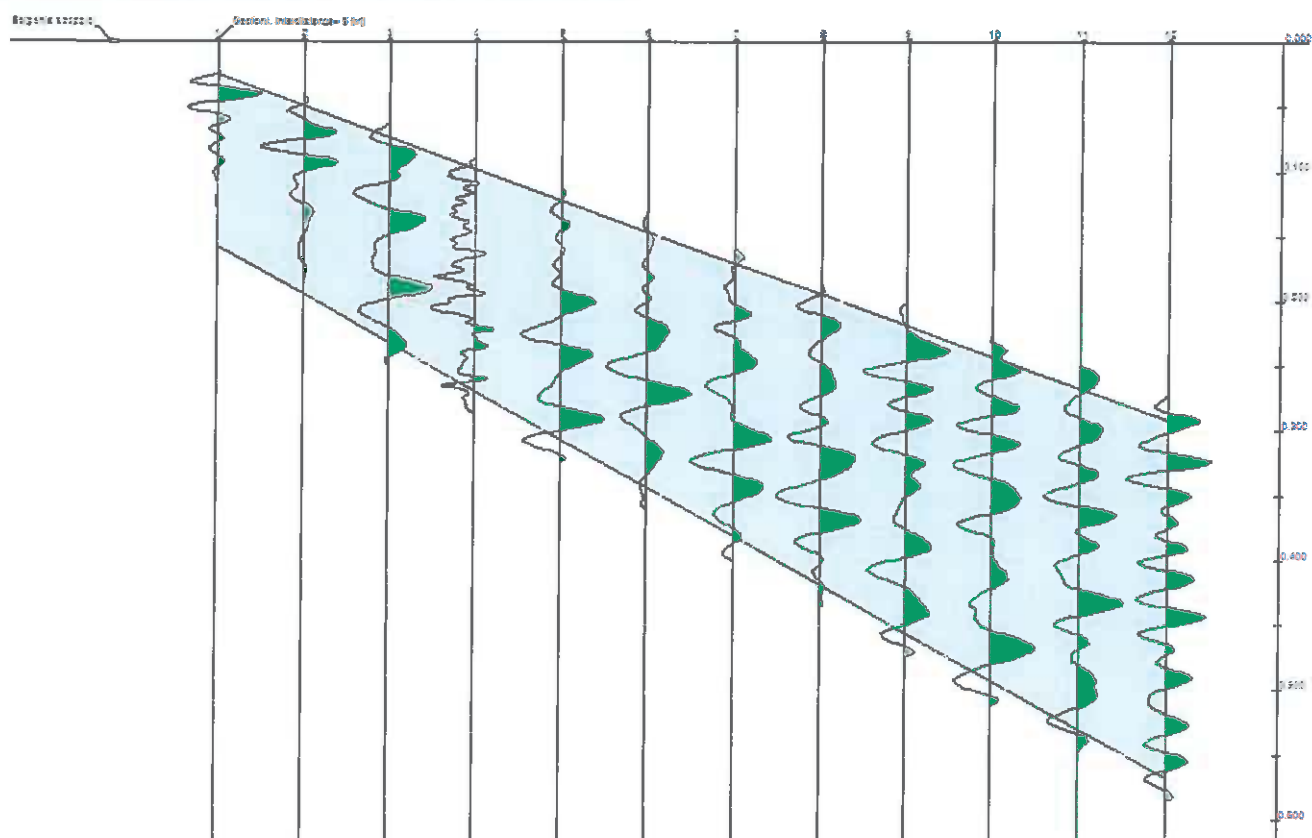


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Collanisecca 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Iv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

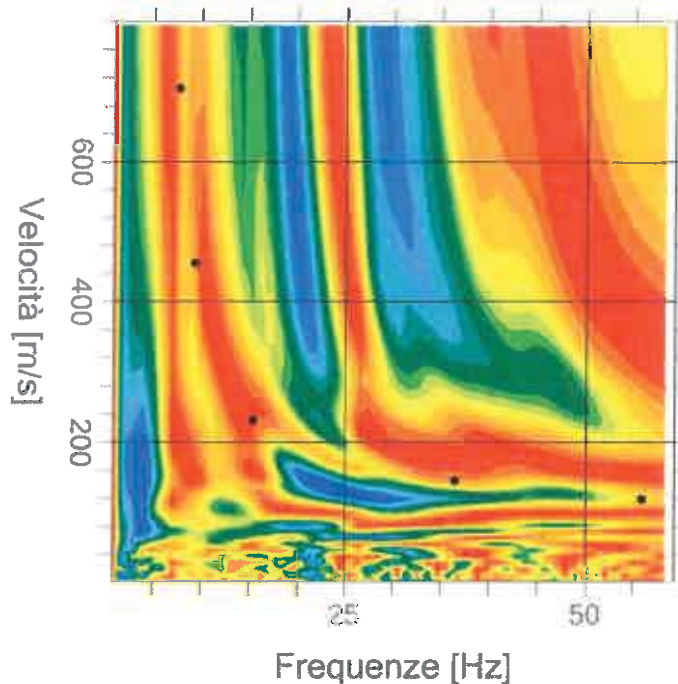


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in quattro sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

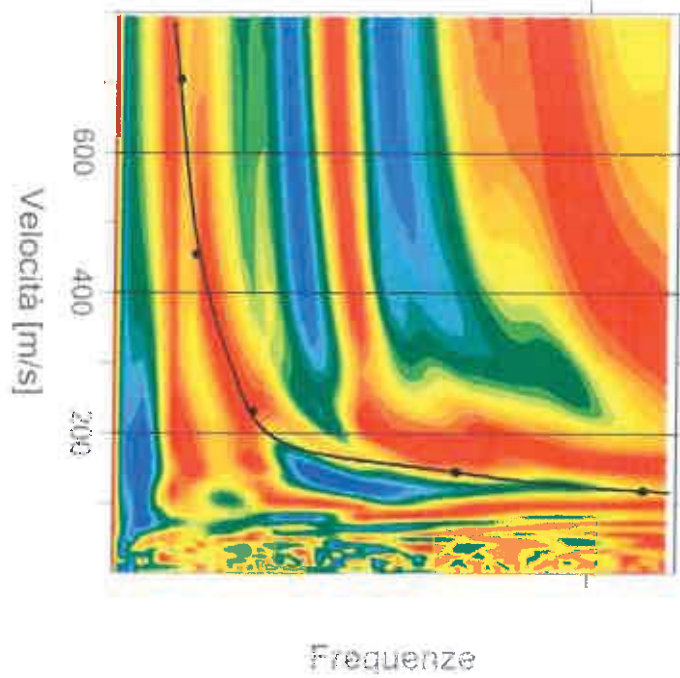


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

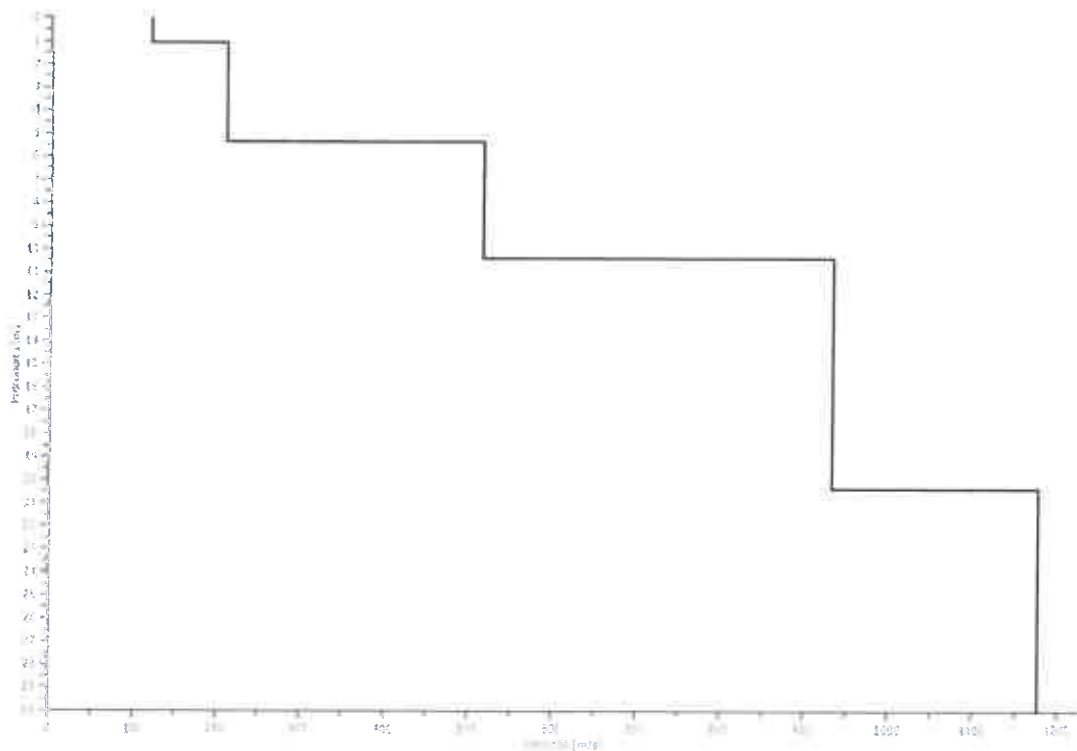


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

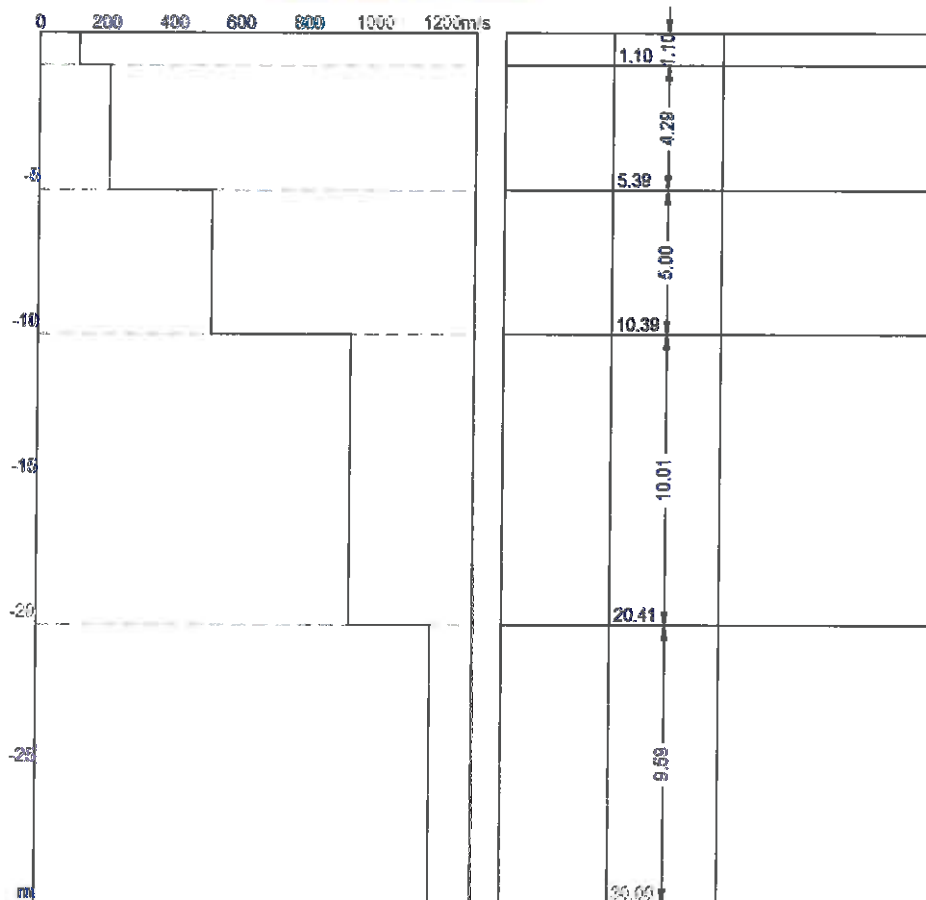


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	1.10	1.10	118.57	193.62	1800.00	0.20	25.31	67.48	33.74	60.73
2	5.39	4.29	209.37	341.89	1800.00	0.20	78.90	210.40	105.20	189.36
3	10.39	5.00	516.13	842.83	1800.00	0.20	479.50	1278.66	639.33	1150.79
4	20.41	10.01	932.96	1523.53	1800.00	0.20	1566.76	4178.03	2089.02	3760.23
5	-	-	1176.17	1920.67	1800.00	0.20	2490.06	6640.16	3320.08	5976.14

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari sez. 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	1.10	1.10	118.57	193.62	263.28	E
2	5.39	4.29	209.37	341.89		
3	10.39	5.00	516.13	842.83		
4	20.41	10.01	932.96	1523.53		
5	-	-	1176.17	1920.67		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.4 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 263.28 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria E "Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m." per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-435 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME212

 <small>S.P.A.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catania: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

PROVA MASW ME213 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.


In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME213	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. – Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n° 12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 2 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

 <small>s.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONI</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

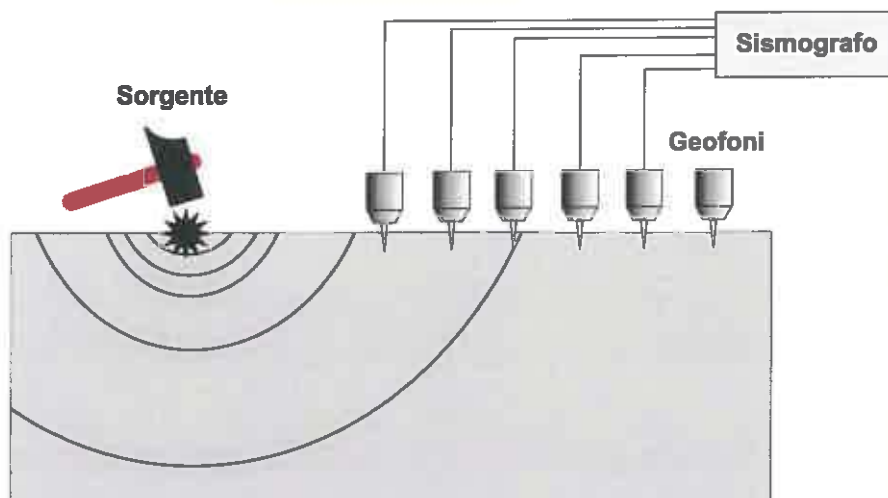



Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh.

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

2.3 Calcolo parametro V_{s30}

 <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima ag (e dei parametri Fo, Tc* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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


dove:

hi = spessore dell'i-esimo strato

Vs,i= velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.p.A.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Catanzaro: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479820856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.


Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 SIDERCEM [®] <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.G.I.A.A. di Caltanissetta: 01764820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620858 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

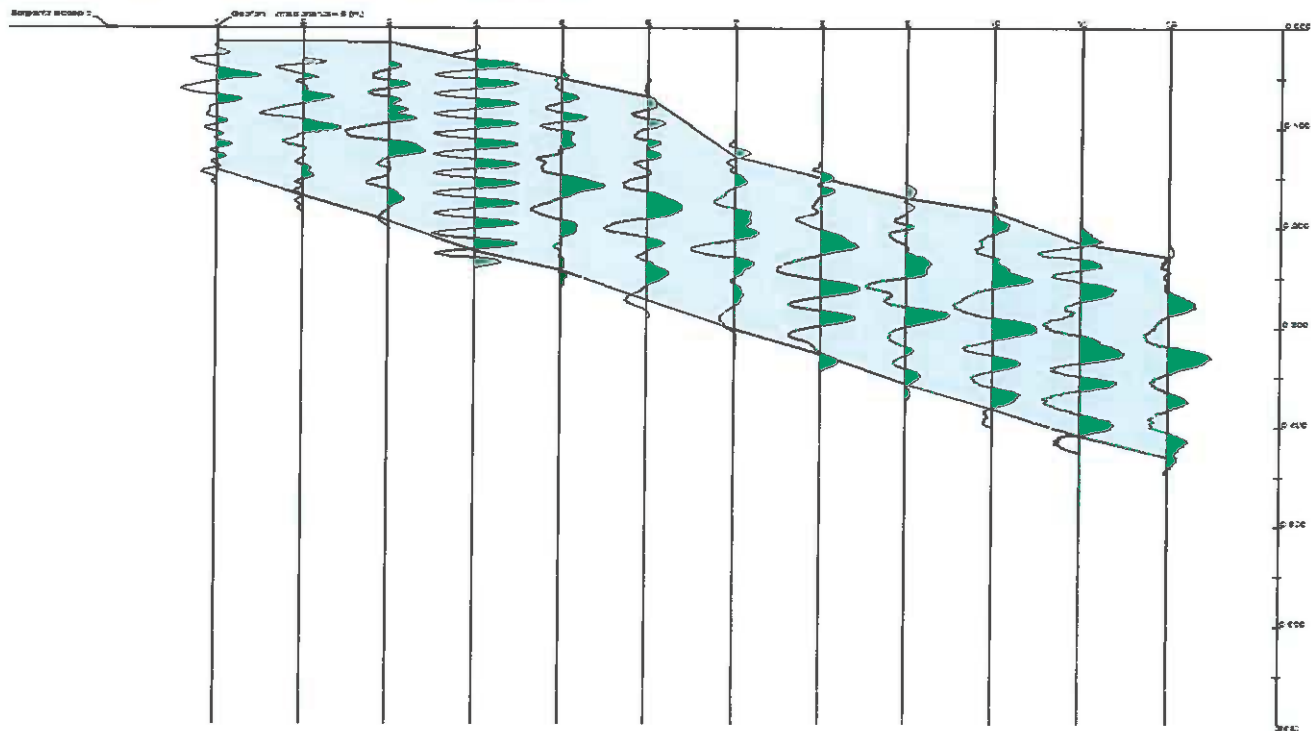



Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>S.I.R.I.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Catanzaro: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

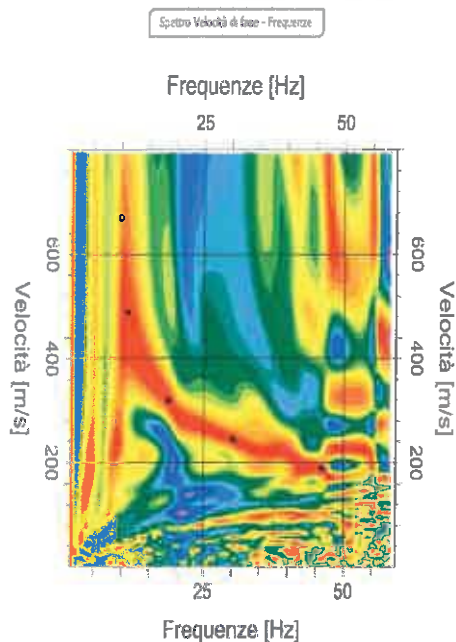



Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

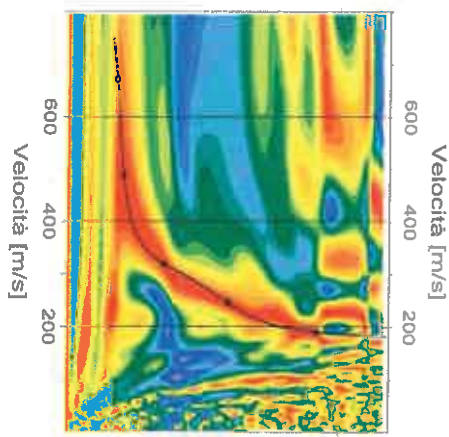
Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).

 SIDERCEM [®] <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Caltanissetta: 01764820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

Inversione

Frequenze



Frequenze

Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

Profilo di velocità

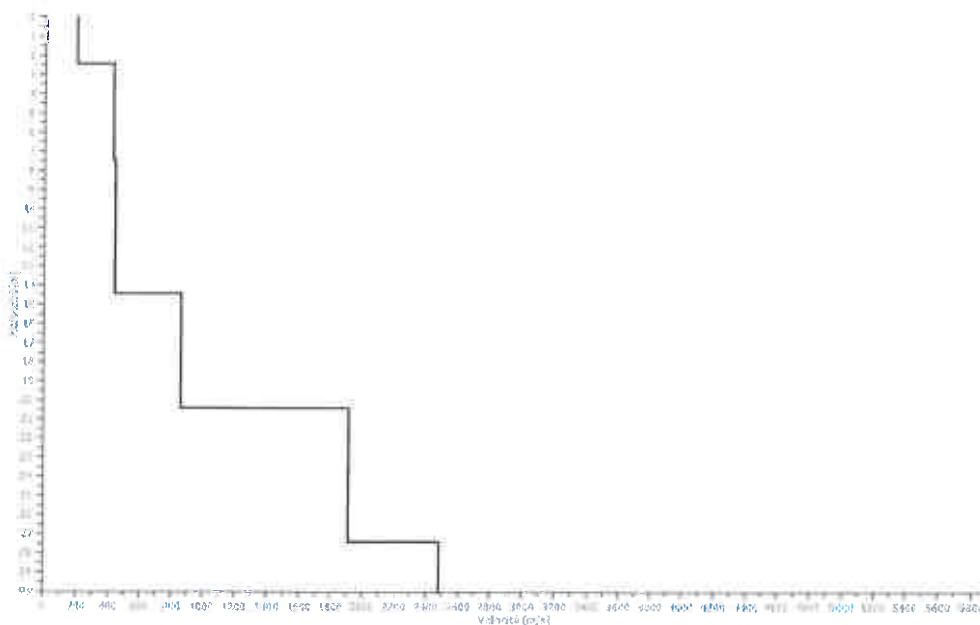


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)

 <small>S.P.A.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Collanissella: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

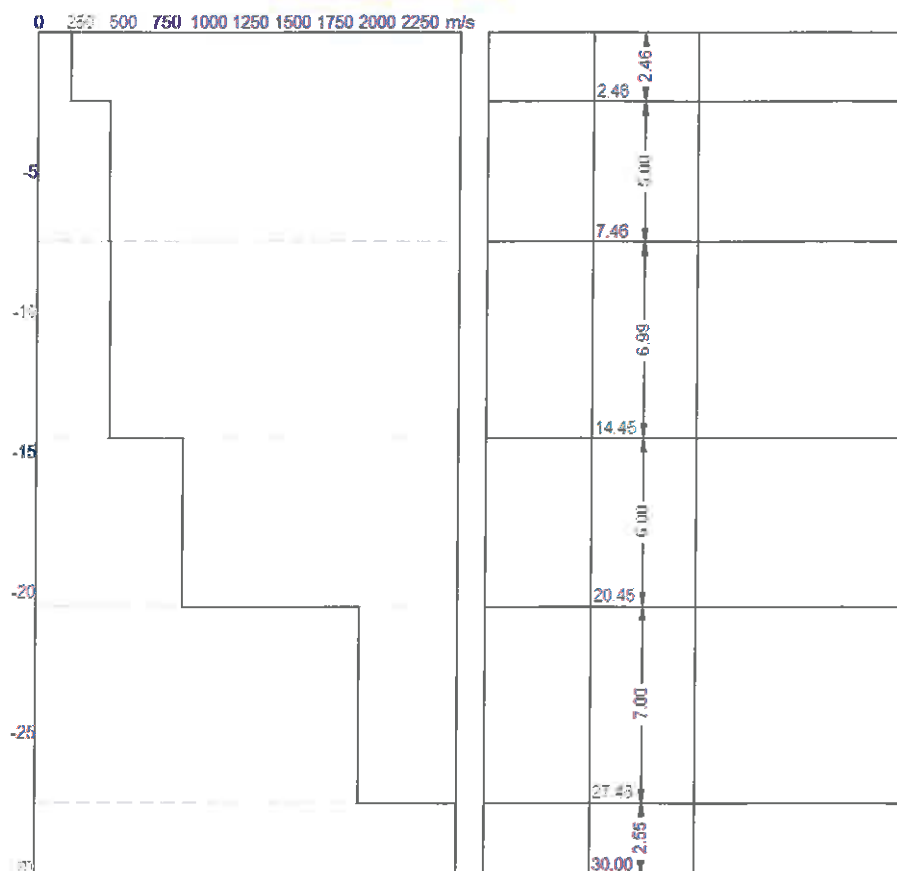


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	2.46	2.46	194.32	317.32	1800.00	0.20	67.97	181.25	90.62	163.12
2	7.46	5.00	425.47	694.79	1800.00	0.20	325.84	868.91	434.46	782.02
3	14.45	6.99	434.48	709.50	1800.00	0.20	339.79	906.11	453.05	815.50
4	20.45	6.00	860.04	1404.45	1800.00	0.20	1331.42	3550.44	1775.22	3195.40
5	27.45	7.00	1910.95	3120.57	2957.00	0.20	10798.20	28795.20	14397.60	25915.68
6	-	-	2485.86	4059.39	2957.00	0.20	18272.78	48727.40	24363.70	43854.67

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.P. - Irc.C.C.I.A.A. di Colaninelle: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
		Data prova	04/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	2.46	2.46	194.32	317.32	356.82	E
2	7.46	5.00	425.47	694.79		
3	14.45	6.99	434.48	709.50		
4	20.45	6.00	860.04	1404.45		
5	27.45	7.00	1910.95	3120.57		
6	-	-	2485.86	4059.39		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 356.82 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria E "Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m." per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-436 del 22/09/2021
Data prova	04/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME213

 <small>S.I.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iccr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

PROVA MASW ME215 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS14 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME215	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. – Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 2 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n°1) di 5.0 m.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

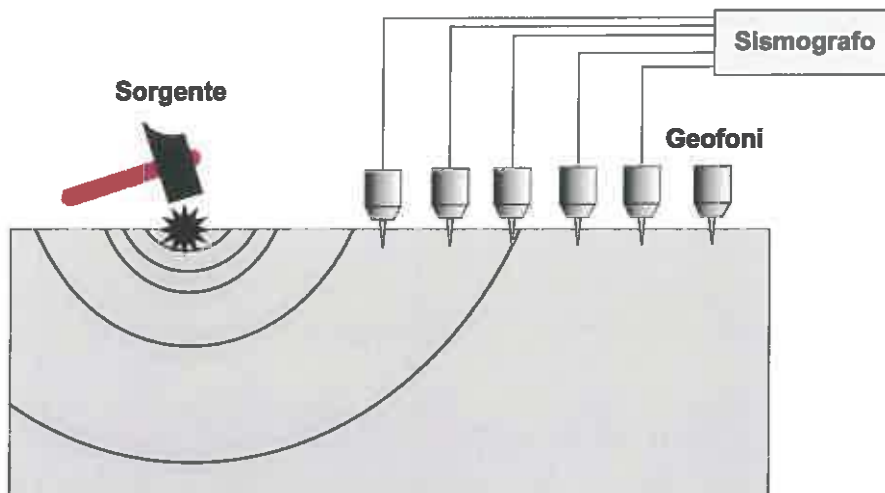


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catanzaro: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima ag (e dei parametri Fo, Tc* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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

dove:

hi = spessore dell'i-esimo strato

Vs,i= velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Collanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774.92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021


Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 SIDERCEM [®] <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Coltanisetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

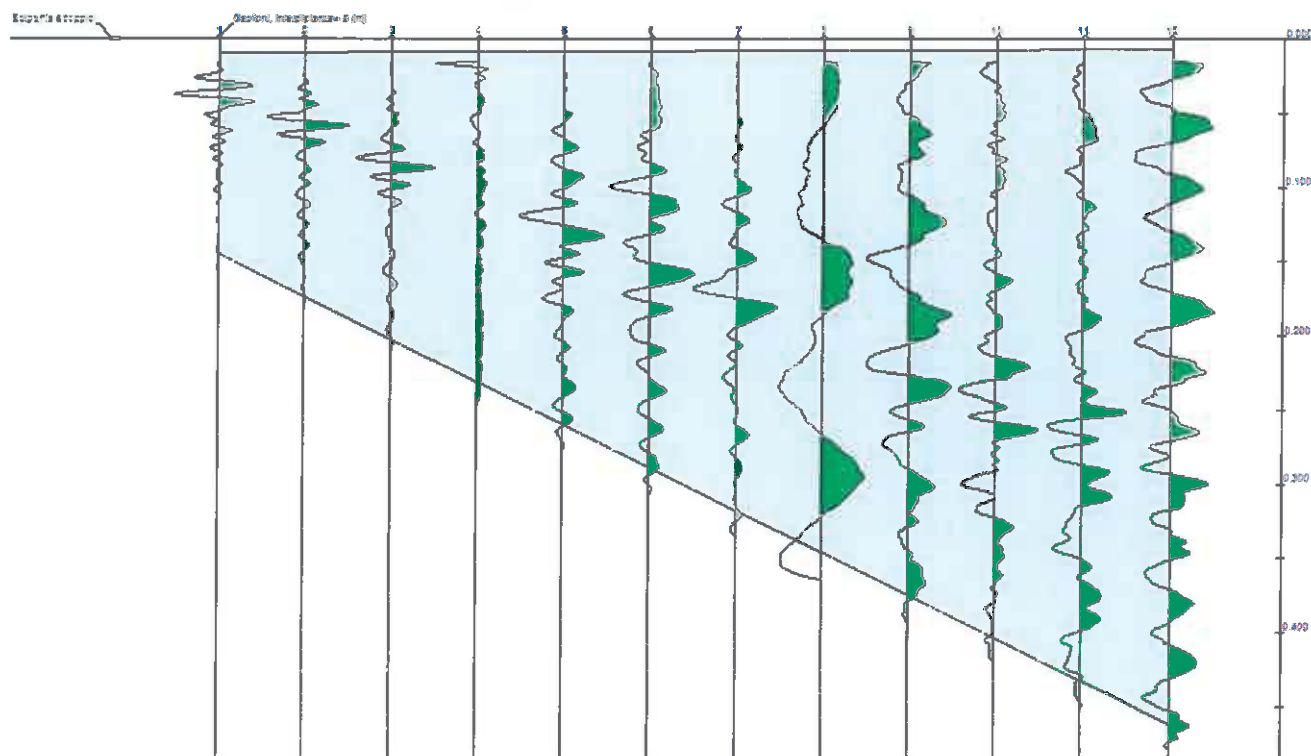


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

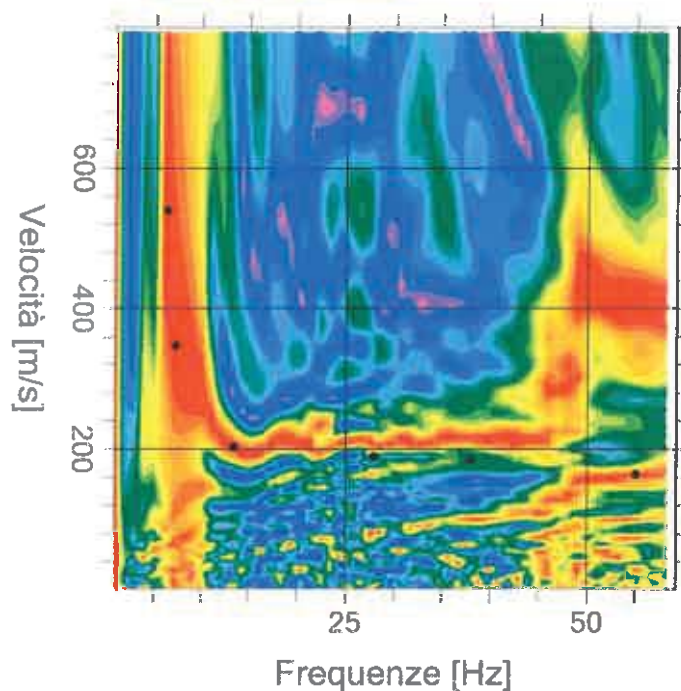


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in quattro sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

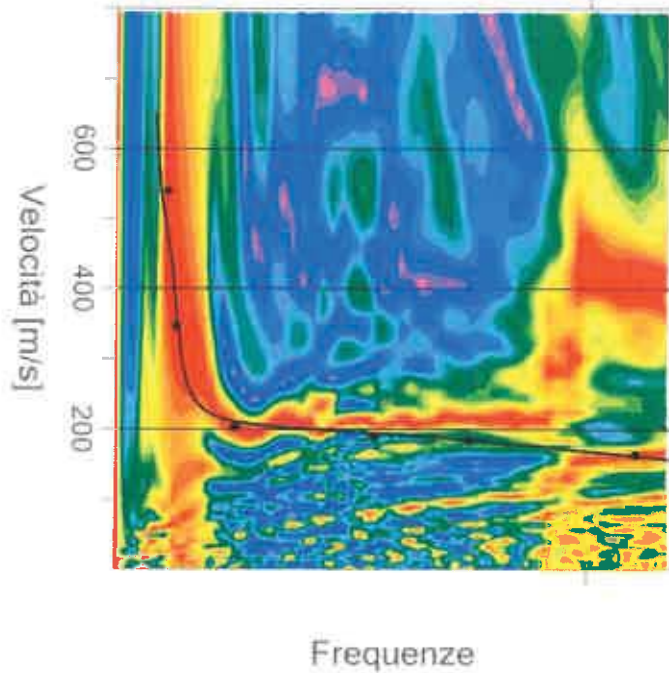


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

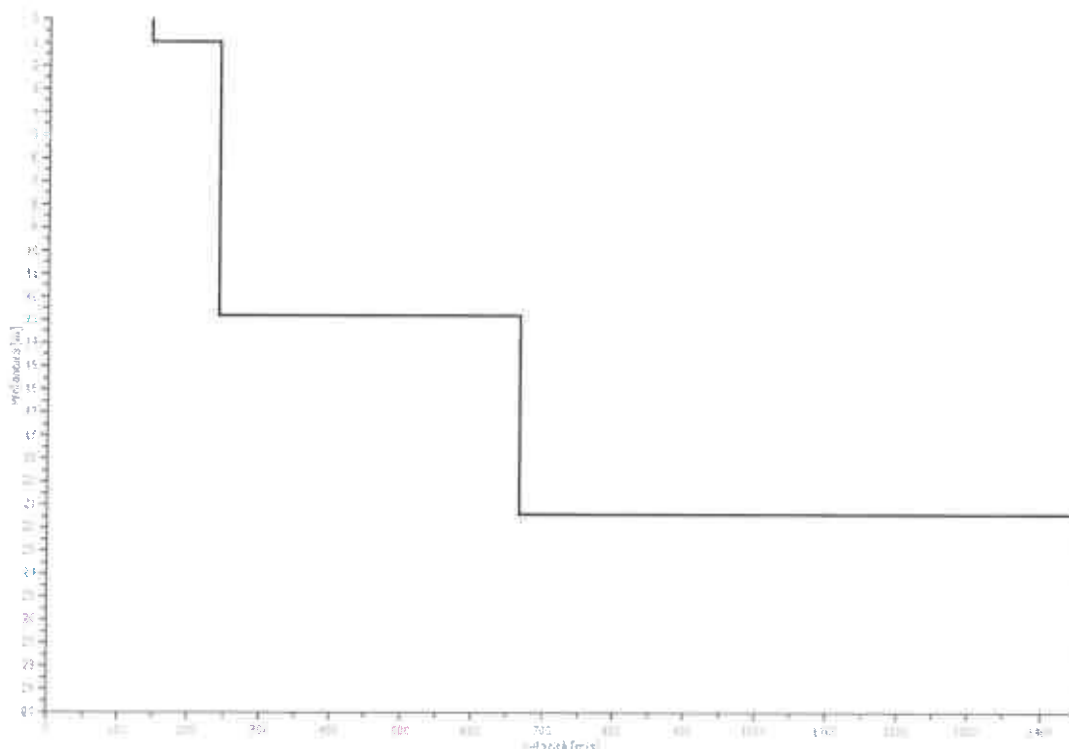


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

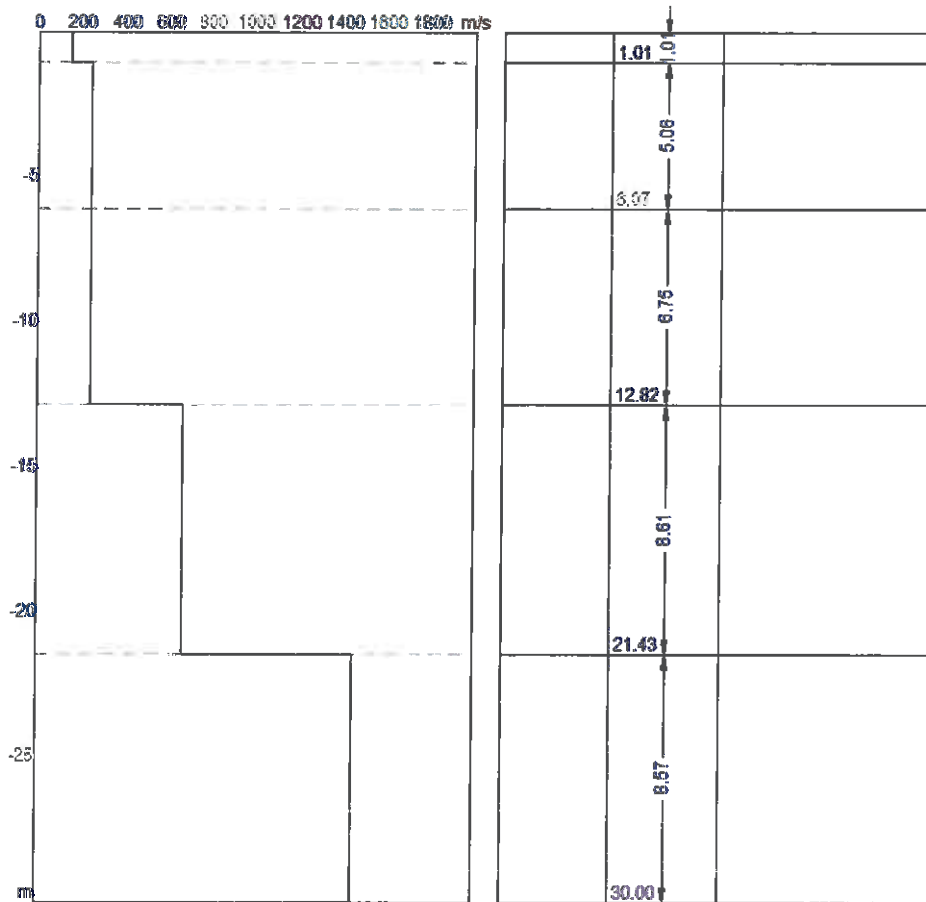



Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	1.01	1.01	145.12	236.98	1800.00	0.20	37.91	101.08	50.54	90.98
2	6.07	5.06	241.31	394.06	1800.00	0.20	104.82	279.52	139.76	251.56
3	12.82	6.75	241.41	394.22	1800.00	0.20	104.90	279.73	139.87	251.76
4	21.43	8.61	666.76	1088.81	2957.00	0.20	1314.57	3505.53	1752.77	3154.98
5	-	-	1452.92	2372.62	2957.00	0.20	6242.20	16645.86	8322.93	14981.27

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	1.01	1.01	145.12	236.98	311.44	E
2	6.07	5.06	241.31	394.06		
3	12.82	6.75	241.41	394.22		
4	21.43	8.61	666.76	1088.81		
5	-	-	1452.92	2372.62		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.4 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 311.44 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria E "Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m" per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-437 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME215

 <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA * SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Catania/Sefta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

PROVA MASW ME216 SS194 "Ragusana"

1.0 Premessa

Nell'ambito del "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 "Ragusana"" è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME216	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Cagliari/Sefta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n° 12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 2 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

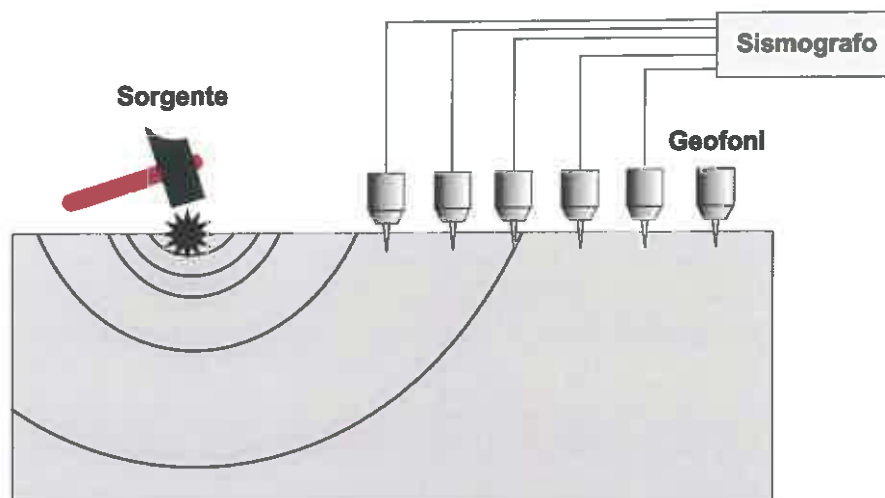


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>s.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima ag (e dei parametri Fo, Tc* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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


dove:

hi = spessore dell'i-esimo strato

Vs,i= velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.I.D.E.R.C.E.M.[®]</small> <small>Istituto di Ricerca e Sperimentazione</small> <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

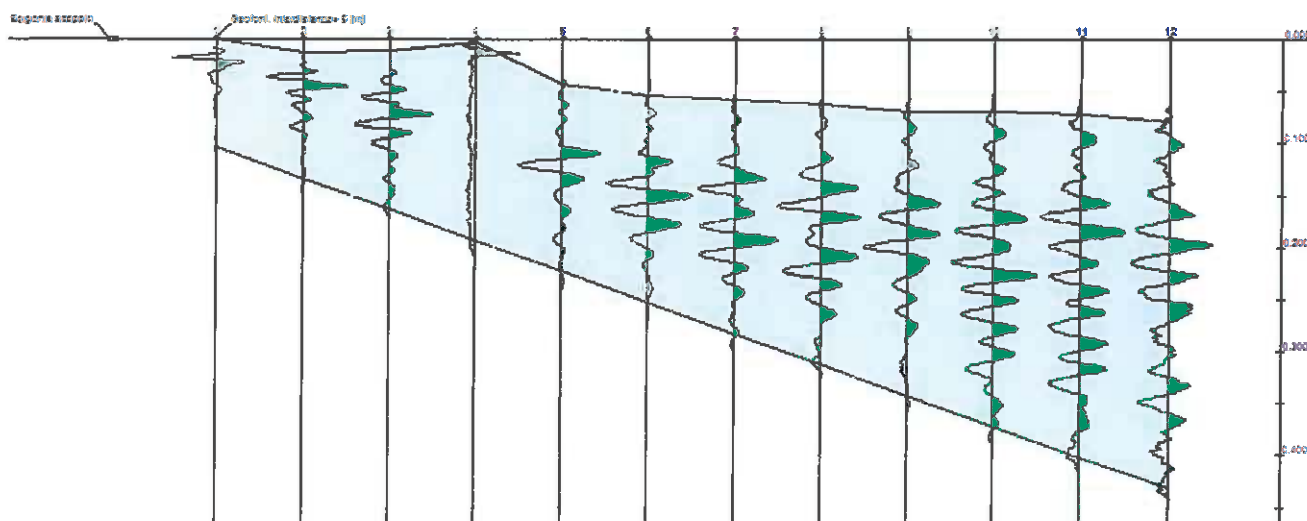


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>S.p.A. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

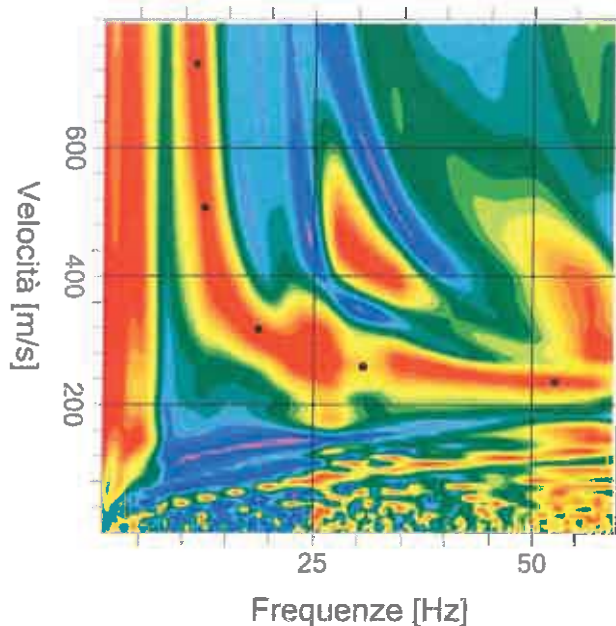


Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

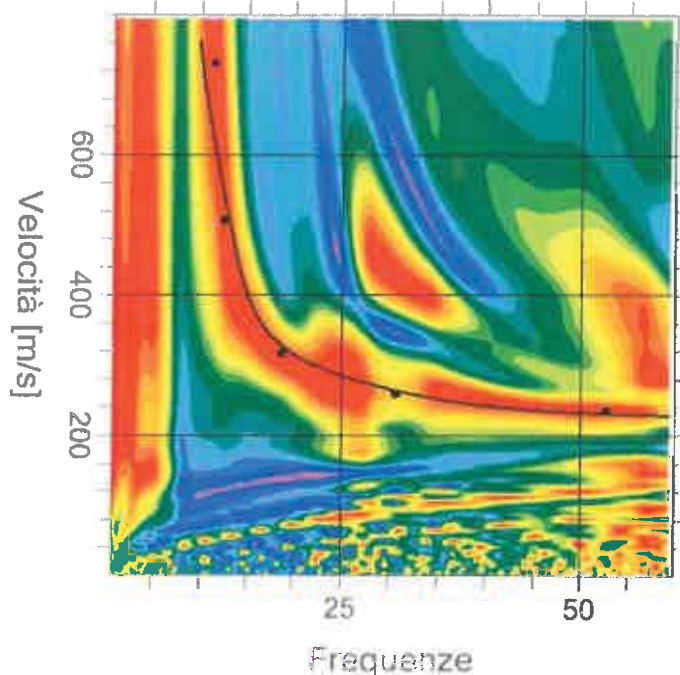


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

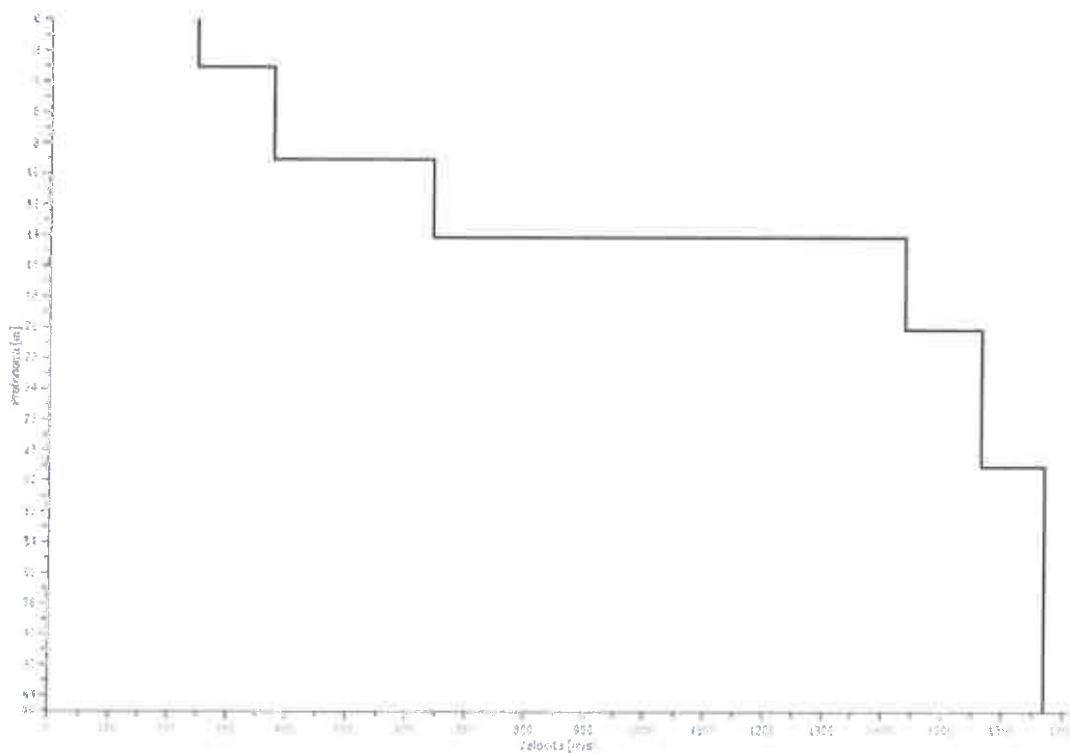


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

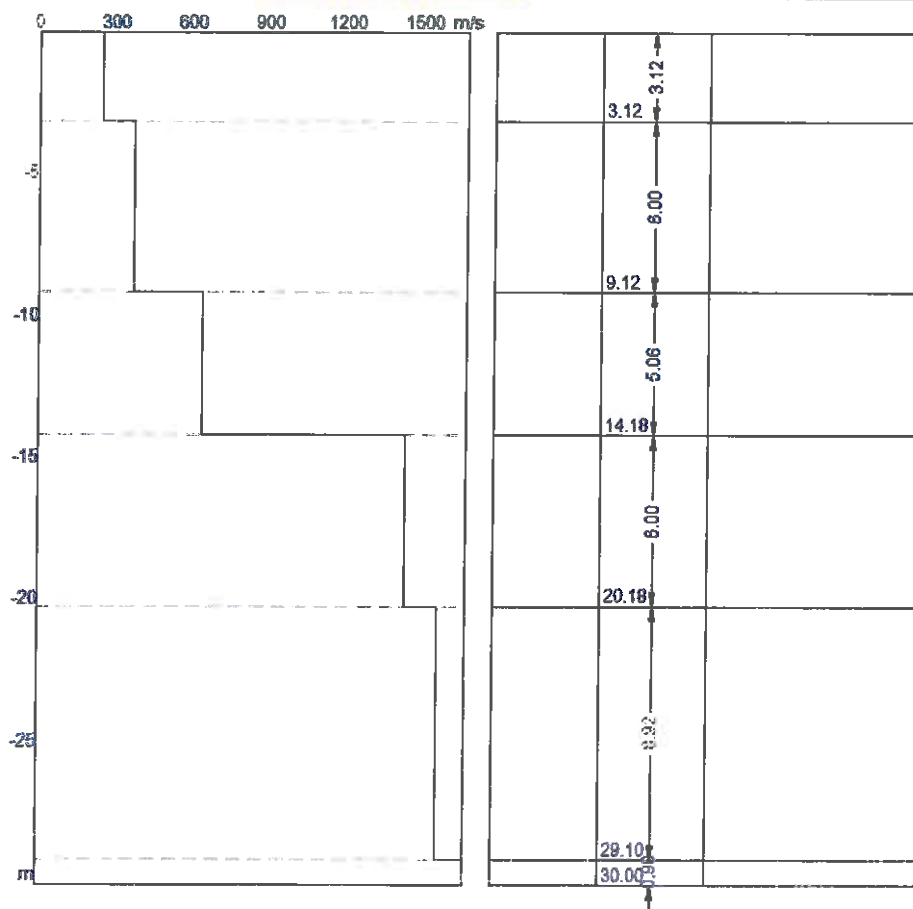


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	3.12	3.12	246.02	401.75	1800.00	0.20	108.95	290.53	145.26	261.47
2	9.12	6.00	376.06	614.10	1800.00	0.20	254.55	678.81	339.41	610.93
3	14.18	5.06	642.78	1049.65	1800.00	0.20	743.70	1983.19	991.60	1784.87
4	20.18	6.00	1436.15	2345.22	1800.00	0.20	3712.53	9900.08	4950.04	8910.07
5	29.10	8.92	1564.96	2555.57	2957.00	0.20	7242.00	19312.00	9656.00	17380.80
6	-	-	1668.86	2725.23	2957.00	0.20	8235.48	21961.27	10980.64	19765.15

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>A.S.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisella: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	3.12	3.12	246.02	401.75	388.46	B
2	9.12	6.00	376.06	614.10		
3	14.18	5.06	642.78	1049.65		
4	20.18	6.00	1436.15	2345.22		
5	29.10	8.92	1564.96	2555.57		
6	-	-	1668.86	2725.23		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 388.46 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s." per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A-307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C-438 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

Documentazione Fotografica



Esecuzione della prova M.A.S.W. ME216

 SIDERCEM <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

PROVA MASW ME217 SS194 “Ragusana”

1.0 Premessa

Nell'ambito del “Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo “Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 “di Chiaramonte” con la SS115 e lo svincolo della SS194 “Ragusana”” è stata programmata e condotta una prova di sismica attiva di tipo M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), la quale si basa sulla registrazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

In particolare è stata eseguita la seguente tipologia di indagine:

MASW	Lunghezza stendimento (m)	Step - Geofoni (m)	*Offset (m)	Intervallo campionamento (msec)	Tempo di acquisizione (sec)
ME217	55.0	5.0	5.0	0.956	0.5

In Figura 1 viene riportata l'ubicazione delle indagini geofisiche effettuate.



Figura 1: Ubicazione indagini effettuate, con in rosso lo stendimento MASW.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELLA METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW"

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua (al centro dello stendimento) il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano 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, anche se influenzate dalla V_p (Velocità delle onde P) e della densità, esse sono strettamente correlate alla V_s (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito e negli studi di amplificazione dello scuotimento sismico).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile dal fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

In questo metodo le onde superficiali generate in un punto, sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Che permettono di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 1Hz e 60Hz, dando così, informazioni sui primi 30 m-50 m di profondità di indagine, in funzione della rigidità del suolo.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è un sismografo a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n° 12 geofoni verticali aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger del sismografo.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori (geofoni) a componente verticale (Fig. 2). Per ogni prova sono stati effettuati N° 4 energizzazioni, con un offset (distanza dal geofono n° 1) di 5.0 m.

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

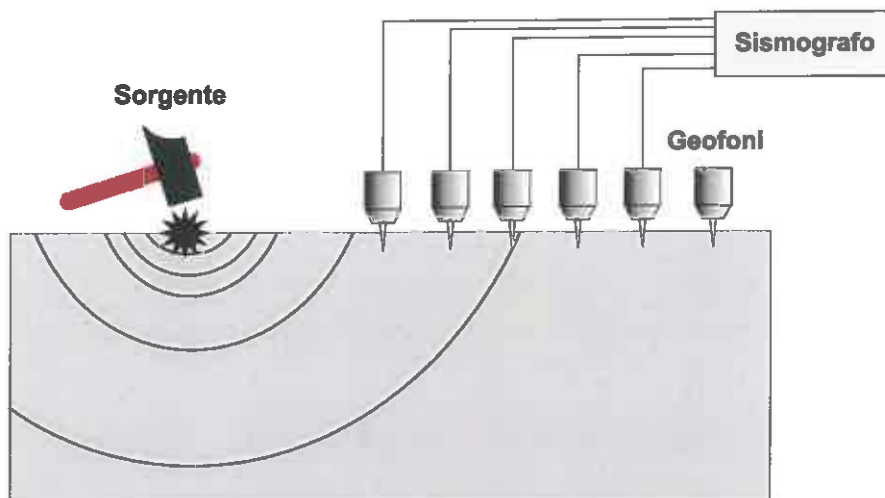


Figura 2: Sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde P e delle onde di Rayleigh

2.2 Elaborazione dati

L'analisi M.A.S.W. può essere ricondotta in quattro fasi:

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali mediante il metodo *phase-shift*, il quale consente di ottenere un grafico della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza e del contenuto di energia;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie $f-V_{\text{fase}}$ (*picking*) cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano V_{fase} (m/s) - frequenza (Hz), oppure nella definizione di un modello stratigrafico teorico (variandone spessori, V_s e coefficiente di Poisson) in cui la curva di dispersione teorica approssima al meglio quella sperimentale osservata;
- 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 ;
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica; vengono variati opportunamente lo spessore H , la velocità delle onde di taglio V_s e la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino al raggiungimento di 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.

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianisetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	Timbro a secco	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

2.3 Calcolo parametro Vs30

L'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento attraverso la misura delle Vs30 o di altri parametri geotecnici (Tabella 1) rappresenta l'approccio semplificato per variare l'azione sismica individuata in prima analisi dai valori di accelerazione orizzontale massima ag (e dei parametri Fo, Tc* etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A), in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (la rete nazionale è definita da nodi che non distano più di 10 km).

Tale variazione infatti tiene conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali del sottosuolo del sito indagato e della morfologia della superficie. Questa modifica rappresenta la Risposta Sismica Locale (RSL).

Una volta definito il Modello Geologico di Riferimento, a seconda delle condizioni geologico - stratigrafiche, strutturali, dalla presenza di effetti di sito e in funzione dell'importanza del progetto, si dovrà optare per questo approccio semplificato o per un'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

In seguito all'emanazione in data 20 febbraio 2018 del nuovo quadro normativo ovvero del nuovo D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", la modalità di definizione della categoria di sottosuolo subisce delle modifiche. Tali modifiche si riferiscono alla profondità da utilizzare per la definizione della categoria di sottosuolo. In particolare secondo le nuove disposizioni normative la velocità delle onde di taglio VS non devono più essere riferite sempre alla profondità di 30 m da p.c., ma alla profondità (H) a cui si trova il substrato, di cui si dà in seguito definizione. Conseguentemente non si farà più riferimento alla Vs,30 ma alla Vs,eq, secondo la seguente formula:

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

dove:

hi = spessore dell'i-esimo strato

Vs,i= velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato

N= numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

 <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Callianasetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiori ai 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ne consegue che secondo il D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", le categorie di sottosuolo sono classificate secondo la seguente tabella (Tab. 2.3):

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

Tabella 2.3: Categorie di sottosuolo di fondazione (N.T.C. 2018)

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

3.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEOFISICA

I dati acquisiti (Fig.3.0.a) sono stati elaborati con il software Easy MASW (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione/modellazione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s).

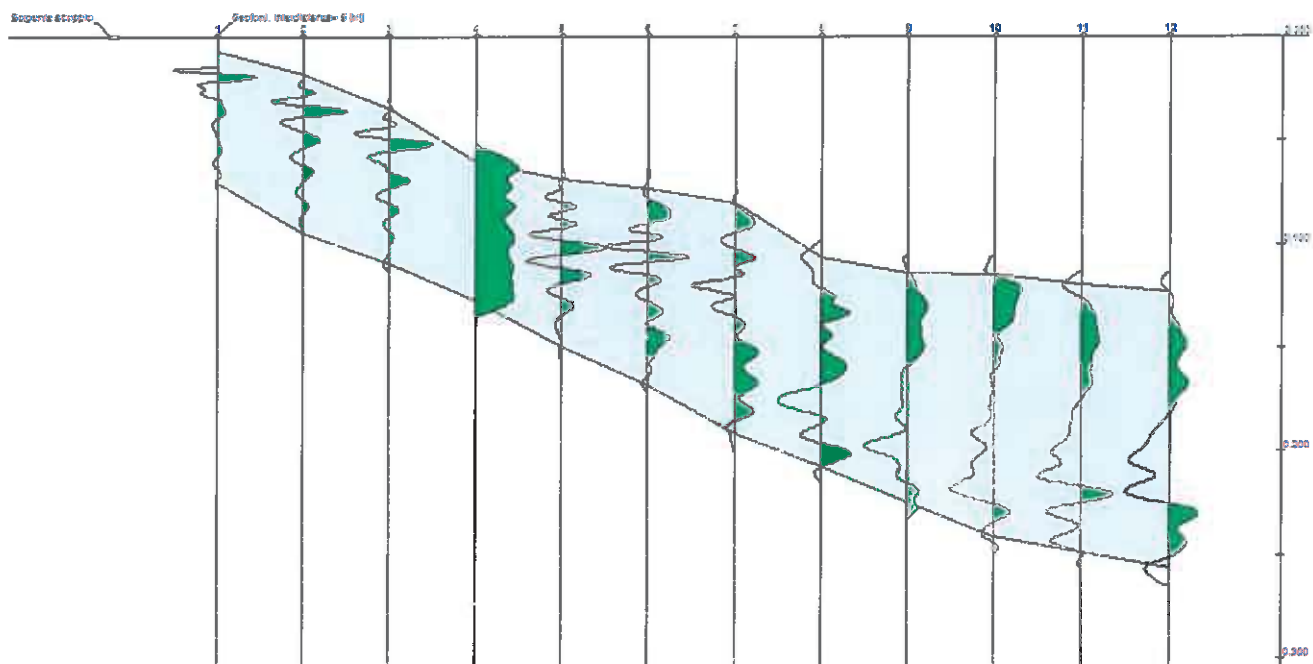


Figura 3.0.a: Tracce sismiche registrate durante l'acquisizione dati

Dall'analisi spettrale del segnale sismico acquisito mediante il metodo phase-shift è stato ricavato il grafico dell'ampiezza spettrale - velocità di fase - frequenza (Fig.3.0.b). Dal grafico si può osservare la curva di dispersione del modo fondamentale individuata dal modello teorico applicato per il caso in esame.

 <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

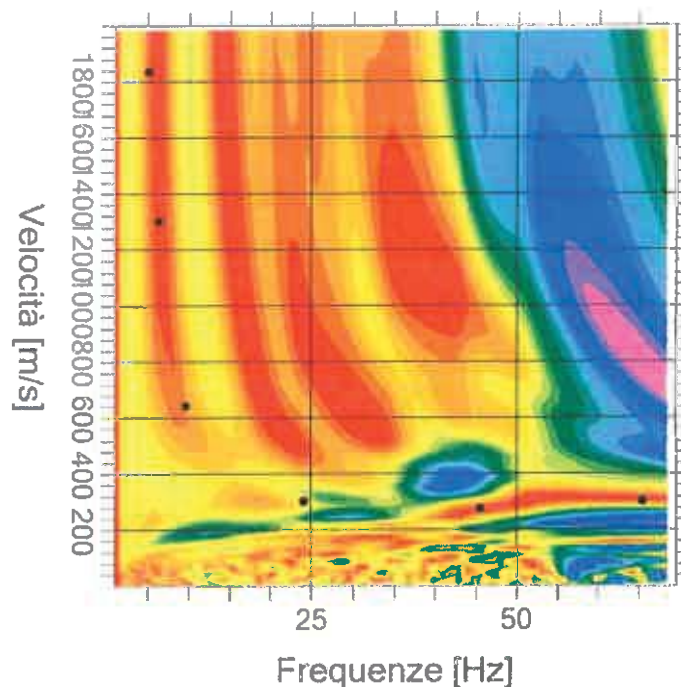



Figura 3.0.b: Grafico dello spettro in ampiezza della velocità di fase in funzione della frequenza

Il modello sismostratigrafico teorico utilizzato per l'inversione della curva di dispersione sperimentale consiste in cinque sismostrati sovrastanti un semispazio.

Di seguito vengono presentati i risultati dell'inversione che hanno mostrato la percentuale minima di errore con il grafico delle curve di dispersione teoriche ottenute (Fig.3.0.c), il profilo di velocità delle onde S nei primi 30 metri (Fig.3.0.d), il modello sismostratigrafico del sottosuolo (Fig.3.0.e) e due tabelle riassuntive con una stima dei parametri geotecnici medi per ciascun sismostrato (Tab.3.0.a) e con i risultati dell'indagine M.A.S.W. (Tab.3.0.b).

 <small>S.p.A.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

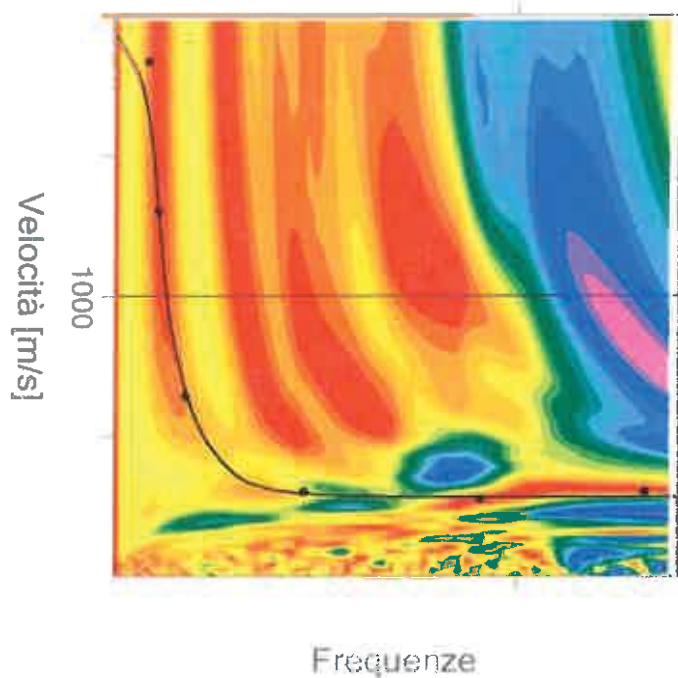


Figura 3.0.c: Curve di dispersione teoriche ottenute dal modello teorico del sottosuolo

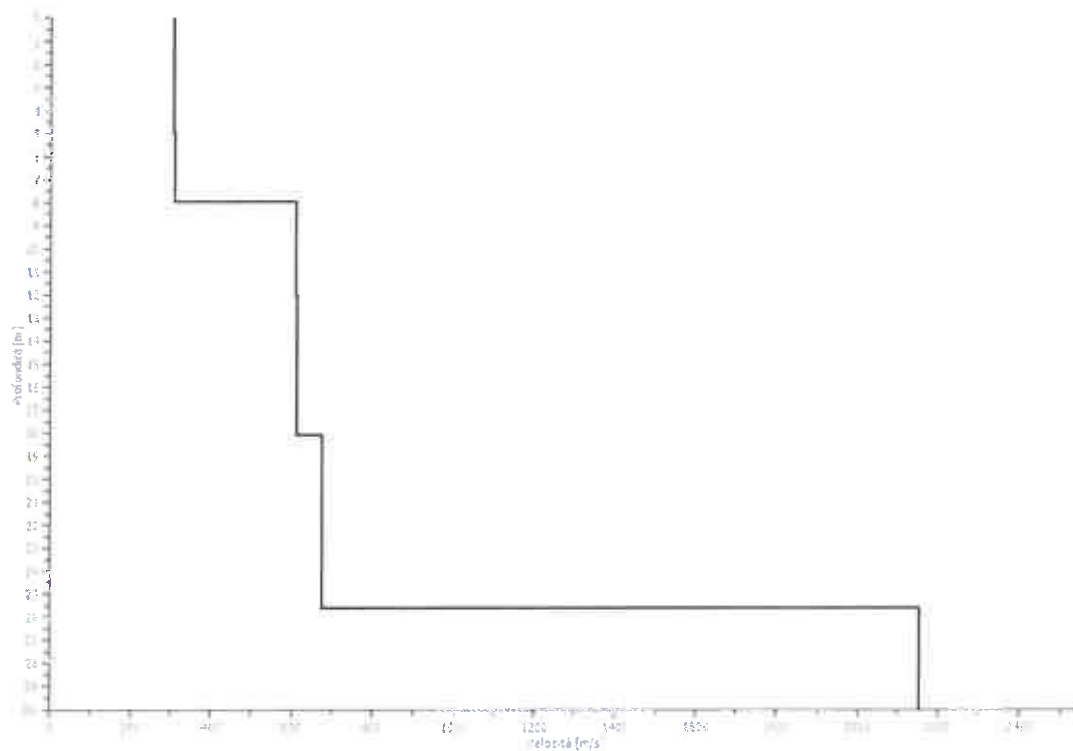


Figura 3.0.d: Profilo di velocità della Vs nei primi 30 metri (in nero)

 <small>S.p.A.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

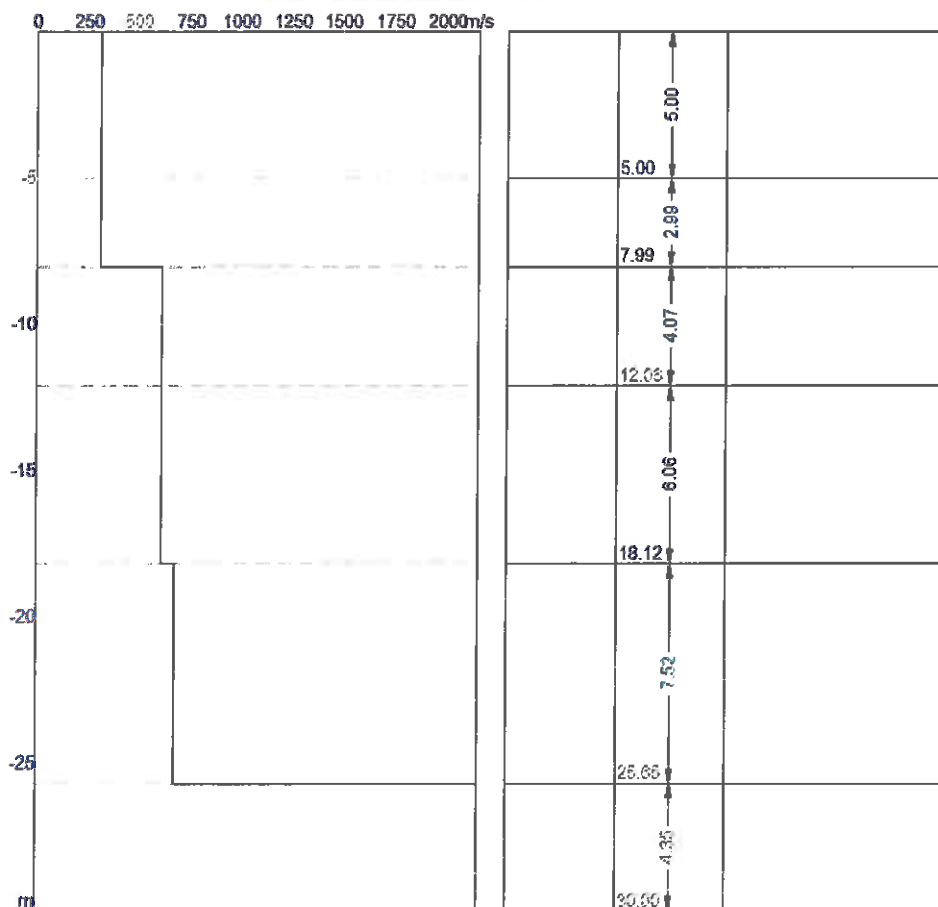


Figura 3.0.e: Modello sismostratigrafico del sottosuolo

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	5.00	5.00	307.87	502.75	1835.00	0.20	173.93	463.81	231.90	417.43
2	7.99	2.99	308.02	502.99	1835.00	0.20	174.10	464.25	232.13	417.83
3	12.06	4.07	607.79	992.52	1937.00	0.20	715.54	1908.11	954.06	1717.30
4	18.12	6.06	611.11	997.94	2957.00	0.25	1104.31	2944.83	1472.42	2650.35
5	25.65	7.52	674.98	1102.24	2957.00	0.35	1347.21	3592.57	1796.28	3233.31
6	-	-	2152.71	3515.35	2957.00	0.40	13703.17	36541.77	18270.89	32887.60

Tabella 3.0.a: Parametri geotecnici medi (G0: Modulo di taglio; Ed: Modulo edometrico; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young)

 <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. – Iscr.C.C.I.A.A. di Callianissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
		Data prova	05/08/2021

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Vs eq. [m/s]	Categoria di sottosuolo
1	5.00	5.00	307.87	502.75	477.42	B
2	7.99	2.99	308.02	502.99		
3	12.06	4.07	607.79	992.52		
4	18.12	6.06	611.11	997.94		
5	25.65	7.52	674.98	1102.24		
6	-	-	2152.71	3515.35		

Tabella 3.0.b: Risultati prova M.A.S.W.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello definire il suolo tipo secondo la normativa sismica vigente (D.M. NTC 2018).

Il risultato ottenuto dall'indagine M.A.S.W. può così essere sintetizzato:

- *Il modello di velocità del sottosuolo è riconducibile a n.5 sismostrati sovrastanti un semispazio;*
- *L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e, di conseguenza, del parametro Vseq, risultato per il modello medio pari a Vseq = 477.42 m/s calcolata da -0,0 m dal p.c.;*

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. 2018) il sottosuolo ricade nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s" per la prospezione eseguita.



Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
Certificato	C-GFS-C 439 del 22/09/2021
Data prova	05/08/2021

Documentazione Fotografica




Esecuzione della prova M.A.S.W. ME217



AQ D.G. 26/18 - C.A. n° 1

Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'

Lotto 4

	A	Stratigrafie sondaggi geognostici				
	B	Stratigrafie pozzetti esplorativi				
	C	Indagini geofisiche: MASW				
	D	Indagini geofisiche: Down-hole				
	E	Indagini geofisiche: Cross-hole				
	F	Indagini geofisiche: tom. Sism. 2D				
	G	Rilievo masse ferrose				
	H	Monitoraggio inclinometrico				
	I	Monitoraggio piezometrico				
	L	Prove di laboratorio geotecnico				
	M	Analisi chimiche				
	N	Rilievi GPS				
	O	Prove di carico su piastra				
	Commessa	Rev.	Periodo di indagine	Data Emissione	Redazione (RS)	Verifica (VRSQ)
526/1	0	Giugno-Ottobre 2021	05/10/2021	dott. geol. Marco Pirrone	dott. ing. Salvatore Manta	dott. ing. Vincenzo Arena

 SIDERCER [®] <small>S.p.A.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

Rapporto sulla indagine geofisica Down-Hole

1.0 PREMESSA

E' stata eseguita n.1 misura di tipo Down-Hole a supporto delle indagini riguardo i "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'".

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018. Nel particolare si hanno le seguenti caratteristiche per le indagini svolte:

DH	Lunghezza sondaggio [m]	Offset battute [m]	Interdistanza letture [m]	Sampling Interval [msec]	Recording time [s]
SE230_Gd	35,00	2	1,00	0,128	0,20

Si riporta di seguito l'ubicazione dell'indagine geofisica effettuata (Fig.1)



Fig.1 - Ubicazione dell'indagine geofisica effettuata

 SIDERCER [®] <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

Lo scopo di tali prove consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti (VP, VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Questa metodologia, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché si misurano i tempi d'arrivo delle onde elastiche lungo la profondità del foro è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito della successione dei litotipi incontrati nella perforazione.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata consiste in un geofono da pozzo 3D Twin Borehole Geophone della 'Ambrogeo', composto da tre sensori disposti ortogonalmente tra loro per registrare le 3 componenti (una verticale e due orizzontali) e dotato di un sistema d'ancoraggio pneumatico, e un sismografo digitale della "Ambrogeo" con memoria incrementale a 24 bit.

Le caratteristiche tecniche del sistema sono:

- capacità di campionamento dei segnali da 0.032 msec a 0.956 msec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" tramite starter collegato al circuito trigger del sismografo;
- Filtri High Pass e Band Reject;
- Automatic Gain Control;
- Acquisizione dati ad incremento di segnale;
- Convertitore A/D a 24 bit;

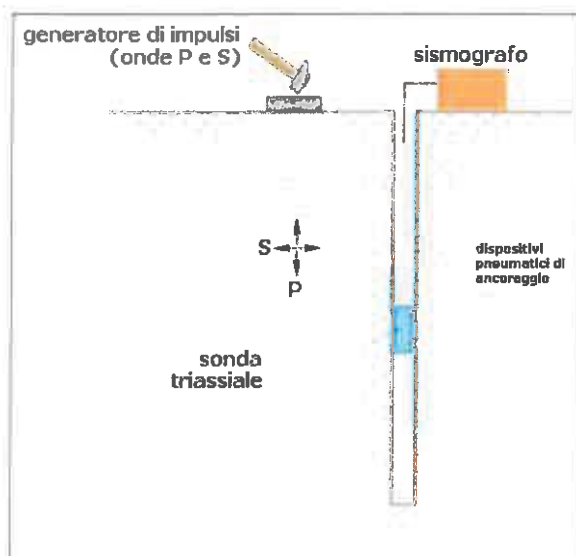



Fig.2 Schema di acquisizione indagine Down-Hole

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

L'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante massa battente, così come rappresentato in figura 2. Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una trave massiccia, posizionata ad una distanza di 1,5 metri dall'asse del foro, in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione. Le misure sono state eseguite inserendo il geofono tridimensionale all'interno del foro del sondaggio geognostico a c.c. opportunamente attrezzato, rivestito adeguatamente con un tubo PVC, mentre è stato cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo di rivestimento, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione.

Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione il geofono è stato reso solidale alle pareti del foro, mediante dei pistoni ad estrazione pneumatica.

I dati sono stati acquisiti dal piano campagna fino ad una profondità di 30 metri, con intervalli di un metro, utilizzando la seguente procedura:

- Ancoraggio della sonda triassiale, energizzazione verticale ed acquisizione della traccia sismica relativa alle onde P.
- Energizzazione orizzontale ed acquisizione delle tracce sismiche relative alle onde S.
- Memorizzazione dei dati, sblocco dell'ancoraggio della sonda triassiale e passaggio all'acquisizione successiva.

I dati acquisiti sono stati visualizzati in tempo reale per un controllo preventivo della bontà dell'acquisizione.

Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{\text{corr}} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico t_{corr} - z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo solo

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754920874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

un'apparente migliore definizione del profilo di velocità. Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti e la velocità intervallo delle onde P e S con la formula seguente:

$$v_{p,s} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2corr} - t_{1corr}}$$

Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano. In tali condizioni ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici e vale a dire: omogeneità, isotropia e continuità.

Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

nella quale:

σ = sforzo applicata;

ε = deformazione prodotta;


K = coefficiente di proporzionalità

K, è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti (costanti elastiche dei mezzi).

Le deformazioni e le tensioni generate da un impulso sismico rispondono ai requisiti visti prima: sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi, come già detto, i terreni e le rocce attraversate da onde sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico.

Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza biunivoca con le fasi P e S dell'input sismico.

Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati. Tali parametri esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando sottoposto ad uno sforzo e sono:

 <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

E (modulo di Young) esprime la resistenza alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o di compressione;

v (Coefficiente di Poisson) indica la misura del cambiamento geometrico in forma di un corpo elastico;

G (modulo di taglio) dà una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo tangenziale ed esprime quindi la capacità del materiale a resistere cambiando di forma e non di volume;

K (modulo di compressibilità volumetrica) misura il rapporto sforzo-deformazione ed indica la resistenza di un corpo alle variazioni di volume.

3.1 RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

Le tracce acquisite sono state elaborate con il software Downhole della Geostru (picking primo arrivo onde P ed S, calcolo dromocrone, interpretazione e modello di velocità) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s). Si riportano di seguito le tracce registrate durante l'esecuzione della prova con il relativo picking delle onde P (fig.3) ed S (fig.4).

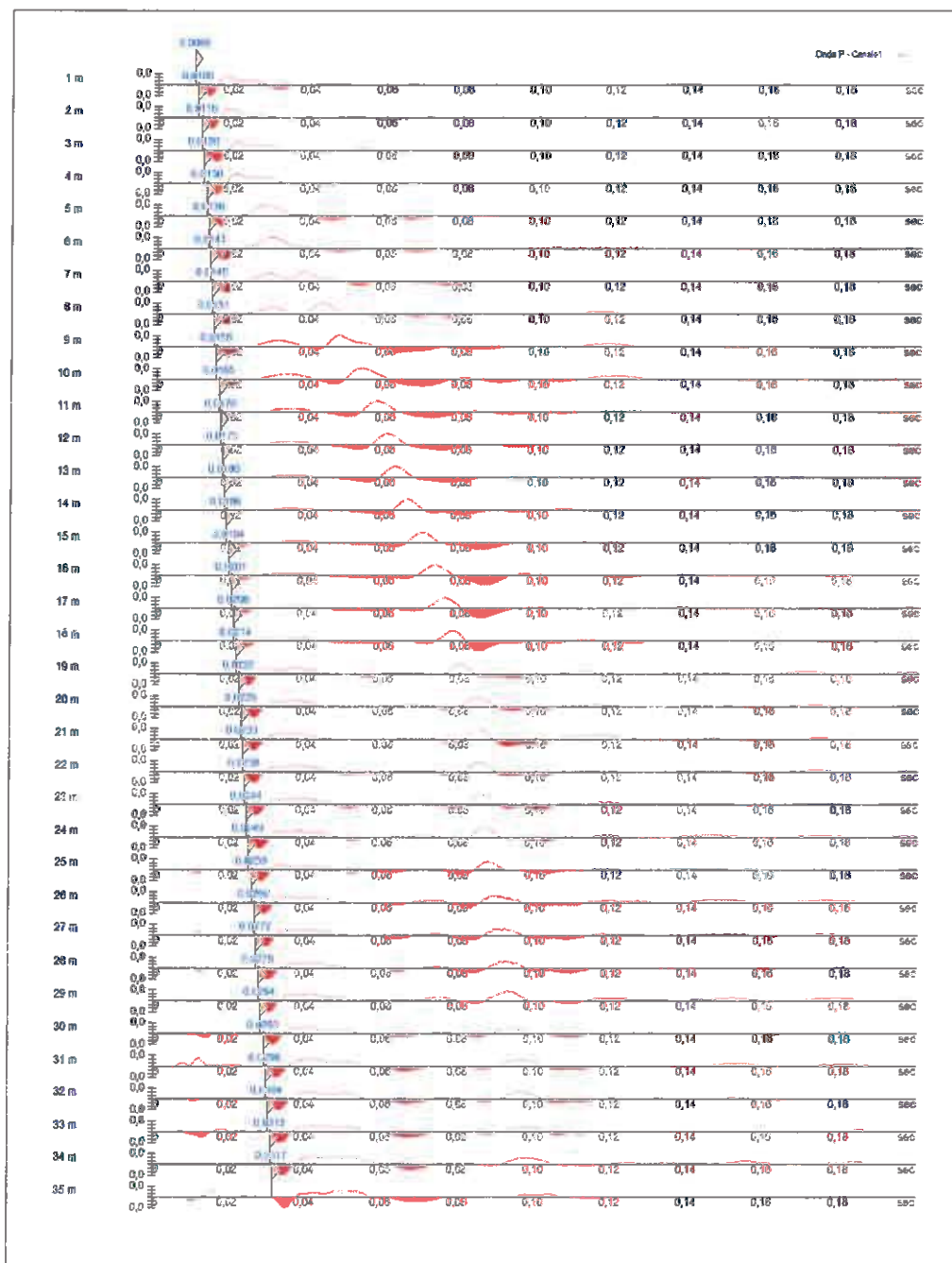


Fig.3 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde P

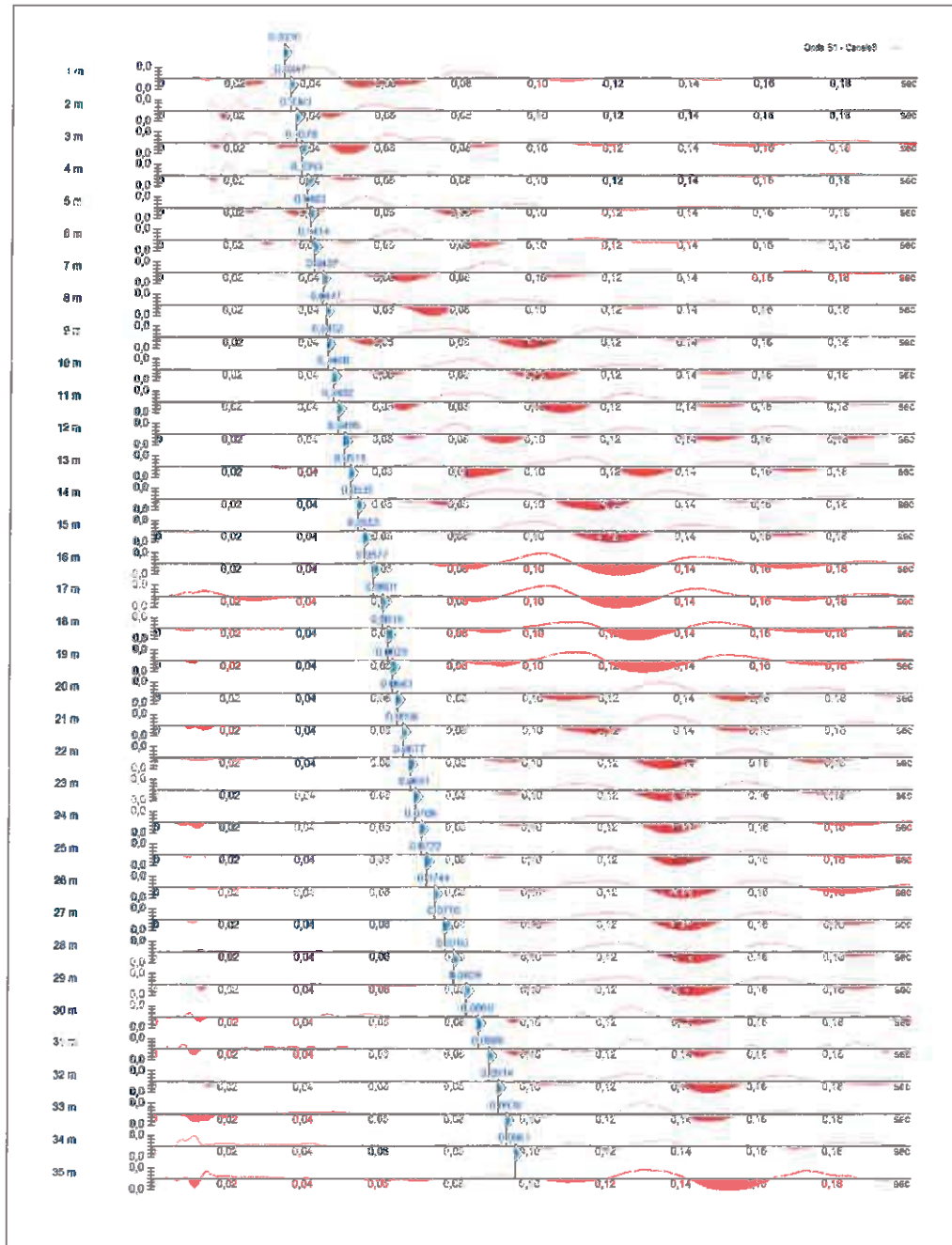


Fig.4 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde S

Dai tempi di arrivo sperimentali ottenuti dal picking dei primi arrivi, sono stati calcolati i tempi corretti (tab.1).

SR [m]	Tpcorr [msec]	Tscorr [msec]
1,8028	5,3251	18,3051
2,5000	8,4800	27,7600
3,3541	10,3754	32,4677
4,2720	11,2360	35,3932
5,2202	12,4517	37,6426
6,1847	13,1939	39,0967
7,1589	13,7870	40,4810
8,1394	14,2517	42,9515
9,1241	14,8946	44,0918
10,1119	15,6252	44,6999
11,1018	16,3487	46,3709
12,0934	16,8687	47,8278
13,0863	17,3847	49,5711
14,0801	17,8976	51,2069
15,0748	18,5077	53,2345
16,0702	19,3153	55,0586
17,0661	20,0222	57,4767
18,0624	20,7282	59,8924
19,0591	21,3336	61,4089
20,0562	22,1378	62,7238
21,0535	22,8418	64,1366
22,0511	23,2460	65,6476
23,0489	23,7496	67,5565
24,0468	24,3525	68,9654
25,0450	25,1548	70,7727
26,0432	25,8570	72,0801
27,0416	26,2595	74,2855
28,0402	27,1611	76,8898
29,0388	27,7629	79,3939
30,0375	28,3646	82,6967
31,0363	29,2658	85,8995
32,0351	29,7673	88,8025
33,0341	30,3686	91,3057
34,0331	31,1697	93,5090
35,0321	31,6709	96,0119

Tabella 1 Risultati della distanza tra sorgente-ricevitore (SR), tempi corretti delle onde p (Tpcorr) e delle onde S (Tscorr)

 SIDERCEM [®] S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874 P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

Per l'interpretazione della prova è stato applicato il metodo diretto, ricavando dai dati in tabella 1 il grafico $t_{corr} - z$ (fig.5) in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

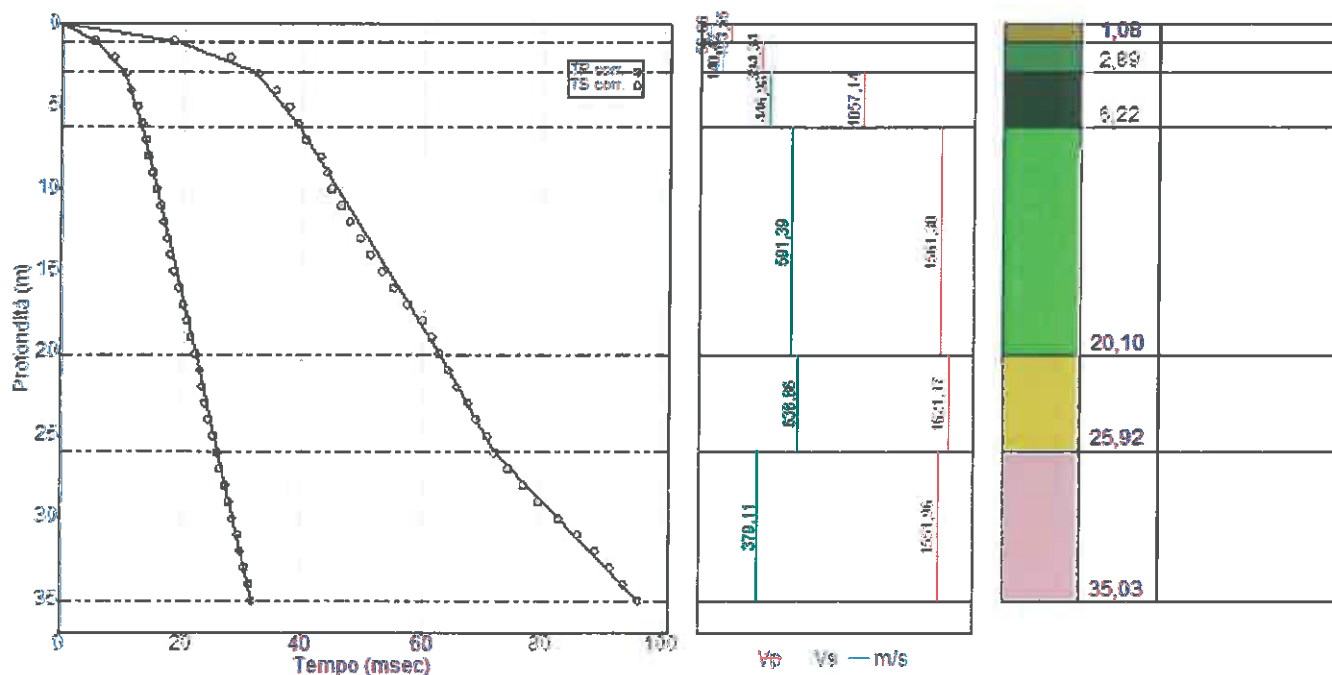


Fig.5 Dromocrone tempi corretti-profondità, profilo di velocità e colonna sismostratigrafica ricavate con metodo diretto

Il risultato dell'interpretazione ha restituito un modello a n.6 sismostrati avente le seguenti caratteristiche in termini di velocità media delle onde P ed S e di stima dei parametri geotecnici medi (Tab.2):

Sismostrato	Profondità [m]	Vp medio [m/s]	Vs medio [m/s]	g medio [kN/mc]	ni medio	G medio [MPa]	Ed medio [MPa]	E medio [MPa]	Ev medio [MPa]
1	1,08	193,55	56,66	15,31	0,45	5,01	58,47	14,56	51,79
2	2,89	394,34	140,42	18,12	0,43	36,43	287,34	104,01	238,76
3	6,22	1057,14	446,98	21,67	0,39	441,55	2469,84	1228,52	1881,11
4	20,1	1561,3	591,39	21,54	0,42	768,06	5353,28	2175,53	4329,2
5	25,92	1621,17	638,86	22,3	0,41	928,13	5976,66	2613,77	4739,15
6	35,03	1551,96	379,11	20,33	0,47	297,92	4992,57	874,84	4595,35

Tabella 2 Valori medi dei moduli geotecnici e delle velocità delle onde sismiche all'interno dei sismostrati identificati

Dove:

g = peso di volume;

ni= Coefficiente di Poisson;

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

G = modulo di deformazione di taglio;

Ed = modulo di compressibilità edometrica;

E = modulo di Young;

Ev = modulo di compressibilità volumetrica.

In ottemperanza alle “Nuove Norme Tecniche per la Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018” la classificazione del sito può essere ottenuta sulla base del valore “Vs, eq” (velocità media equivalente delle onde di taglio con substrato rigido presente entro i primi 30,0m), o “Vs 30” (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m con substrato rigido > di 30,0m di profondità) utilizzando la seguente espressione:

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

dove:

hi=spessore dell’i-esimo strato;

Vs,i=velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;

N=numero strati;

H=profondità del substrato rigido (Bed Rock) < d 30,0 m caratterizzato da velocità non inferiore a 800,00 m/s; o H =30,0 m nel caso in cui il substrato rigido sia a profondità maggiori di 30,0 m.

Da quanto sopra esposto, si è calcolato a partire da - 0,0 m dal piano di campagna, un valore di velocità di Vs eq = 362,57 m/s, per un totale di n°6 strati presenti nel “modello sismostratigrafico” ottenuti mediante il “Metodo diretto”. Tale modello sismostratigrafico è stato discretizzato mediante il fitting tra la curva di calcolo e quella sperimentale di campagna, ovvero le “Dromocrone”. Ogni variazione di pendenza di tale curva, indica un cambiamento di propagazione di velocità delle onde di volume, che può essere attribuito ad una variazione dello stato di addensamento dei materiali e/o ad un cambio litologico. Si riporta infine una stima dell’andamento in profondità dei parametri geotecnici ottenuti applicando il metodo intervallo.

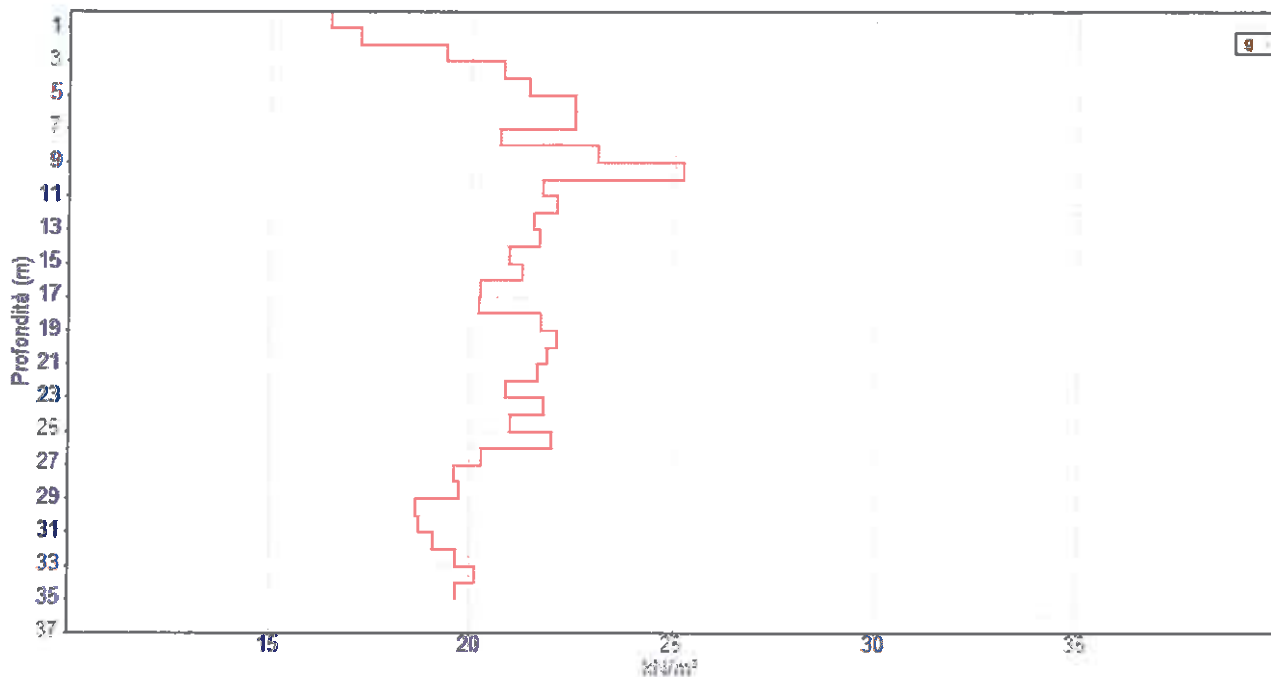


Fig.6 Andamento in profondità del peso di volume

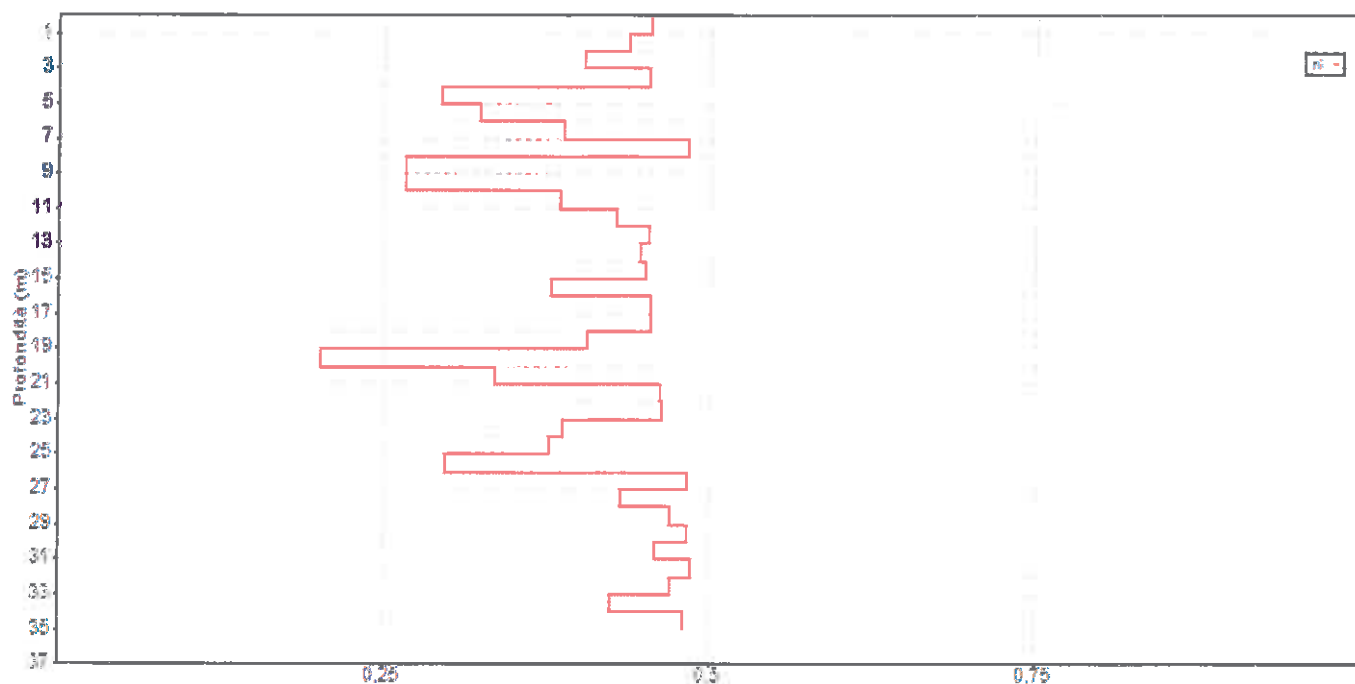


Fig.7 Andamento in profondità del Coefficiente di Poisson

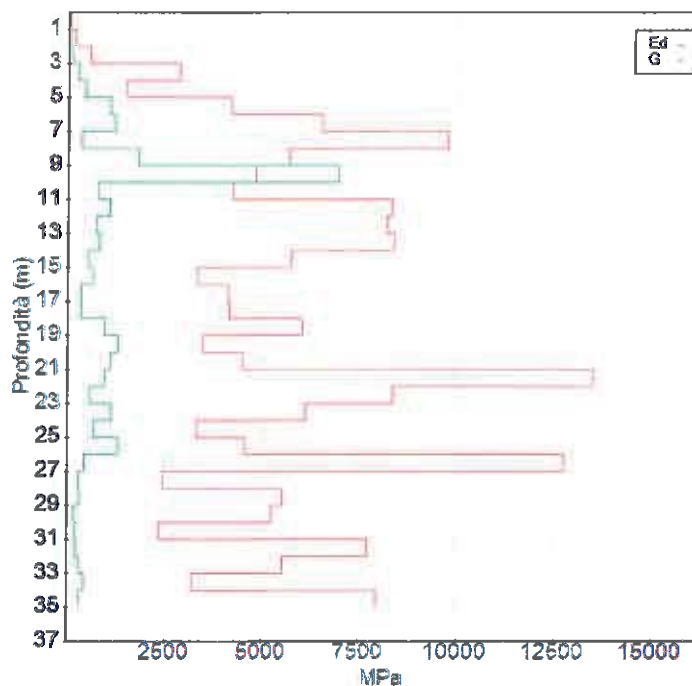


Fig.8 Andamento in profondità del modulo di taglio G e del modulo edometrico Ed

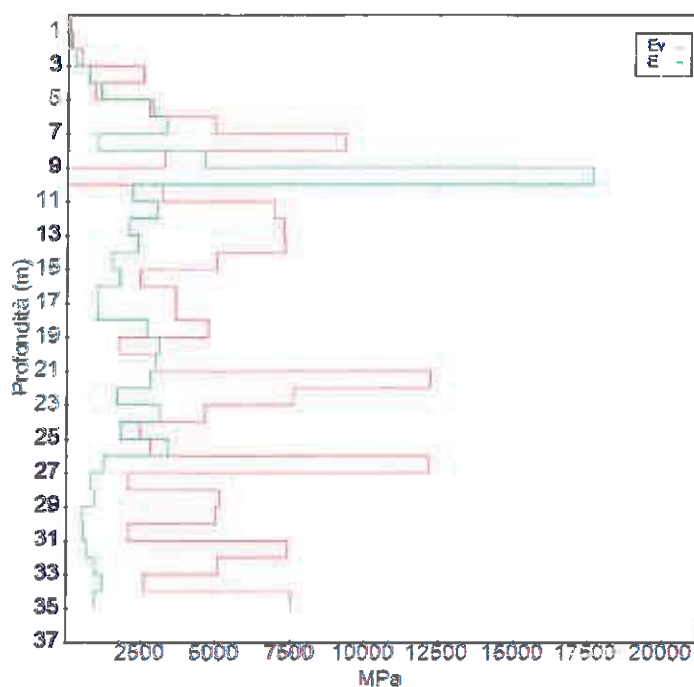


Fig.9 Andamento in profondità del modulo di Young E e del modulo di compressibilità Ev

 SIDERCEM [®] <small>S.R.L.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01734820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774.92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 442 del 22/09/2021
		Data prova	13/08/2021

4. CONCLUSIONI

La risultanza della prova Down-Hole, mediante il calcolo dei valori di velocità delle onde longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) e dei relativi parametri geotecnici, ha permesso di caratterizzare e quantificare l'aspetto sismico dei terreni oggetto di studio. Dalla interpretazione della prova sismica in foro con metodo diretto è emerso un modello a n°6 sismostrati, dove è stata eseguita una caratterizzazione geofisica delle principali caratteristiche fisiche, quali la velocità di attraversamento delle onde P ed S con i relativi valori dei moduli elastici dinamici riferiti a terreni soggetti a sollecitazioni di tipo sismico. Inoltre, sono stati stimati i parametri geotecnici medi applicando il metodo pseudo-intervallo, e cioè per orizzonti aventi spessore di 1,0 m a partire dal piano di campagna, fino alla profondità di fine sondaggio.

In osservanza al Nuovo NTC di cui al D.M. del 17 Gennaio 2018, ai fini dell'azione sismica di progetto, la stima del valore del V_s eq. risulta essere di **362,57 m/s**, calcolato da **0,0 metri dal piano di campagna**, ne consegue che la categoria di suolo attribuibile al settore in studio risulta essere la **"B"** e cioè *"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s"* così come previsto dalla normativa sopra menzionata.

Documentazione fotografica



Foto 1 - Esecuzione della prova geofisica Down-Hole

Rapporto sulla indagine geofisica Down-Hole

1.0 PREMESSA

E' stata eseguita n.1 misura di tipo Down-Hole a supporto delle indagini riguardo i "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'".

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018. Nel particolare si hanno le seguenti caratteristiche per le indagini svolte:

DH	Lunghezza sondaggio [m]	Offset battute [m]	Interdistanza letture [m]	Sampling Interval [msec]	Recording time [s]
SE239_Gp	35,00	1,5	1,00	0,128	0,20

Si riporta di seguito l'ubicazione dell'indagine geofisica effettuata (Fig.1)



Fig.1 - Ubicazione dell'indagine geofisica effettuata

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

Lo scopo di tali prove consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti (VP, VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Questa metodologia, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché si misurano i tempi d'arrivo delle onde elastiche lungo la profondità del foro è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito della successione dei litotipi incontrati nella perforazione.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata consiste in un geofono da pozzo 3D Twin Borehole Geophone della 'Ambrogeo', composto da tre sensori disposti ortogonalmente tra loro per registrare le 3 componenti (una verticale e due orizzontali) e dotato di un sistema d'ancoraggio pneumatico, e un sismografo digitale della "Ambrogeo" con memoria incrementale a 24 bit.

Le caratteristiche tecniche del sistema sono:

- capacità di campionamento dei segnali da 0.032 msec a 0.956 msec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" tramite starter collegato al circuito trigger del sismografo;
- Filtri High Pass e Band Reject;
- Automatic Gain Control;
- Acquisizione dati ad incremento di segnale;
- Convertitore A/D a 24 bit;

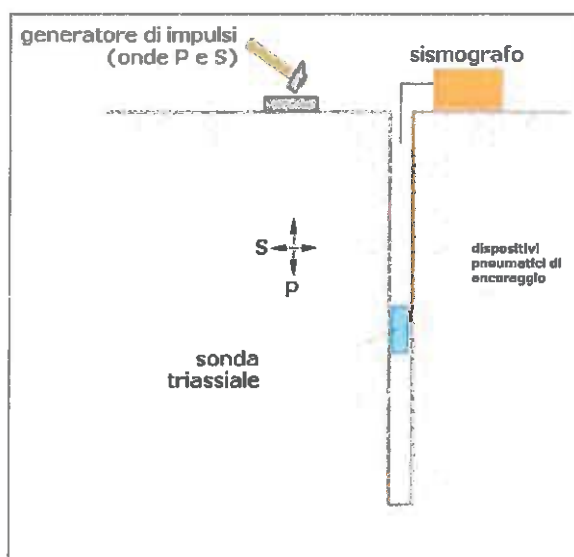


Fig.2 Schema di acquisizione indagine Down-Hole

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

L'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante massa battente, così come rappresentato in figura 2. Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una trave massiccia, posizionata ad una distanza di 1,5 metri dall'asse del foro, in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione.

Le misure sono state eseguite inserendo il geofono tridimensionale all'interno del foro del sondaggio geognostico a c.c. opportunamente attrezzato, rivestito adeguatamente con un tubo PVC, mentre è stato cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo di rivestimento, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione.

Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione il geofono è stato reso solidale alle pareti del foro, mediante dei pistoni ad estrazione pneumatica.

I dati sono stati acquisiti dal piano campagna fino ad una profondità di 30 metri, con intervalli di un metro, utilizzando la seguente procedura:

- Ancoraggio della sonda triassiale, energizzazione verticale ed acquisizione della traccia sismica relativa alle onde P.
- Energizzazione orizzontale ed acquisizione delle tracce sismiche relative alle onde S.
- Memorizzazione dei dati, sblocco dell'ancoraggio della sonda triassiale e passaggio all'acquisizione successiva.

I dati acquisiti sono stati visualizzati in tempo reale per un controllo preventivo della bontà dell'acquisizione.

Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{corr} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico t_{corr} - z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo solo

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01734820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

un'apparente migliore definizione del profilo di velocità. Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti e la velocità intervallo delle onde P e S con la formula seguente:

$$v_{P,S} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2corr} - t_{1corr}}$$

Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano. In tali condizioni ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici e vale a dire: omogeneità, isotropia e continuità.

Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

nella quale:

σ = sforzo applicata;

ε = deformazione prodotta;

K = coefficiente di proporzionalità

K, è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti (costanti elastiche dei mezzi).

Le deformazioni e le tensioni generate da un impulso sismico rispondono ai requisiti visti prima: sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi, come già detto, i terreni e le rocce attraversate da onde sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico.

Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza biunivoca con le fasi P e S dell'input sismico.

Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati. Tali parametri esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando sottoposto ad uno sforzo e sono:

 <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

E (modulo di Young) esprime la resistenza alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o di compressione;

v (Coefficiente di Poisson) indica la misura del cambiamento geometrico in forma di un corpo elastico;

G (modulo di taglio) dà una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo tangenziale ed esprime quindi la capacità del materiale a resistere cambiando di forma e non di volume;

K (modulo di compressibilità volumetrica) misura il rapporto sforzo-deformazione ed indica la resistenza di un corpo alle variazioni di volume.

3.1 RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

Le tracce acquisite sono state elaborate con il software Downhole della Geostru (picking primo arrivo onde P ed S, calcolo dromocrone, interpretazione e modello di velocità) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s). Si riportano di seguito le tracce registrate durante l'esecuzione della prova con il relativo picking delle onde P (fig.2) ed S (fig.3).

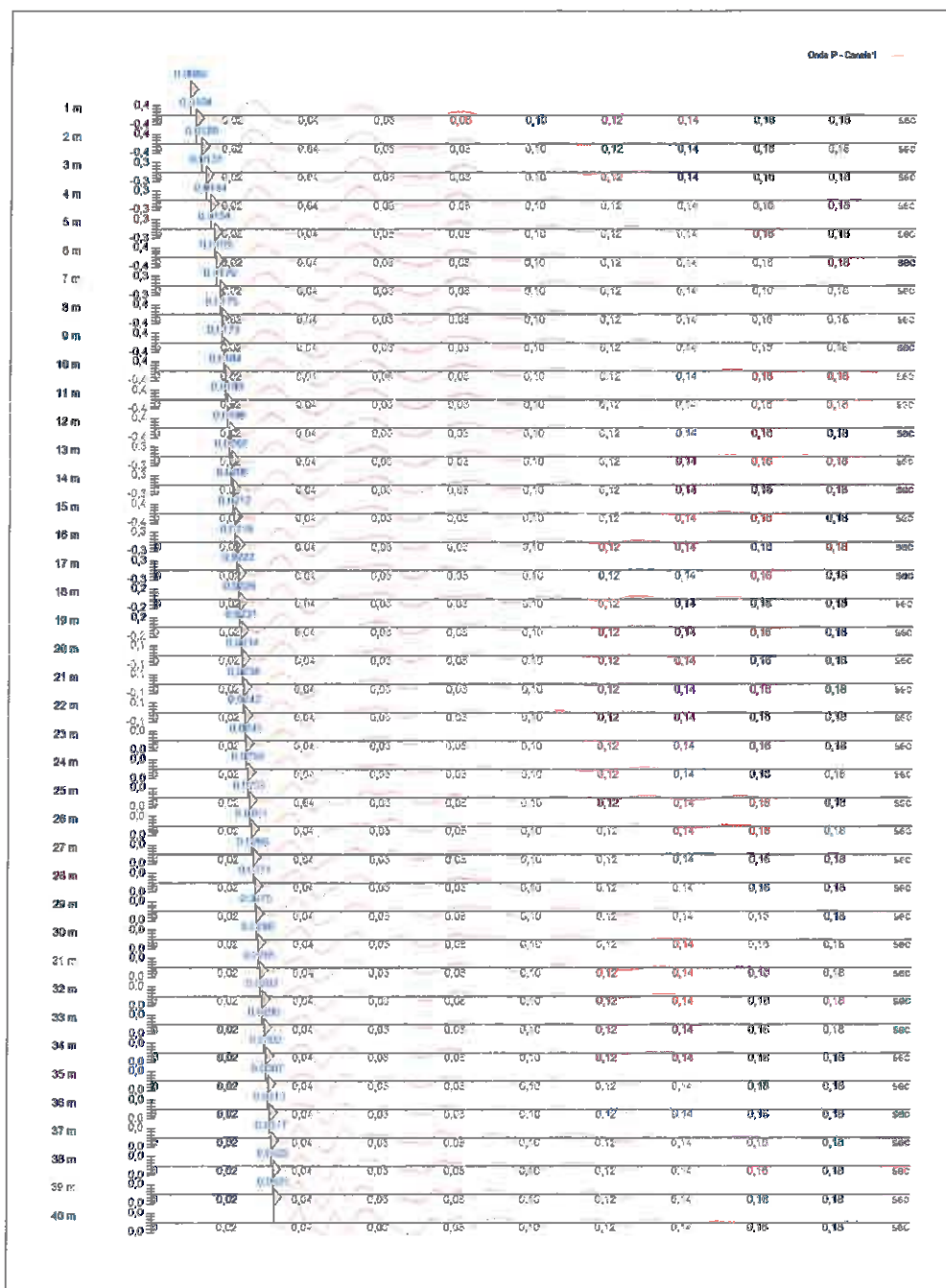


Fig.3 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde P

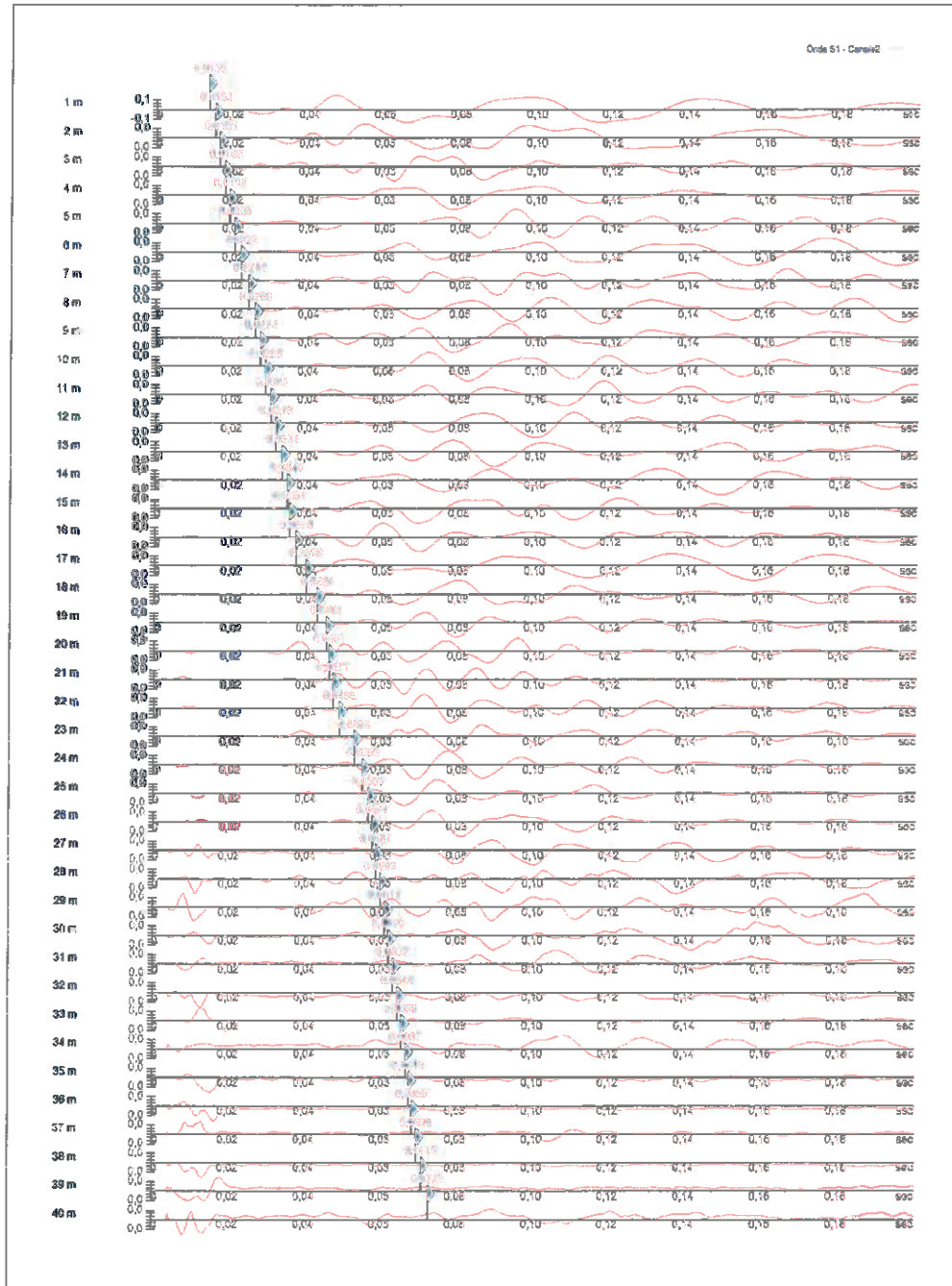


Fig.4 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde S

 SIDERCEM [®] <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Iv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

Dai tempi di arrivo sperimentali ottenuti dal picking dei primi arrivi, sono stati calcolati i tempi corretti (tab.1).

SR [m]	Tpcorr [msec]	Tscorr [msec]
1,8028	4,9368	7,5439
2,5000	8,3200	12,2400
3,3541	10,7331	14,7581
4,2720	12,2191	17,0412
5,2202	13,6969	18,5818
6,1847	14,8432	20,0820
7,1589	15,5471	21,7072
8,1394	16,7088	23,9821
9,1241	17,2619	25,6462
10,1119	17,7020	27,0969
11,1018	18,2313	28,5359
12,0934	18,7541	30,0660
13,0863	19,4708	31,3917
14,0801	20,0851	33,1105
15,0748	20,4978	34,4283
16,0702	20,9083	35,4446
17,0661	21,7654	36,8568
18,0624	22,1233	39,6625
19,0591	22,5299	42,5676
20,0562	23,0353	44,9737
21,0535	23,3405	46,2821
22,0511	23,7449	47,6893
23,0489	24,1487	49,8940
24,0468	24,4523	52,6972
25,0450	24,9551	54,9013
26,0432	25,4577	56,4062
27,0416	26,0598	57,6112
28,0402	26,5619	58,6160
29,0388	27,0638	59,8200
30,0375	27,4657	61,0238
31,0363	27,9673	61,9276
32,0351	28,4687	63,1307
33,0341	29,1699	64,3336
34,0331	29,5712	65,4364
35,0321	30,1723	66,6388

Tabella 1 Risultati della distanza tra sorgente-ricevitore (SR), tempi corretti delle onde p (Tpcorr) e delle onde S (Tscorr)

Per l'interpretazione della prova è stato applicato il metodo diretto, ricavando dai dati in tabella 1 il grafico tcorr - z (fig.5) in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

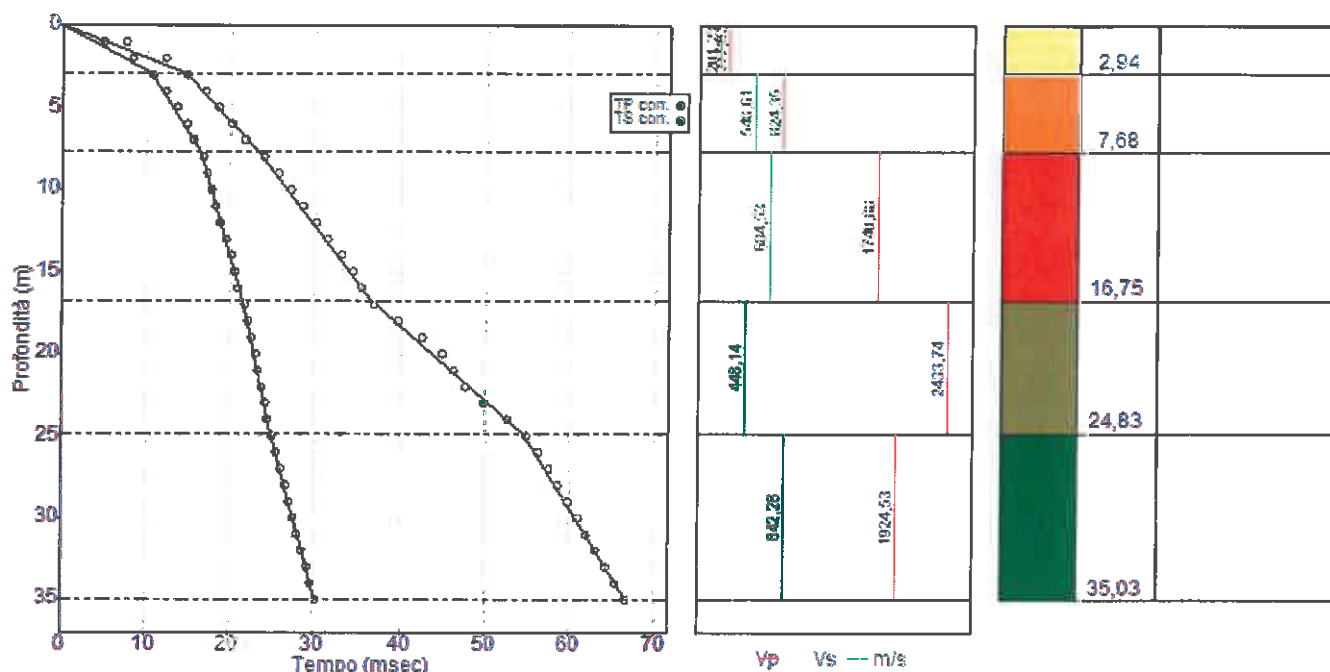


Fig.5 Dromocrone tempi corretti-profondità, profilo di velocità e colonna sismostratigrafica ricavate con metodo diretto

Il risultato dell'interpretazione ha restituito un modello a n.5 sismostrati avente le seguenti caratteristiche in termini di velocità media delle onde P ed S e di stima dei parametri geotecnici medi (Tab.2):

Sismostrato	Profondità [m]	Vp medio [m/s]	Vs medio [m/s]	g medio [kN/mc]	ni medio	G medio [MPa]	Ed medio [MPa]	E medio [MPa]	Ev medio [MPa]
1	2,94	277,62	201,23	18,97	-	78,34	149,1	-	44,65
2	7,68	824,35	548,61	22,01	0,13	675,57	1525,32	1489,61	624,56
3	16,75	1740,88	684,53	22,22	0,41	1061,7	6866,89	2990,94	5451,28
4	24,83	2433,74	448,14	21	0,48	430,02	12682,35	1274,95	12108,99
5	35,03	1924,53	842,28	22,95	0,38	1660,33	8668,27	4587,63	6454,49

Tabella 2 Valori medi dei moduli geotecnici e delle velocità delle onde sismiche all'interno dei sismostrati identificati


Dove:

g = peso di volume;

ni= Coefficiente di Poisson;

G = modulo di deformazione di taglio;

Ed = modulo di compressibilità edometrica;

 SIDERCER [®] <small>S.r.l.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

E = modulo di Young;

E_v = modulo di compressibilità volumetrica.

In ottemperanza alle “Nuove Norme Tecniche per la Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018” la classificazione del sito può essere ottenuta sulla base del valore “V_{s, eq}” (velocità media equivalente delle onde di taglio con substrato rigido presente entro i primi 30,0m), o “V_{s 30}” (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m con substrato rigido > di 30,0m di profondità) utilizzando la seguente espressione:

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

dove:

h_i=spessore dell’i-esimo strato;

V_{s,i}=velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;

N=numero strati;

H=profondità del substrato rigido (Bed Rock) < d 30,0 m caratterizzato da velocità non inferiore a 800,00 m/s; o H =30,0 m nel caso in cui il substrato rigido sia a profondità maggiori di 30,0 m.

Da quanto sopra esposto, si è calcolato a partire da - 0,0 m dal piano di campagna, un valore di velocità di V_{s eq} = 494,49 m/s, per un totale di n°5 strati presenti nel “modello sismostratigrafico” ottenuti mediante il “Metodo diretto”. Tale modello sismostratigrafico è stato discretizzato mediante il fitting tra la curva di calcolo e quella sperimentale di campagna, ovvero le “Dromocrone”. Ogni variazione di pendenza di tale curva, indica un cambiamento di propagazione di velocità delle onde di volume, che può essere attribuito ad una variazione dello stato di addensamento dei materiali e/o ad un cambio litologico.

Si riporta infine una stima dell’andamento in profondità dei parametri geotecnici ottenuti applicando il metodo intervallo.

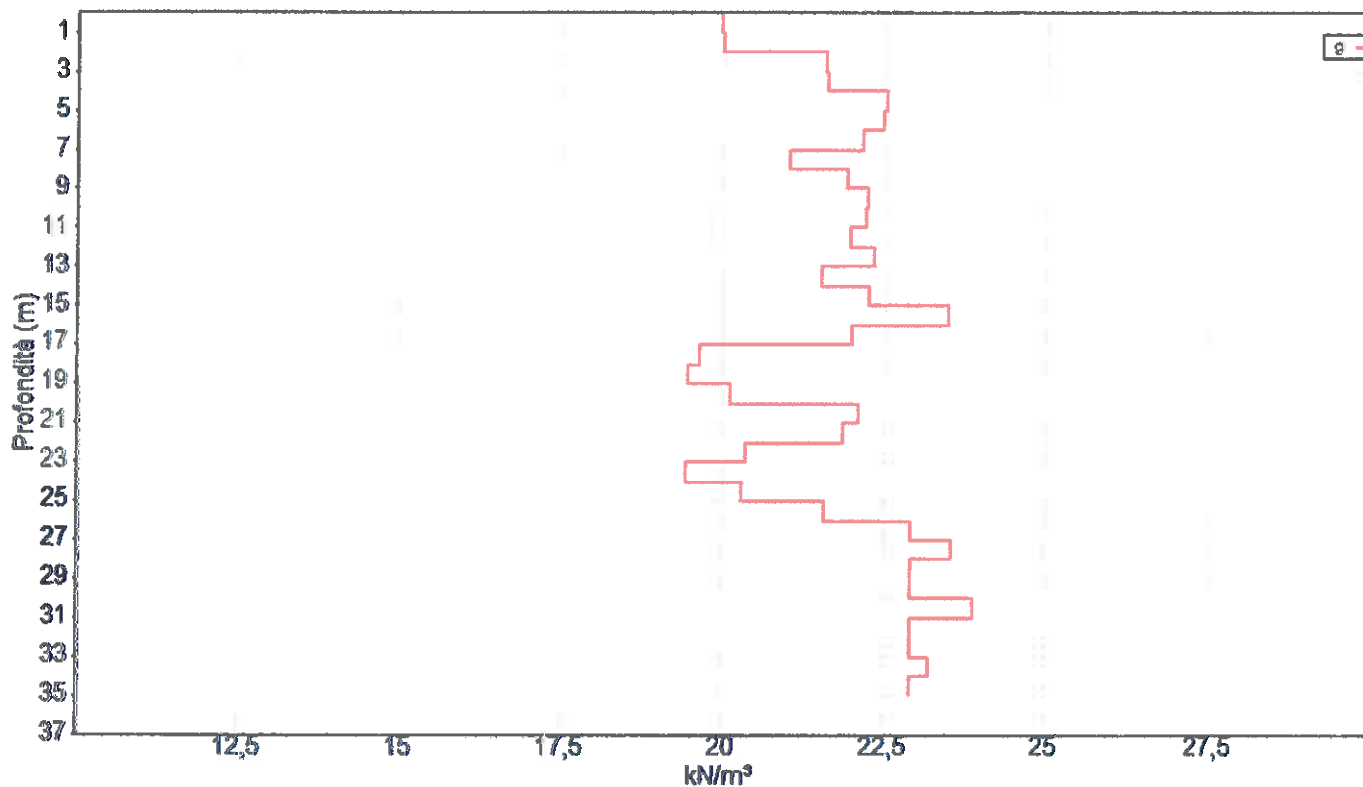


Fig.6 Andamento in profondità del peso di volume

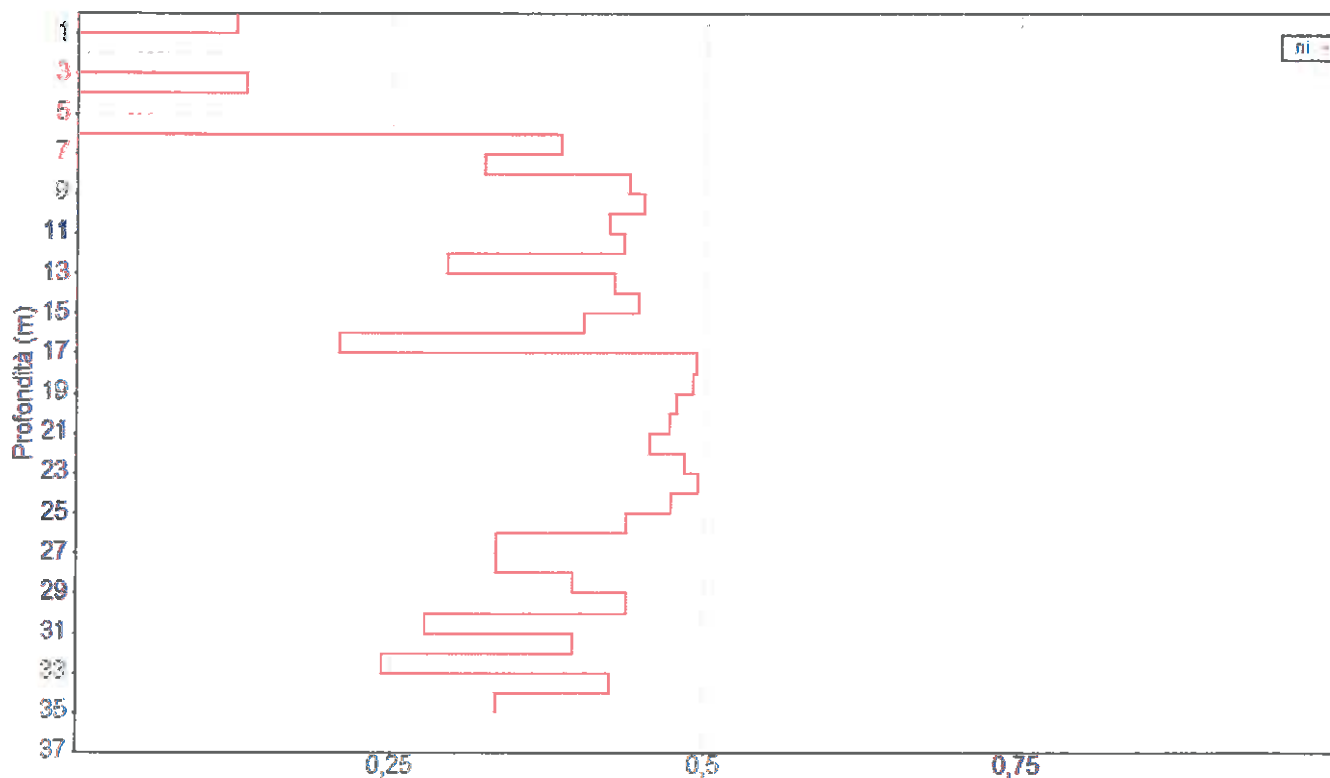


Fig.7 Andamento in profondità del Coefficiente di Poisson

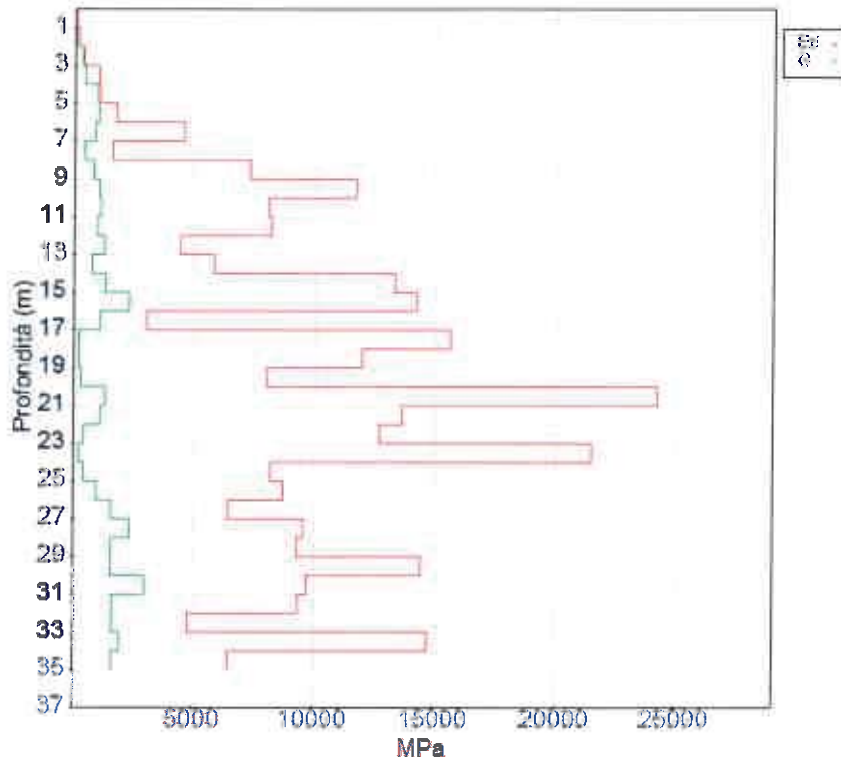


Fig. 8 Andamento in profondità del modulo di taglio G e del modulo edometrico Ed

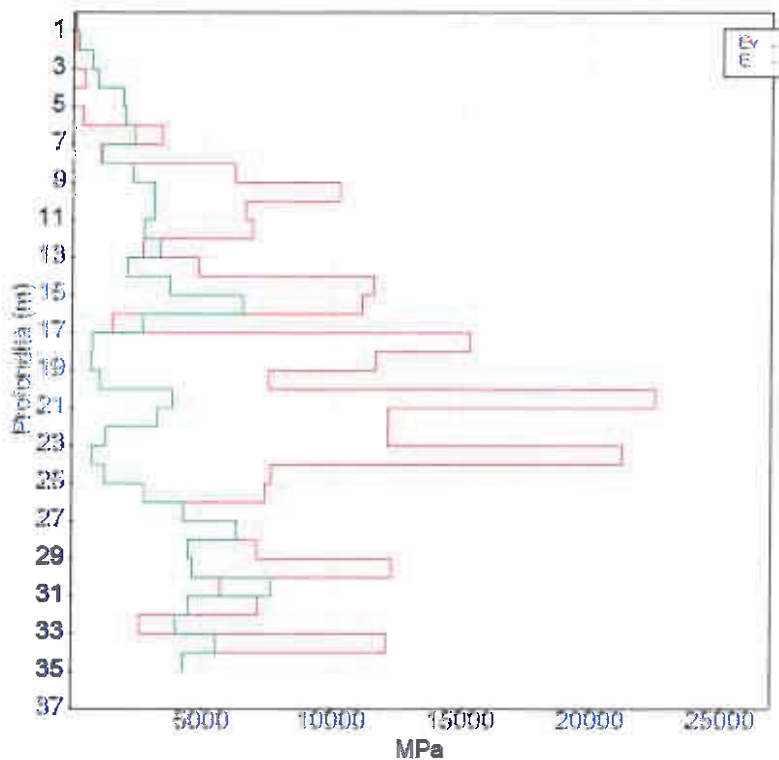


Fig. 9 Andamento in profondità del modulo di Young E e del modulo di compressibilità Ev

 SIDERCER [®] <small>S.p.A.</small> <small>ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 323 del 04/10/2021
		Certificato	C-GFS-C 514 del 18/10/2021
		Data prova	04/10/2021

4. CONCLUSIONI

La risultanza della prova Down-Hole, mediante il calcolo dei valori di velocità delle onde longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) e dei relativi parametri geotecnici, ha permesso di caratterizzare e quantificare l'aspetto sismico dei terreni oggetto di studio. Dalla interpretazione della prova sismica in foro con metodo diretto è emerso un modello a n°5 sismostrati, dove è stata eseguita una caratterizzazione geofisica delle principali caratteristiche fisiche, quali la velocità di attraversamento delle onde P ed S con i relativi valori dei moduli elastici dinamici riferiti a terreni soggetti a sollecitazioni di tipo sismico. Inoltre, sono stati stimati i parametri geotecnici medi applicando il metodo pseudo-intervallo, e cioè per orizzonti aventi spessore di 1,0 m a partire dal piano di campagna, fino alla profondità di fine sondaggio.

In osservanza al Nuovo NTC di cui al D.M. del 17 Gennaio 2018, ai fini dell'azione sismica di progetto, la stima del valore del V_s eq, relativamente all'area in studio, risulta essere di **494,49 m/s**, calcolato da - 0,0 metri dal piano di campagna, ne consegue che la categoria di suolo attribuibile al settore in studio risulta essere la "B" e cioè *"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s"* così come previsto dalla normativa sopra menzionata.

Documentazione fotografica



Foto 1 - Immagine di repertorio - esecuzione prova Down-hole

 SIDERCEM [®] <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

Rapporto sulla indagine geofisica Down-Hole

1.0 PREMESSA

E' stata eseguita n.1 misura di tipo Down-Hole a supporto delle indagini riguardo i "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'".

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018. Nel particolare si hanno le seguenti caratteristiche per le indagini svolte:

DH	Lunghezza sondaggio [m]	Offset battute [m]	Interdistanza letture [m]	Sampling Interval [msec]	Recording time [s]
SE264_Gd	35,00	2	1,00	0,128	0,20

Si riporta di seguito l'ubicazione dell'indagine geofisica effettuata (Fig.1)



Fig.1 - Ubicazione dell'indagine geofisica effettuata

 SIDERCER [®] <small>s.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

Lo scopo di tali prove consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti (VP, VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Questa metodologia, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché si misurano i tempi d'arrivo delle onde elastiche lungo la profondità del foro è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito della successione dei litotipi incontrati nella perforazione.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata consiste in un geofono da pozzo 3D Twin Borehole Geophone della 'Ambrogeo', composto da tre sensori disposti ortogonalmente tra loro per registrare le 3 componenti (una verticale e due orizzontali) e dotato di un sistema d'ancoraggio pneumatico, e un sismografo digitale della "Ambrogeo" con memoria incrementale a 24 bit.

Le caratteristiche tecniche del sistema sono:

- capacità di campionamento dei segnali da 0.032 msec a 0.956 msec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" tramite starter collegato al circuito trigger del sismografo;
- Filtri High Pass e Band Reject;
- Automatic Gain Control;
- Acquisizione dati ad incremento di segnale;
- Convertitore A/D a 24 bit;

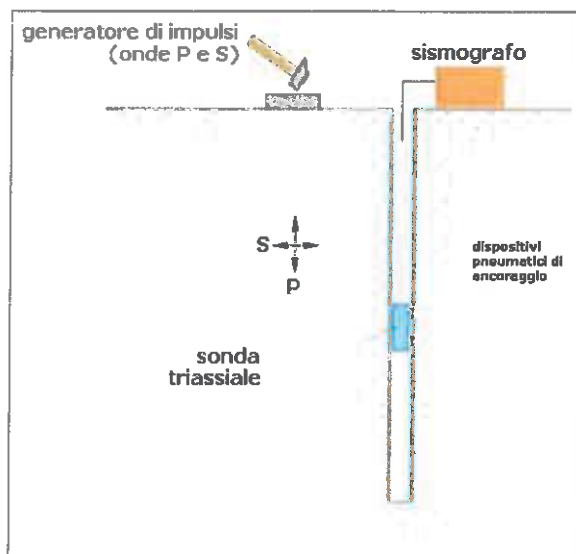


Fig.2 Schema di acquisizione indagine Down-Hole

 <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr. C.C.L.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

L'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante massa battente, così come rappresentato in figura 2. Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una trave massiccia, posizionata ad una distanza di 1,5 metri dall'asse del foro, in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione.

Le misure sono state eseguite inserendo il geofono tridimensionale all'interno del foro del sondaggio geognostico a c.c. opportunamente attrezzato, rivestito adeguatamente con un tubo PVC, mentre è stato cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo di rivestimento, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione.

Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione il geofono è stato reso solidale alle pareti del foro, mediante dei pistoni ad estrazione pneumatica.

I dati sono stati acquisiti dal piano campagna fino ad una profondità di 30 metri, con intervalli di un metro, utilizzando la seguente procedura:

- Ancoraggio della sonda triassiale, energizzazione verticale ed acquisizione della traccia sismica relativa alle onde P.
- Energizzazione orizzontale ed acquisizione delle tracce sismiche relative alle onde S.
- Memorizzazione dei dati, sblocco dell'ancoraggio della sonda triassiale e passaggio all'acquisizione successiva.

I dati acquisiti sono stati visualizzati in tempo reale per un controllo preventivo della bontà dell'acquisizione.

Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{corr} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico t_{corr} - z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo solo

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

un'apparente migliore definizione del profilo di velocità. Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti e la velocità intervallo delle onde P e S con la formula seguente:

$$v_{p,s} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2corr} - t_{1corr}}$$

Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano. In tali condizioni ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici e vale a dire: omogeneità, isotropia e continuità.

Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

nella quale:

σ = sforzo applicata;

ε = deformazione prodotta;


K = coefficiente di proporzionalità

K, è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti (costanti elastiche dei mezzi).

Le deformazioni e le tensioni generate da un impulso sismico rispondono ai requisiti visti prima: sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi, come già detto, i terreni e le rocce attraversate da onde sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico.

Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza biunivoca con le fasi P e S dell'input sismico.

Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati. Tali parametri esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando sottoposto ad uno sforzo e sono:

 <small>S.R.L.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

E (modulo di Young) esprime la resistenza alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o di compressione;

v (Coefficiente di Poisson) indica la misura del cambiamento geometrico in forma di un corpo elastico;

G (modulo di taglio) dà una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo tangenziale ed esprime quindi la capacità del materiale a resistere cambiando di forma e non di volume;

K (modulo di compressibilità volumetrica) misura il rapporto sforzo-deformazione ed indica la resistenza di un corpo alle variazioni di volume.

3.1 RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

Le tracce acquisite sono state elaborate con il software Downhole della Geostru (picking primo arrivo onde P ed S, calcolo dromocrone, interpretazione e modello di velocità) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s). Si riportano di seguito le tracce registrate durante l'esecuzione della prova con il relativo picking delle onde P (fig.3) ed S (fig.4).

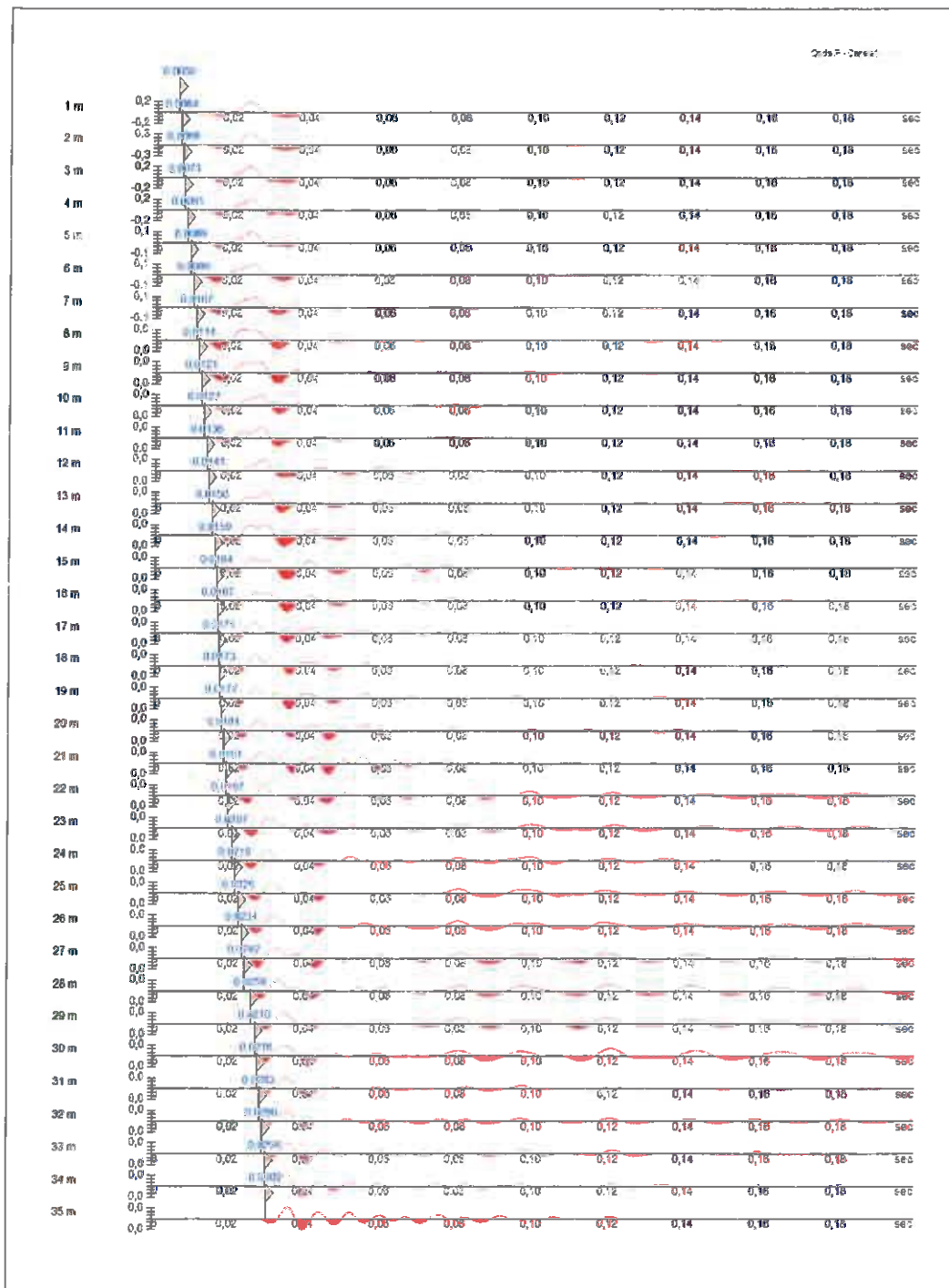


Fig.3 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde P

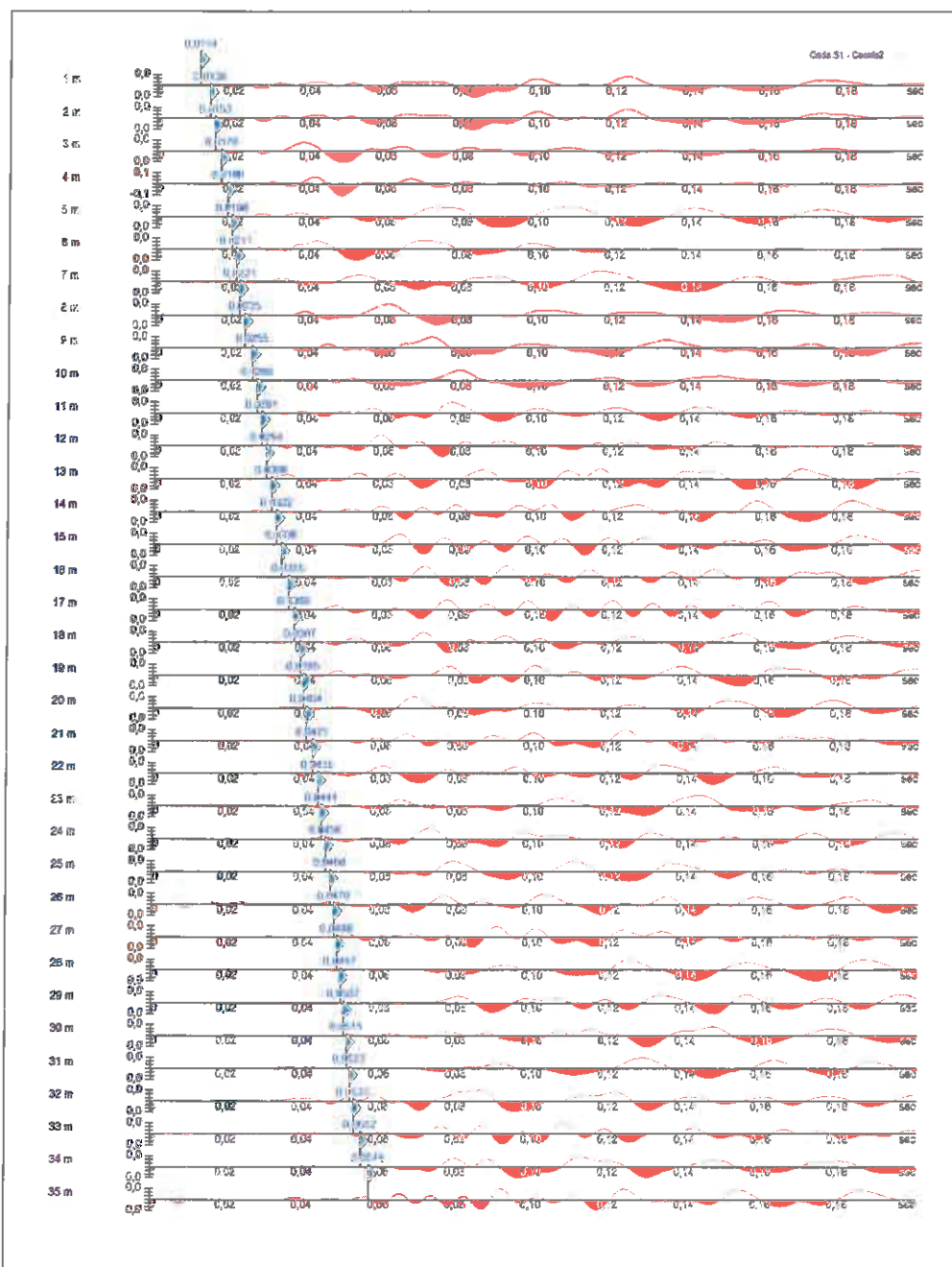


Fig.4 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde S

Dai tempi di arrivo sperimentali ottenuti dal picking dei primi arrivi, sono stati calcolati i tempi corretti (tab.1).

SR [m]	Tpcorr [msec]	Tscorr [msec]
1,8028	3,2173	6,3236
2,5000	5,1200	11,1200
3,3541	6,1715	13,4164
4,2720	6,9288	14,6067
5,2202	7,7584	16,8577
6,1847	8,6343	18,2387
7,1589	9,2891	19,2627
8,1394	10,5167	21,7215
9,1241	11,2449	23,1803
10,1119	11,9661	25,2179
11,1018	12,5835	26,6533
12,0934	12,8996	27,8830
13,0863	13,7090	29,2062
14,0801	14,5169	30,6247
15,0748	15,4231	32,0402
16,0702	16,3284	33,4533
17,0661	16,6354	35,3626
18,0624	17,0409	36,7725
19,0591	17,2463	38,5800
20,0562	17,6504	39,3894
21,0535	18,1538	40,2973
22,0511	19,0558	42,0025
23,0489	19,8578	43,4078
24,0468	20,4601	44,3135
25,0450	21,1619	45,5181
26,0432	21,8636	46,7223
27,0416	22,4654	47,8263
28,0402	23,0669	48,7301
29,0388	24,2676	49,6337
30,0375	24,8689	51,2360
31,0363	25,5701	52,4387
32,0351	25,9715	53,2415
33,0341	26,4727	54,2440
34,0331	26,9738	55,1464
35,0321	27,5747	56,3483

Tabella 1 Risultati della distanza tra sorgente-ricevitore (SR), tempi corretti delle onde p (Tpcorr) e delle onde S (Tscorr)

Per l'interpretazione della prova è stato applicato il metodo diretto, ricavando dai dati in tabella 1 il grafico $t_{corr} - z$ (fig.5) in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

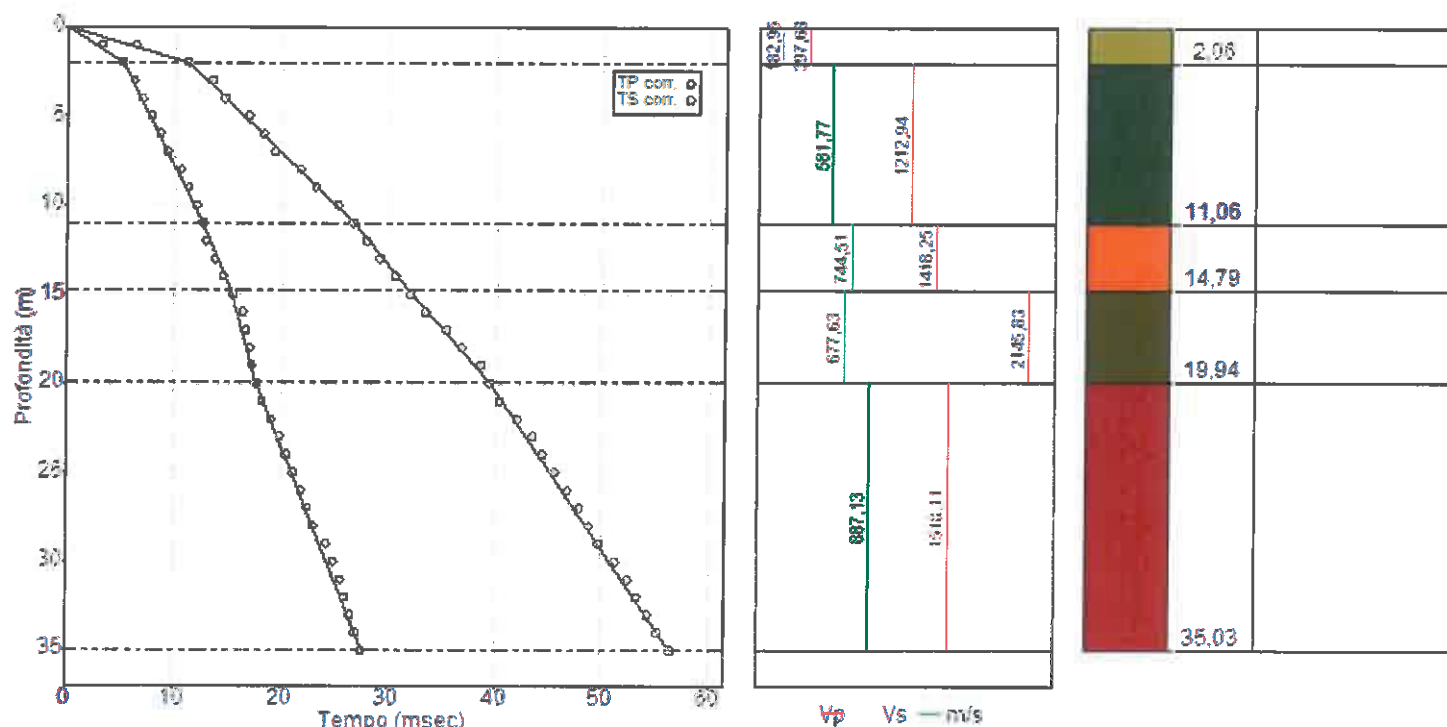


Fig.5 Dromocrone tempi corretti-profondità, profilo di velocità e colonna sismostratigrafica ricavate con metodo diretto

Il risultato dell'interpretazione ha restituito un modello a n.5 sismostrati avente le seguenti caratteristiche in termini di velocità media delle onde P ed S e di stima dei parametri geotecnici medi (Tab.2):

Sismostrato	Profondità [m]	Vp medio [m/s]	Vs medio [m/s]	g medio [kN/mc]	ni medio	G medio [MPa]	Ed medio [MPa]	E medio [MPa]	Ev medio [MPa]
1	2,06	397,68	182,95	19,01	0,37	64,87	306,51	177,19	220,02
2	11,06	1212,94	581,77	21,75	0,35	750,83	3263,71	2028,14	2262,61
3	14,79	1418,25	744,51	22,96	0,31	1297,91	4709,87	3400	2979,32
4	19,94	2145,83	677,63	22,53	0,44	1055,13	10580,6	3048,51	9173,76
5	35,03	1518,11	887,13	23,13	0,24	1856,03	5435,27	4605,64	2960,56

Tabella 2 Valori medi dei moduli geotecnici e delle velocità delle onde sismiche all'interno dei sismostrati identificati

Dove:

g = peso di volume;

ni= Coefficiente di Poisson;

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

G = modulo di deformazione di taglio;

Ed = modulo di compressibilità edometrica;

E = modulo di Young;

Ev = modulo di compressibilità volumetrica.

In ottemperanza alle “Nuove Norme Tecniche per la Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018” la classificazione del sito può essere ottenuta sulla base del valore “Vs, eq” (velocità media equivalente delle onde di taglio con substrato rigido presente entro i primi 30,0m), o “Vs 30” (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m con substrato rigido > di 30,0m di profondità) utilizzando la seguente espressione:

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

dove:

hi=spessore dell’i-esimo strato;

Vs,i=velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;

N=numero strati;

H=profondità del substrato rigido (Bed Rock) < d 30,0 m caratterizzato da velocità non inferiore a 800,00 m/s; o H =30,0 m nel caso in cui il substrato rigido sia a profondità maggiori di 30,0 m.

Da quanto sopra esposto, si è calcolato a partire da - 0,0 m dal piano di campagna, un valore di velocità di Vs eq = 591,95 m/s, per un totale di n°5 strati presenti nel “modello sismostratigrafico” ottenuti mediante il “Metodo diretto”. Tale modello sismostratigrafico è stato discretizzato mediante il fitting tra la curva di calcolo e quella sperimentale di campagna, ovvero le “Dromocrone”. Ogni variazione di pendenza di tale curva, indica un cambiamento di propagazione di velocità delle onde di volume, che può essere attribuito ad una variazione dello stato di addensamento dei materiali e/o ad un cambio litologico. Si riporta infine una stima dell’andamento in profondità dei parametri geotecnici ottenuti applicando il metodo intervallo.

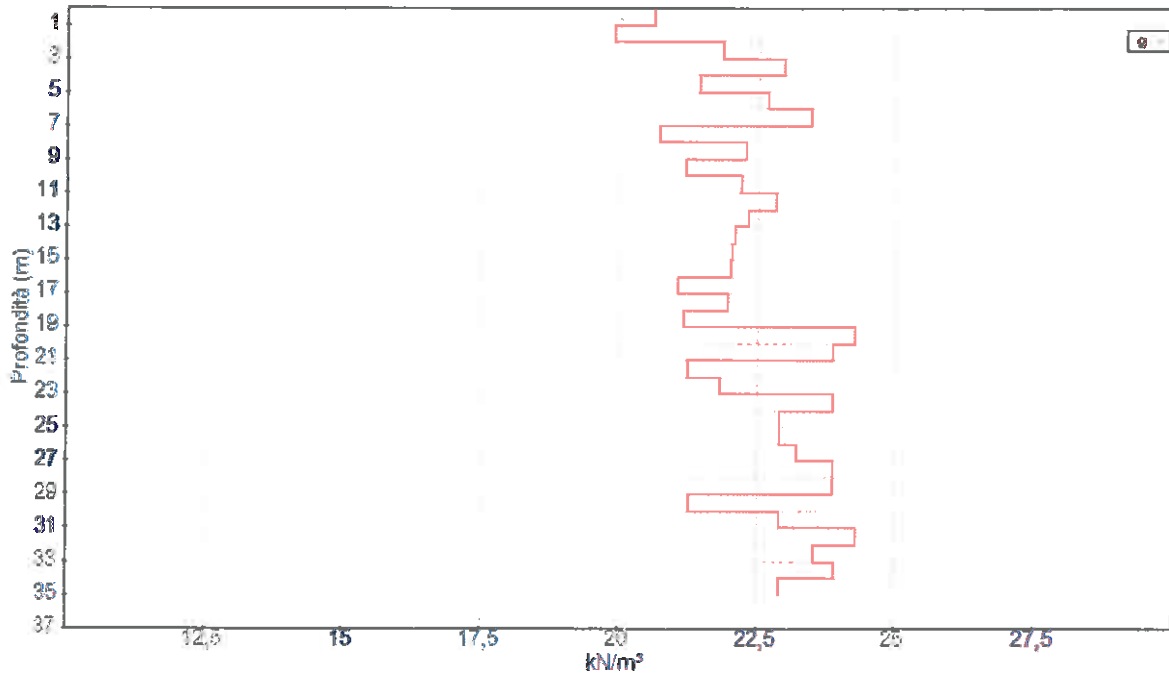


Fig.6 Andamento in profondità del peso di volume

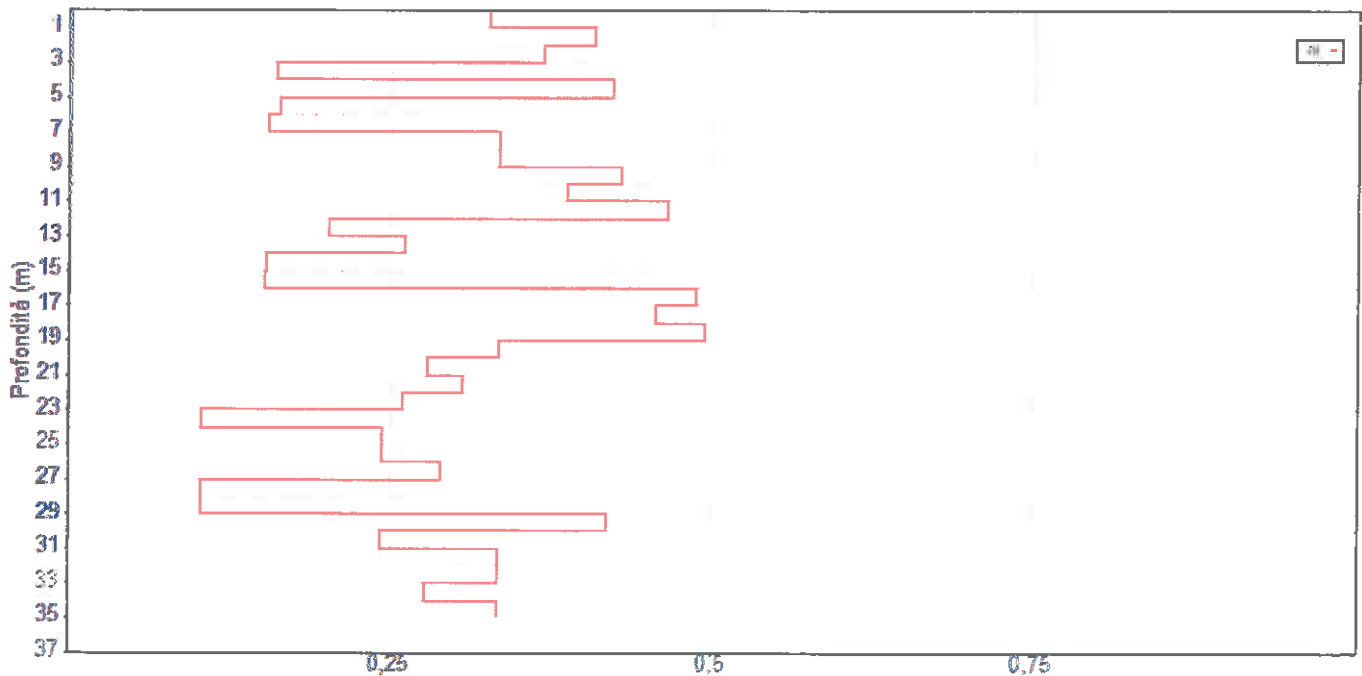


Fig.7 Andamento in profondità del Coefficiente di Poisson



Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
Data prova	31/08/2021

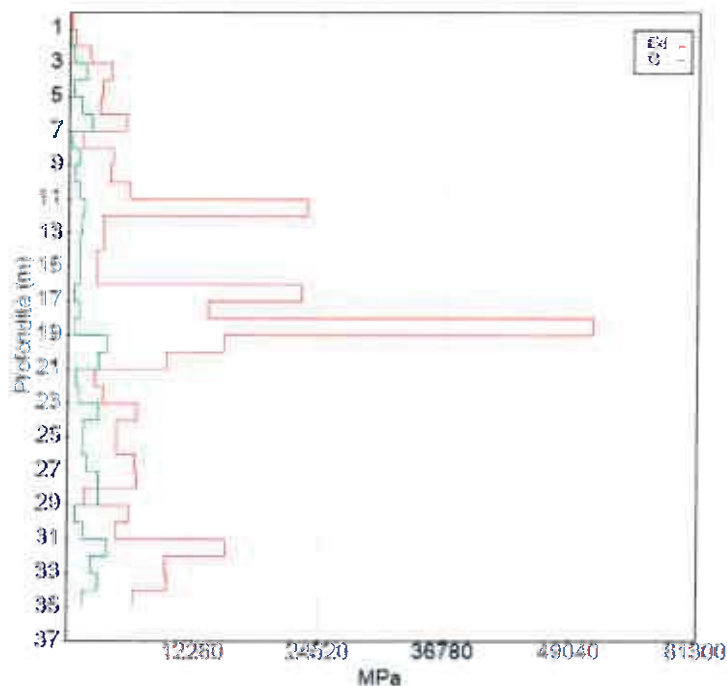


Fig.8 Andamento in profondità del modulo di taglio G e del modulo edometrico Ed

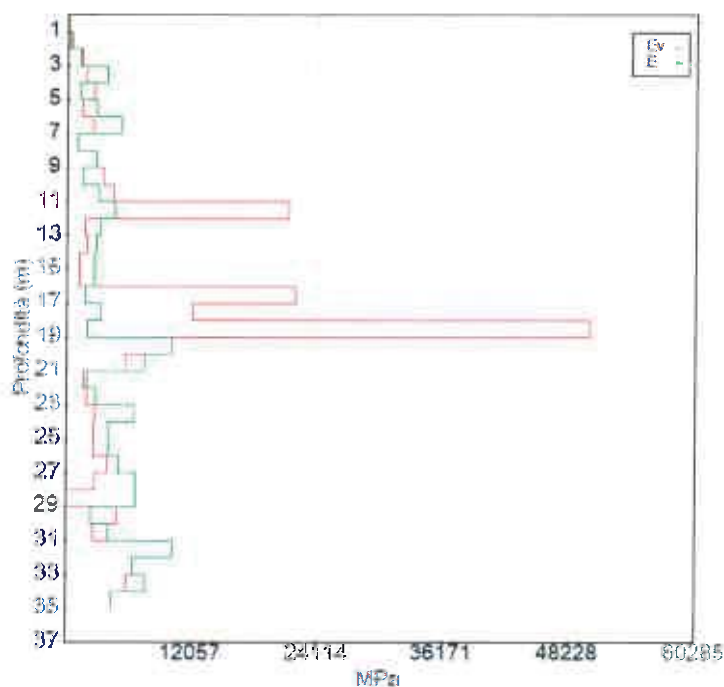


Fig.9 Andamento in profondità del modulo di Young E e del modulo di compressibilità Ev

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 320 del 21/09/2021
		Certificato	C-GFS-C 451 del 22/09/2021
		Data prova	31/08/2021

4. CONCLUSIONI

La risultanza della prova Down-Hole, mediante il calcolo dei valori di velocità delle onde longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) e dei relativi parametri geotecnici, ha permesso di caratterizzare e quantificare l'aspetto sismico dei terreni oggetto di studio. Dalla interpretazione della prova sismica in foro con metodo diretto è emerso un modello a n°5 sismostrati, dove è stata eseguita una caratterizzazione geofisica delle principali caratteristiche fisiche, quali la velocità di attraversamento delle onde P ed S con i relativi valori dei moduli elastici dinamici riferiti a terreni soggetti a sollecitazioni di tipo sismico. Inoltre, sono stati stimati i parametri geotecnici medi applicando il metodo pseudo-intervallo, e cioè per orizzonti aventi spessore di 1,0 m a partire dal piano di campagna, fino alla profondità di fine sondaggio.

In osservanza al Nuovo NTC di cui al D.M. del 17 Gennaio 2018, ai fini dell'azione sismica di progetto, la stima del valore del V_s eq. risulta essere di **591,95 m/s**, calcolato da 0,0 metri dal piano di campagna, ne consegue che la categoria di suolo attribuibile al settore in studio risulta essere la "B" e cioè *"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s"* così come previsto dalla normativa sopra menzionata.

Documentazione fotografica



Foto 1 - Esecuzione della prova geofisica Down-Hole

Rapporto sulla indagine geofisica Down-Hole

1.0 PREMESSA

E' stata eseguita n.1 misura di tipo Down-Hole a supporto delle indagini riguardo i "Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'".

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018. Nel particolare si hanno le seguenti caratteristiche per le indagini svolte:

DH	Lunghezza sondaggio [m]	Offset battute [m]	Interdistanza letture [m]	Sampling Interval [msec]	Recording time [s]
SE266_Gd	40,00	2	1,00	0,128	0,20

Si riporta di seguito l'ubicazione dell'indagine geofisica effettuata (Fig.1)



Fig.1 - Ubicazione dell'indagine geofisica effettuata

 <small>S.r.l. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.L.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

2.0 DESCRIZIONE E FINALITA' DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

Lo scopo di tali prove consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti (VP, VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Questa metodologia, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché si misurano i tempi d'arrivo delle onde elastiche lungo la profondità del foro è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito della successione dei litotipi incontrati nella perforazione.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata consiste in un geofono da pozzo 3D Twin Borehole Geophone della 'Ambrogeo', composto da tre sensori disposti ortogonalmente tra loro per registrare le 3 componenti (una verticale e due orizzontali) e dotato di un sistema d'ancoraggio pneumatico, e un sismografo digitale della "Ambrogeo" con memoria incrementale a 24 bit.

Le caratteristiche tecniche del sistema sono:

- capacità di campionamento dei segnali da 0.032 msec a 0.956 msec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" tramite starter collegato al circuito trigger del sismografo;
- Filtri High Pass e Band Reject;
- Automatic Gain Control;
- Acquisizione dati ad incremento di segnale;
- Convertitore A/D a 24 bit;

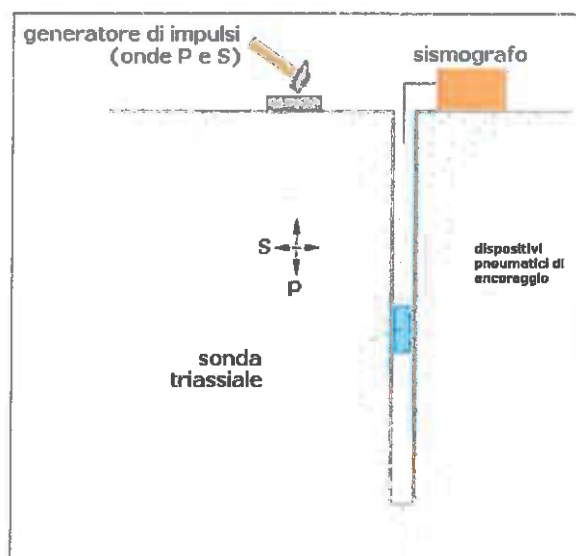


Fig.2 Schema di acquisizione indagine Down-Hole

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv.</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

L'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante massa battente, così come rappresentato in figura 2. Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una trave massiccia, posizionata ad una distanza di 1,5 metri dall'asse del foro, in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione. Le misure sono state eseguite inserendo il geofono tridimensionale all'interno del foro del sondaggio geognostico a c.c. opportunamente attrezzato, rivestito adeguatamente con un tubo PVC, mentre è stato cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo di rivestimento, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione.

Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione il geofono è stato reso solidale alle pareti del foro, mediante dei pistoni ad estrazione pneumatica.

I dati sono stati acquisiti dal piano campagna fino ad una profondità di 30 metri, con intervalli di un metro, utilizzando la seguente procedura:

- Ancoraggio della sonda triassiale, energizzazione verticale ed acquisizione della traccia sismica relativa alle onde P.
- Energizzazione orizzontale ed acquisizione delle tracce sismiche relative alle onde S.
- Memorizzazione dei dati, sblocco dell'ancoraggio della sonda triassiale e passaggio all'acquisizione successiva.

I dati acquisiti sono stati visualizzati in tempo reale per un controllo preventivo della bontà dell'acquisizione.

Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$t_{\text{corr}} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico t_{corr} - z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo solo

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 I.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

un'apparente migliore definizione del profilo di velocità. Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti e la velocità intervallo delle onde P e S con la formula seguente:

$$v_{p,s} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2corr} - t_{1corr}}$$

Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano. In tali condizioni ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici e vale a dire: omogeneità, isotropia e continuità.

Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

nella quale:

σ = sforzo applicata;

ε = deformazione prodotta;

K = coefficiente di proporzionalità

K, è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti (costanti elastiche dei mezzi).

Le deformazioni e le tensioni generate da un impulso sismico rispondono ai requisiti visti prima: sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi, come già detto, i terreni e le rocce attraversate da onde sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico.

Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza biunivoca con le fasi P e S dell'input sismico.

Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati. Tali parametri esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando sottoposto ad uno sforzo e sono:

 SIDERCER [®] <small>S.r.l.</small> ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

E (modulo di Young) esprime la resistenza alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o di compressione;

v (Coefficiente di Poisson) indica la misura del cambiamento geometrico in forma di un corpo elastico;

G (modulo di taglio) dà una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo tangenziale ed esprime quindi la capacità del materiale a resistere cambiando di forma e non di volume;

K (modulo di compressibilità volumetrica) misura il rapporto sforzo-deformazione ed indica la resistenza di un corpo alle variazioni di volume.

3.1 RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

Le tracce acquisite sono state elaborate con il software Downhole della Geostru (picking primo arrivo onde P ed S, calcolo dromocrone, interpretazione e modello di velocità) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s). Si riportano di seguito le tracce registrate durante l'esecuzione della prova con il relativo picking delle onde P (fig.3) ed S (fig.4).

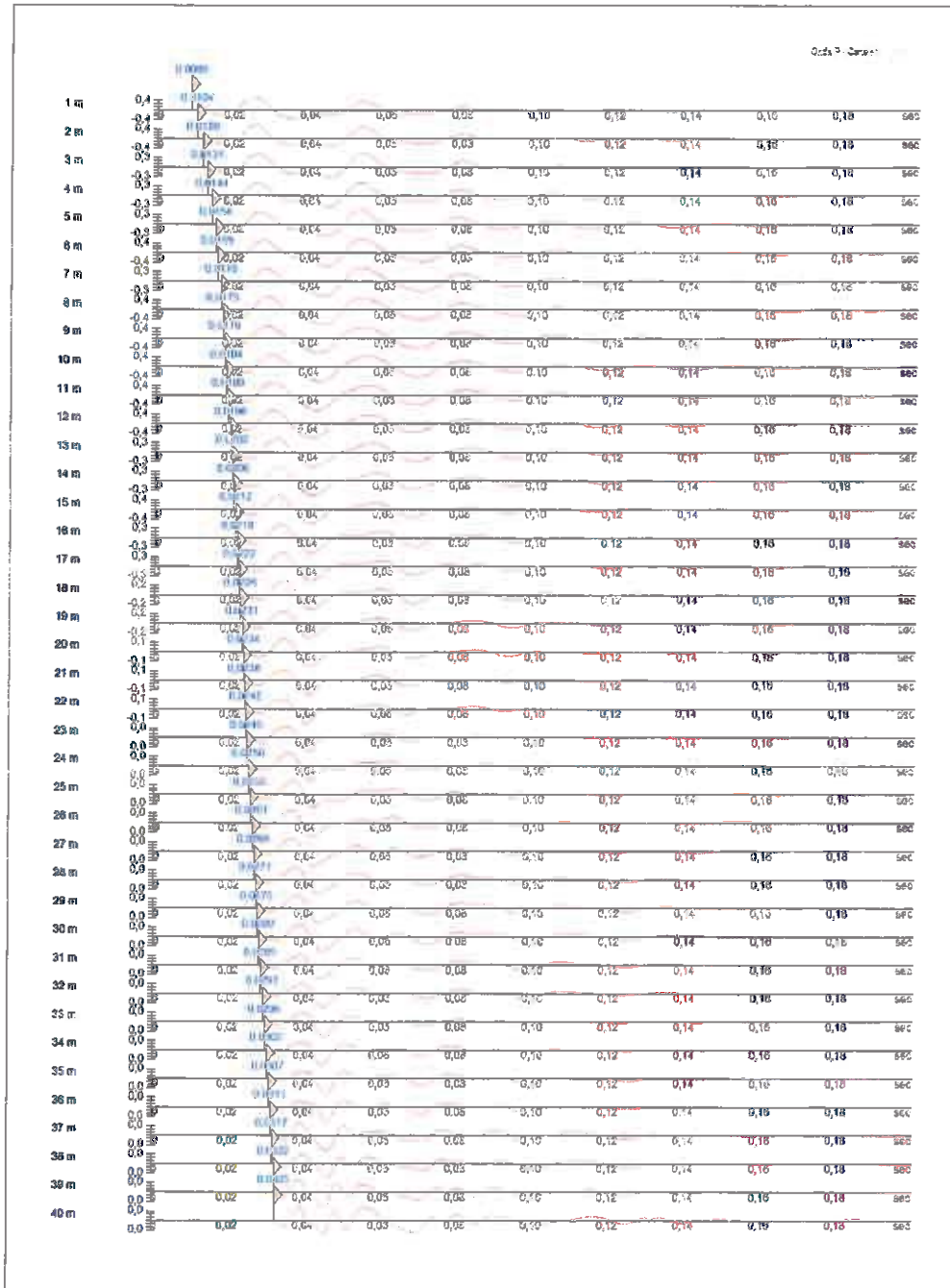


Fig.3 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde P

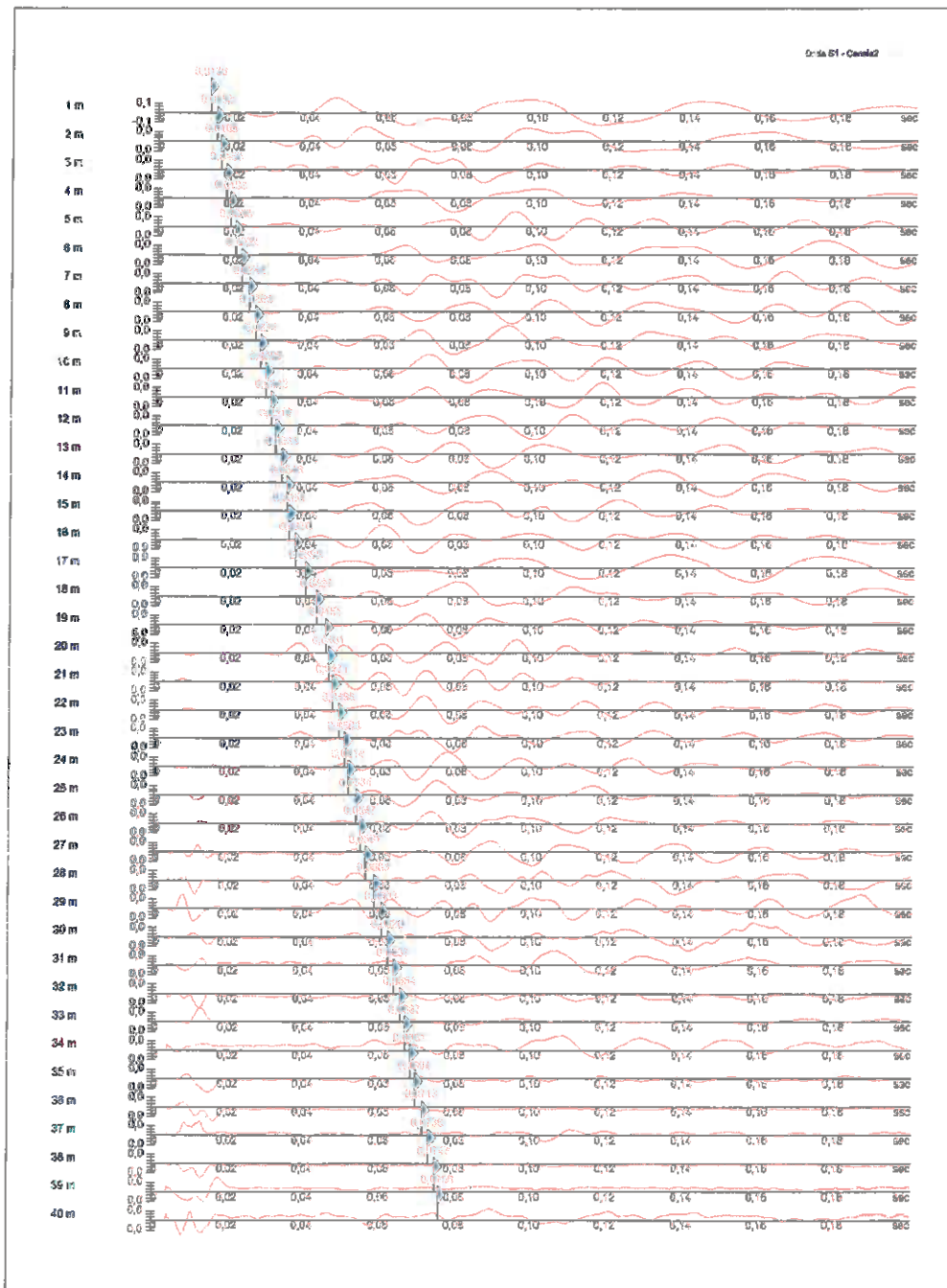


Fig.4 Tracce sismiche relative alla registrazione delle onde S

Dai tempi di arrivo sperimentali ottenuti dal picking dei primi arrivi, sono stati calcolati i tempi corretti (tab.1).

SR [m]	Tpcorr [msec]	Tscorr [msec]
1,8028	5,9908	6,9892
2,5000	9,0400	12,2400
3,3541	10,6437	14,7581
4,2720	11,7041	16,8539
5,2202	12,6433	18,3903
6,1847	13,5820	19,9849
7,1589	14,5693	21,7072
8,1394	15,8242	23,9821
9,1241	16,7687	25,6462
10,1119	17,7020	27,0969
11,1018	18,2313	28,5359
12,0934	18,7541	30,0660
13,0863	19,4708	31,3917
14,0801	20,0851	33,1105
15,0748	20,4978	34,4283
16,0702	21,0079	35,2455
17,0661	21,5164	36,8568
18,0624	22,1233	39,6625
19,0591	22,5299	42,5676
20,0562	23,0353	44,9737
21,0535	23,3405	45,9829
22,0511	23,7449	46,9909
23,0489	24,1487	48,6966
24,0468	24,4523	50,2021
25,0450	24,9551	51,3077
26,0432	25,4577	53,3114
27,0416	26,0598	54,6158
28,0402	26,5619	56,0197
29,0388	27,0638	58,2222
30,0375	27,4657	60,2248
31,0363	27,9673	61,9276
32,0351	28,4687	63,6301
33,0341	29,1699	65,3325
34,0331	29,5712	66,6352
35,0321	30,1723	68,0375
36,0312	30,6734	69,3398
37,0304	31,2743	71,2415
38,0296	31,6753	72,9432
39,0288	32,1762	74,6448
40,0281	32,4772	75,5469

Tabella 1 Risultati della distanza tra sorgente-ricevitore (SR), tempi corretti delle onde p (Tpcorr) e delle onde S (Tscorr)

Per l'interpretazione della prova è stato applicato il metodo diretto, ricavando dai dati in tabella 1 il grafico $t_{corr} - z$ (fig.5) in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

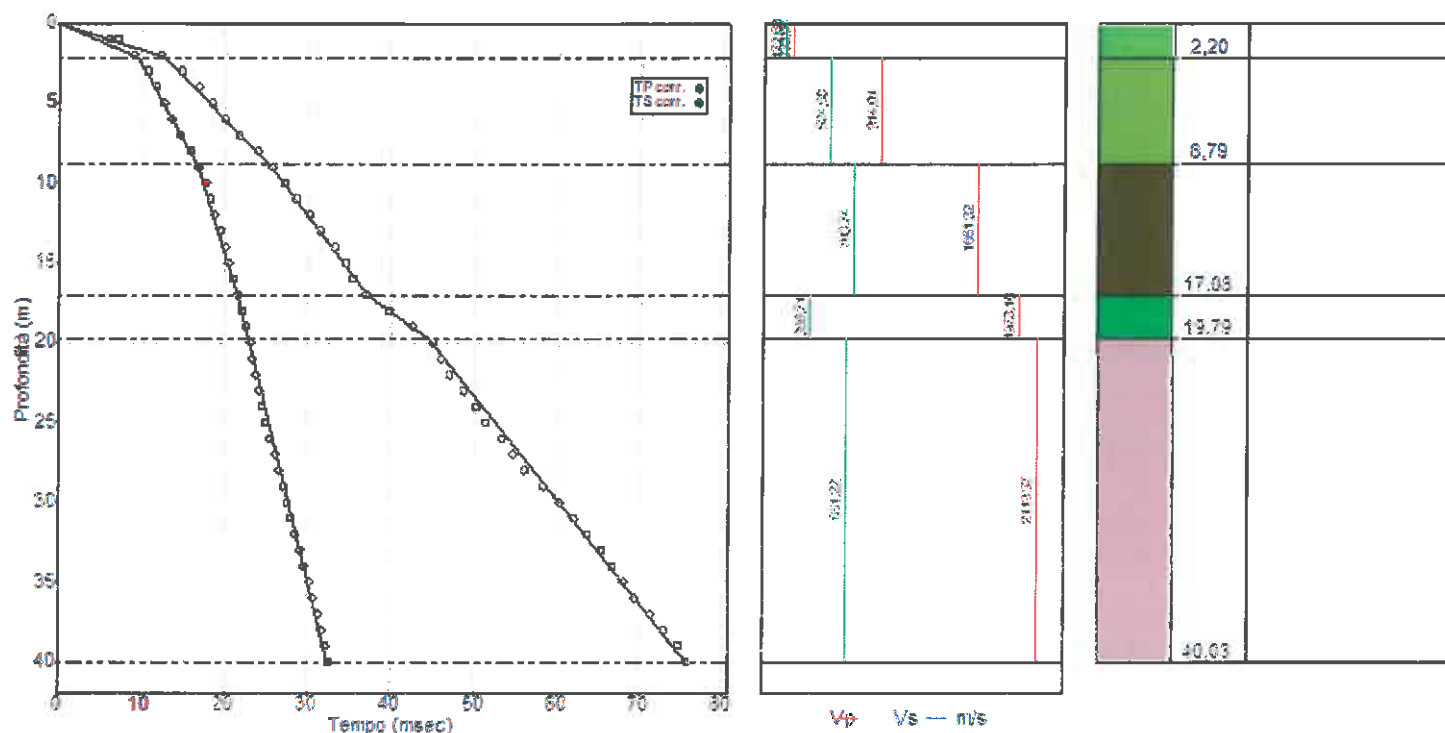


Fig.5 Dromocrone tempi corretti-profondità, profilo di velocità e colonna sismostratigrafica ricavate con metodo diretto

Il risultato dell'interpretazione ha restituito un modello a n.5 sismostrati avente le seguenti caratteristiche in termini di velocità media delle onde P ed S e di stima dei parametri geotecnici medi (Tab.2):

Sismostrato	Profondità [m]	Vp medio [m/s]	Vs medio [m/s]	g medio [kN/mc]	ni medio	G medio [MPa]	Ed medio [MPa]	E medio [MPa]	Ev medio [MPa]
1	2,20	235,04	172,68	18,7	--	56,86	105,35	--	29,53
2	8,79	914,01	524,68	21,65	0,25	607,72	1844,22	1524,47	1033,92
3	17,08	1661,32	703,74	22,35	0,39	1128,58	6289,6	3138,96	4784,82
4	19,79	1978,1	366,71	21,23	0,48	291,1	8470,26	862,95	8082,12
5	40,03	2119,37	651,22	21,62	0,45	934,77	9900,6	2706,86	8654,23

Tabella 2 Valori medi dei moduli geotecnici e delle velocità delle onde sismiche all'interno dei sismostrati identificati

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE</small> <small>C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 Lv</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

Dove:

g = peso di volume;

ni= Coefficiente di Poisson;

G = modulo di deformazione di taglio;

Ed = modulo di compressibilità edometrica;

E = modulo di Young;

Ev = modulo di compressibilità volumetrica.

In ottemperanza alle “Nuove Norme Tecniche per la Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018” la classificazione del sito può essere ottenuta sulla base del valore “Vs, eq” (velocità media equivalente delle onde di taglio con substrato rigido presente entro i primi 30,0m), o “Vs 30” (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m con substrato rigido > di 30,0m di profondità) utilizzando la seguente espressione:

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

dove:

hi=spessore dell’i-esimo strato;

Vs,i=velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;

N=numero strati;

H=profondità del substrato rigido (Bed Rock) < d 30,0 m caratterizzato da velocità non inferiore a 800,00 m/s; o H =30,0 m nel caso in cui il substrato rigido sia a profondità maggiori di 30,0 m.

Da quanto sopra esposto, si è calcolato a partire da - 0,0 m dal piano di campagna, un valore di velocità di Vs eq = 529,77 m/s, per un totale di n°5 strati presenti nel “modello sismostratigrafico” ottenuti mediante il “Metodo diretto”. Tale modello sismostratigrafico è stato discretizzato mediante il fitting tra la curva di calcolo e quella sperimentale di campagna, ovvero le “Dromocrone”. Ogni variazione di pendenza di tale curva, indica un cambiamento di propagazione di velocità delle onde di volume, che può essere attribuito ad una variazione dello stato di addensamento dei materiali e/o ad un cambio litologico. Si riporta infine una stima dell’andamento in profondità dei parametri geotecnici ottenuti applicando il metodo intervallo.

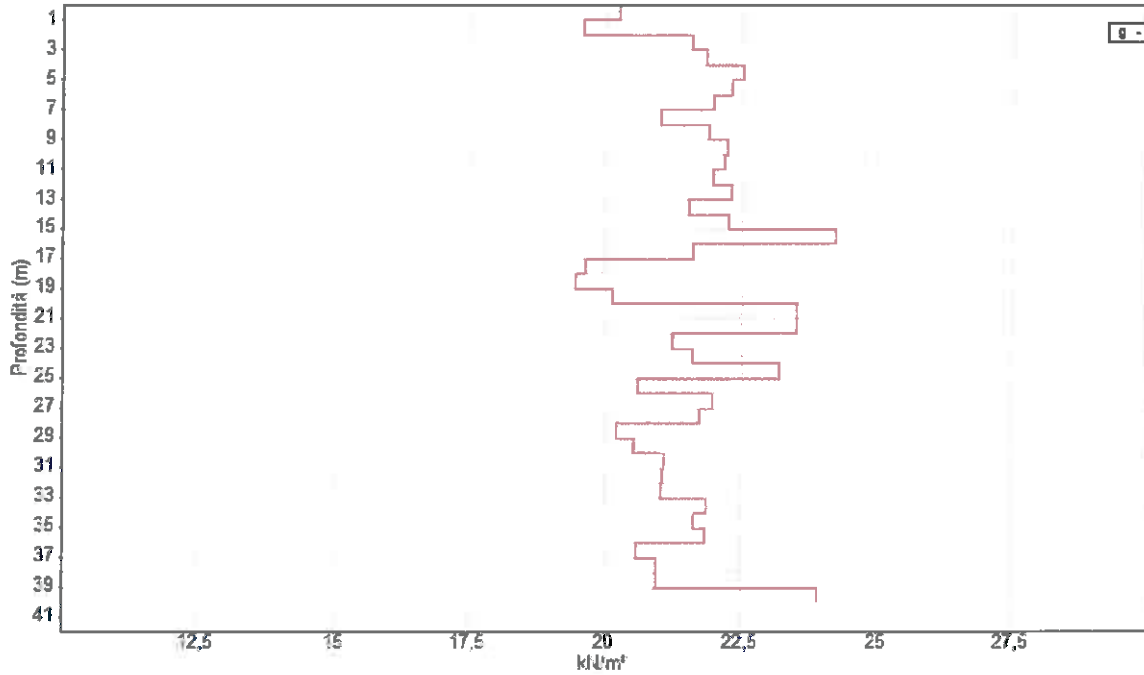


Fig.6 Andamento in profondità del peso di volume

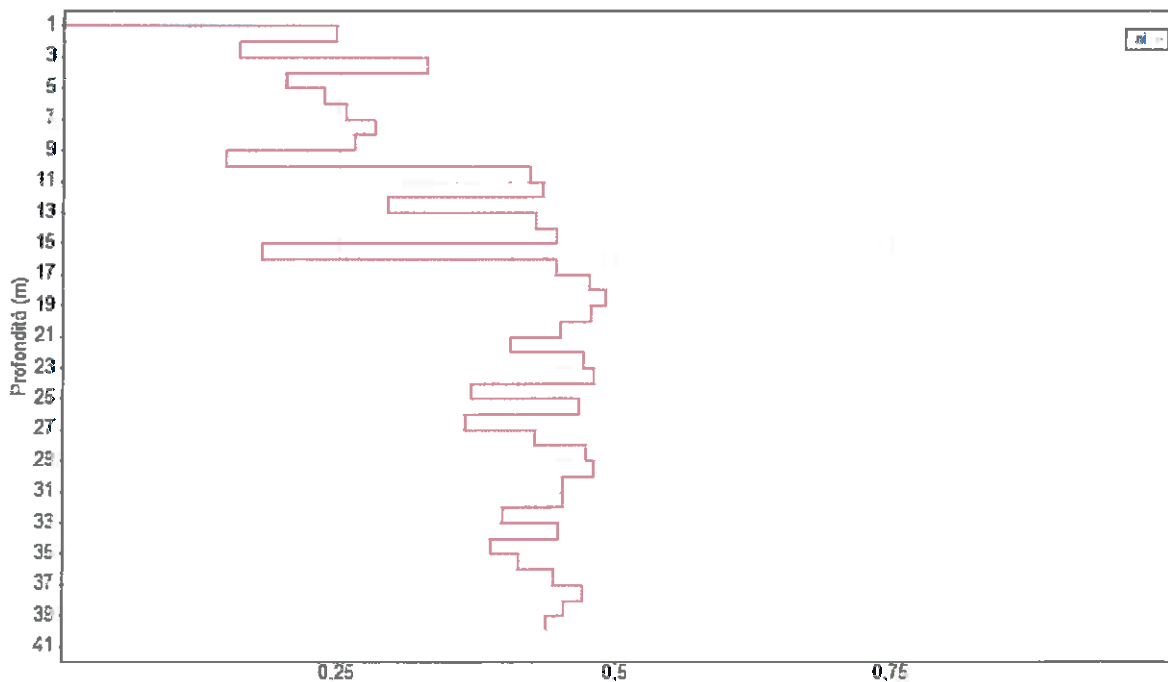


Fig.7 Andamento in profondità del Coefficiente di Poisson

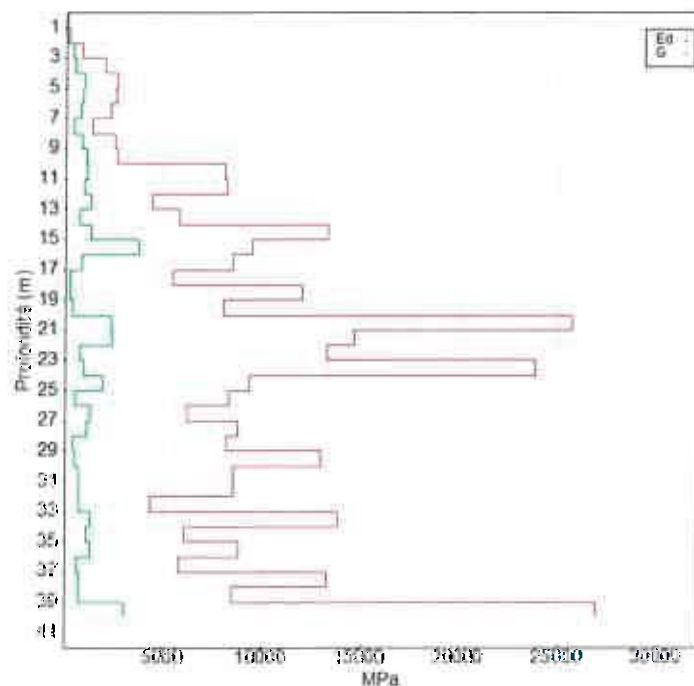


Fig.8 Andamento in profondità del modulo di taglio G e del modulo edometrico Ed

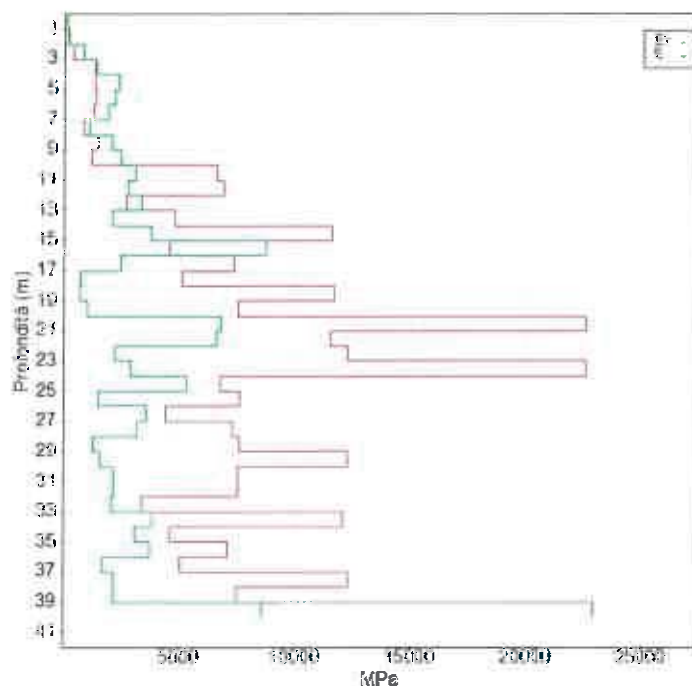


Fig.9 Andamento in profondità del modulo di Young E e del modulo di compressibilità Ev

 <small>S.R.L. ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE C.F. - Iscr.C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874</small> <small>P.I.V.A.: 01479620856 Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v</small>	<i>Timbro a secco</i>	Protocollo accettazione	C-GFS-A 307 del 13/08/2021
		Certificato	C-GFS-C 443 del 22/09/2021
		Data prova	11/08/2021

4. CONCLUSIONI

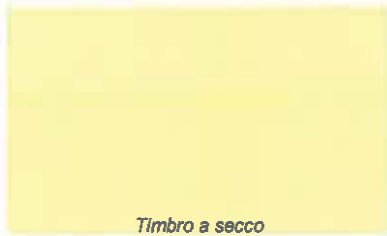
La risultanza della prova Down-Hole, mediante il calcolo dei valori di velocità delle onde longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) e dei relativi parametri geotecnici, ha permesso di caratterizzare e quantificare l'aspetto sismico dei terreni oggetto di studio. Dalla interpretazione della prova sismica in foro con metodo diretto è emerso un modello a n°5 sismostrati, dove è stata eseguita una caratterizzazione geofisica delle principali caratteristiche fisiche, quali la velocità di attraversamento delle onde P ed S con i relativi valori dei moduli elastici dinamici riferiti a terreni soggetti a sollecitazioni di tipo sismico. Inoltre, sono stati stimati i parametri geotecnici medi applicando il metodo pseudo-intervallo, e cioè per orizzonti aventi spessore di 1,0 m a partire dal piano di campagna, fino alla profondità di fine sondaggio.

In osservanza al Nuovo NTC di cui al D.M. del 17 Gennaio 2018, ai fini dell'azione sismica di progetto, la stima del valore del V_s eq. risulta essere di **529,77 m/s**, calcolato da **0,0 metri dal piano di campagna**, ne consegue che la categoria di suolo attribuibile al settore in studio risulta essere la **"B"** e cioè *"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s"* così come previsto dalla normativa sopra menzionata.

Documentazione fotografica




Foto 1 - Esecuzione della prova geofisica Down-Hole



AQ D.G. 26/18 - C.A. n° 1

Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'

Lotto 4

	A	Stratigrafie sondaggi geognostici				
	B	Stratigrafie pozzetti esplorativi				
	C	Indagini geofisiche: MASW				
	D	Indagini geofisiche: Down-hole				
	E	Indagini geofisiche: Cross-hole				
	F	Indagini geofisiche: tom. Sism. 2D				
	G	Rilievo masse ferrose				
	H	Monitoraggio inclinometrico				
	I	Monitoraggio piezometrico				
	L	Prove di laboratorio geotecnico				
	M	Analisi chimiche				
	N	Rilievi GPS				
	O	Prove di carico su piastra				
	Commessa	Rev.	Periodo di Indagine	Data Emissione	Redazione (RS)	Verifica (VRSQ)
526/1	0	Giugno-Ottobre 2021	05/10/2021	dott. geol. Marco Pirrone	dott. geol. Salvatore Motta	dott. ing. Vincenzo Arena



INDICE

1. Premessa	2
2. Descrizione e finalità della metodologia di indagine “Cross Hole”	7
2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d’esecuzione	7
2.2 Calcolo dei tempi d’arrivo	9
2.3 Elaborazione dati	9
2.4 Correlazione con i Moduli Elastici	17
3. Interpretazione della prova “Cross Hole”	18
3.1 Analisi dei risultati della prova “Cross Hole” e determinazione dei moduli elastici dinamici	18
4. Grafici di output	24
5. Considerazioni conclusive	58
6. Documentazione fotografica	59



1. Premessa

Su incarico di Anas S.p.A nell'ambito del Collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della S.S. 194 "Ragusana", la scrivente SIDERCEM s.r.l. - *Istituto di Ricerca e Sperimentazione*, ha provveduto ad effettuare n°7 indagini sismiche del tipo Cross Hole.

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018.

Di seguito vengono illustrate caratteristiche (v. *Tabella 1.0*) ed ubicazioni per le indagini svolte (v. *Figura 1.0.a-g*):

Cross Hole Lotto 4	Profondità (m)	Step Letture (m)	Distanza tra i fori (m)
CH 243-244	35,00	1,00	4,88
CH 246-247	35,00	1,00	4,30
CH 249-250	35,00	1,00	4,84
CH 252-253	35,00	1,00	4,82
CH 254-255	35,00	1,00	6,81
CH 260-261	35,00	1,00	9,00
CH 267-268	40,00	1,00	3,63

Tabella 1.0 Geometria e caratteristiche di acquisizione della prospezione sismica



Fig. 1.0.a Ubicazione indagine Cross Hole CH 243-244

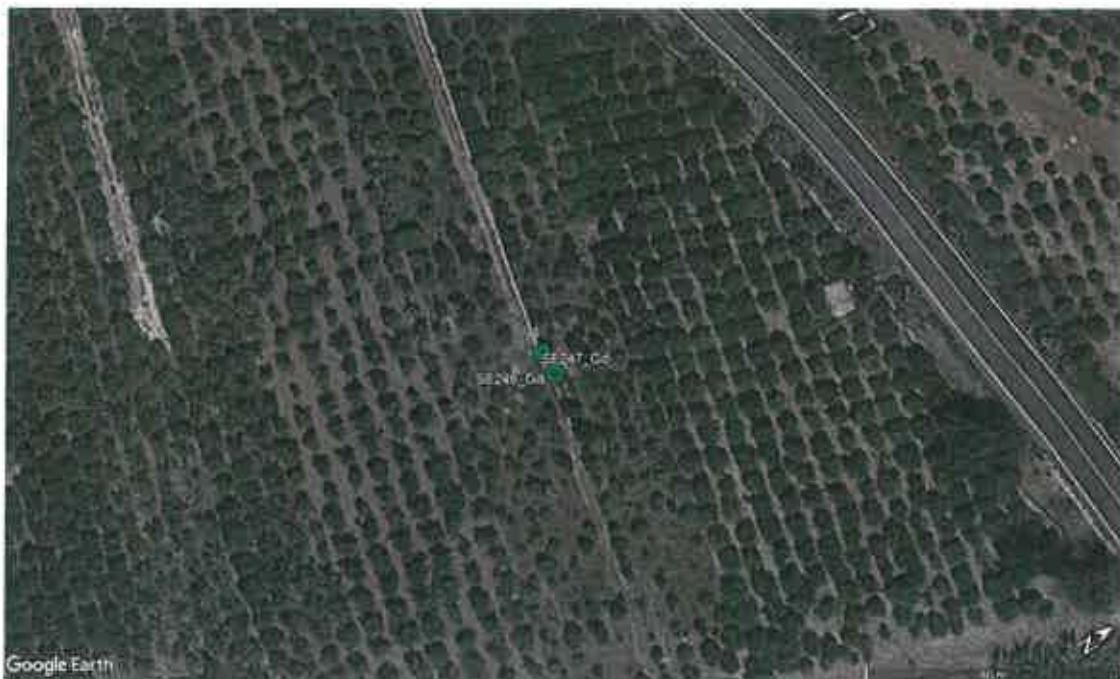


Fig. 1.0.b Ubicazione indagine Cross Hole CH 246-247



Fig. 1.0.c Ubicazione indagine Cross Hole CH 249-250

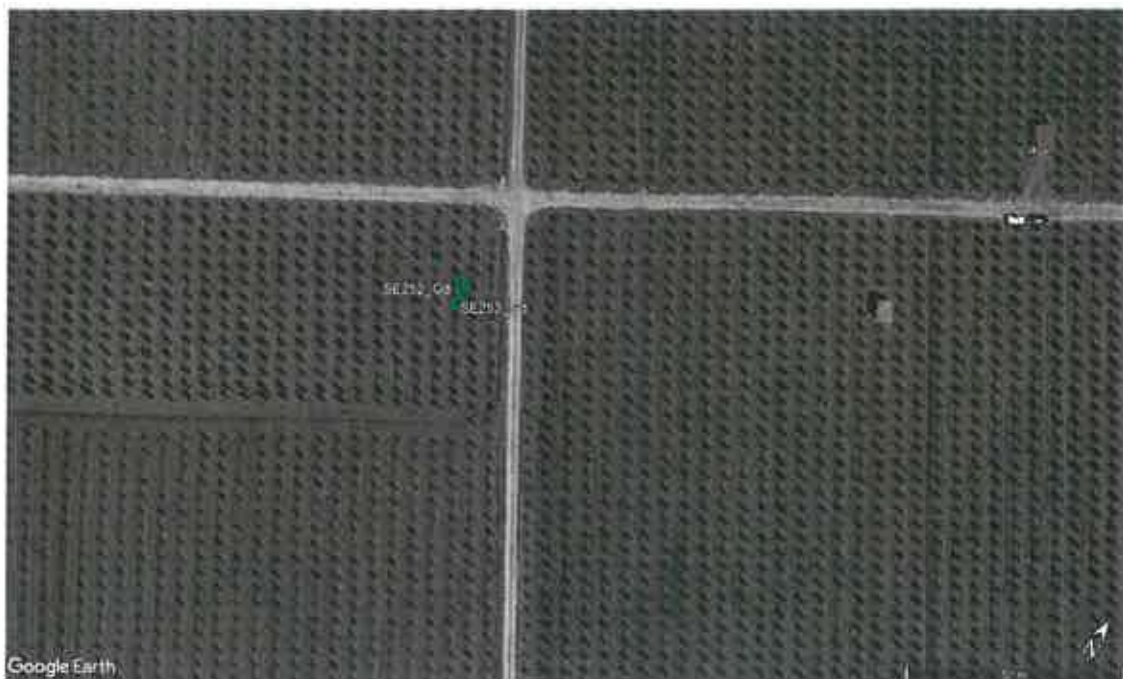


Fig. 1.0.d Ubicazione indagine Cross Hole CH 252-253



Fig. 1.0.e Ubicazione indagine Cross Hole CH 254-255



Fig. 1.0.f Ubicazione indagine Cross Hole CH 260-261



Fig. 1.0.g Ubicazione indagine Cross Hole CH 267-268



2. Descrizione e finalità della metodologia di indagine “Cross Hole”

Mediante questa tecnica d'indagine, è possibile determinare la velocità di propagazione nel senso orizzontale delle onde sismiche di compressione (P) e di quelle di taglio (S), a diverse profondità e ad ogni punto di misura tra gli assi dei fori.

La prova sismica cross-hole consiste nel misurare il tempo percorso delle onde dirette P ed S nel tragitto sorgente-ricevitori in una sezione del sottosuolo tra due fori di sondaggio strumentati, all'interno dei quali, alla medesima profondità, sono posti in uno la sorgente sismica e nell'altro i ricevitori.

Questa tecnica di indagine in foro, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di avere come condizione che la velocità non aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché si valutano i tempi d'arrivo delle onde elastiche lungo lo spazio che intercorre tra i fori; inoltre è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito della successione dei litotipi incontrati nella perforazione.

2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata consiste in un geofono da pozzo 3D (tre geofoni disposti ortogonalmente tra loro) dotato di un sistema d'ancoraggio pneumatico, un martello fondo foro ad ancoraggio pneumatico e un sismografo digitale della “Ambrogeo” con memoria incrementale a 24 bit.

Le caratteristiche tecniche del sistema sono:

- capacità di campionamento dei segnali da 0.032 msec a 0.956 msec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del “tempo zero” tramite starter collegato al circuito trigger del sismografo;
- filtri High Pass e Band Reject;
- Automatic Gain Control;
- acquisizione dati ad incremento di segnale;
- convertitore A/D a 24 bit;
- n° 1 geofono tridirezionale (di cui uno verticale e gli altri orizzontali a 90° tra loro);
- periodo proprio geofoni 10 Hz.

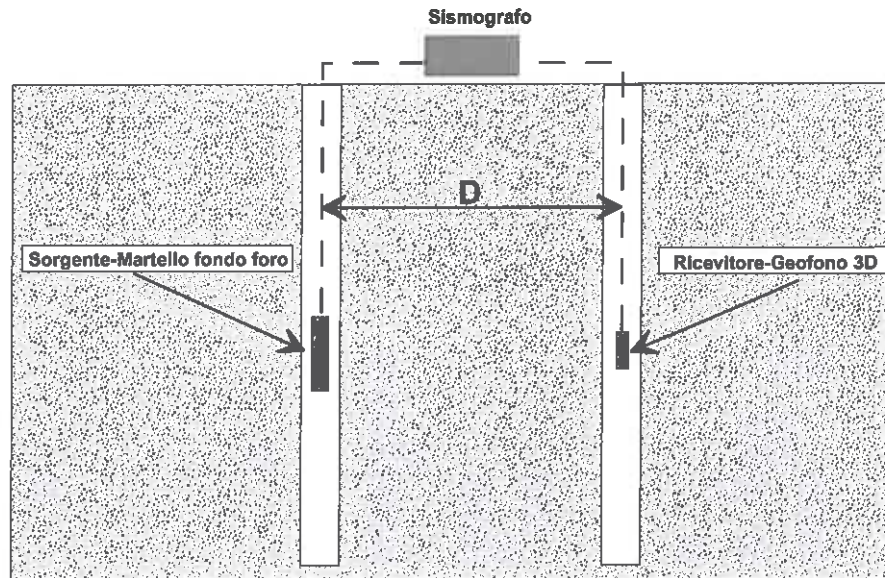


Figura 2.1 Schema Cross Hole

L'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante un martello fondo foro ad ancoraggio pneumatico, secondo lo schema rappresentato in Figura 2.1. Le misure sono state eseguite inserendo il geofono tridimensionale e l'energizzatore all'interno di uno dei due fori dei sondaggi geognostici, opportunamente attrezzati, rivestiti adeguatamente con un tubo PVC, e cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo stesso, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione.

Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione i geofoni e il martello fondo foro sono stati resi solidali alle pareti del foro, mediante dei pistoni ad estrazione pneumatica. Ogni campionamento è stato caratterizzato da 3 tracce sismiche, relative alla misura della terna di geofoni all'interno del foro.



2.2 Calcolo dei tempi d'arrivo

I segnali sismici registrati in formato digitale sono stati analizzati nel dominio del tempo, tramite software dedicato, nella fattispecie *ECHO XE6_12*, per la stima del primo arrivo delle onde sismiche generate (P ed S).

2.3 Elaborazione dati

L'elaborazione dati consiste nella determinazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche P e S. Tale velocità si ottiene conoscendo il tempo di arrivo dei treni d'onda analizzati, la distanza tra il punto di energizzazione ed il sensore posto in foro.

In dettaglio, considerando la Figura 2.1, se "D" è la distanza tra la sorgente energizzante e il ricevitore, e t è il tempo di propagazione dell'onda elastica lungo la congiungente orizzontale normale all'asse del perforo, avremo che:

$$V_{s/p} = D/t$$

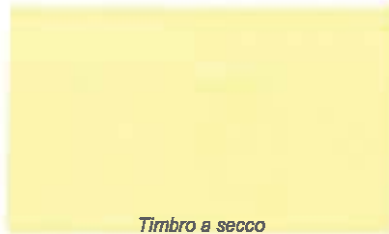
dove $V_{s/p}$ è la velocità di transito per ogni misura eseguita delle onde S e P all'interno dei terreni interposti tra i fori di sondaggio.

I tempi calcolati delle fasi P ed S, consentono in funzione della distanza tra il punto d'energizzazione e la ricezione dei segnali, di definire, per i singoli intervalli, le velocità delle onde P (V_p) e delle onde S (V_s) e di calcolare, inoltre, i rapporti V_p/V_s per la stima del coefficiente di Poisson (σ); utilizzando i valori dei pesi di volume, è possibile anche calcolare i moduli elasto-dinamici e geosismici.



**Tabelle con i valori degli arrivi delle Onde S e delle Onde P
 per ogni punto di misura**

CH 243-244		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0174	0.0387
-2,00	0.0150	0.0343
-3,00	0.0125	0.0257
-4,00	0.0097	0.0199
-5,00	0.0082	0.0171
-6,00	0.0071	0.0142
-7,00	0.0069	0.0150
-8,00	0.0073	0.0168
-9,00	0.0063	0.0150
-10,00	0.0057	0.0129
-11,00	0.0056	0.0157
-12,00	0.0053	0.0125
-13,00	0.0049	0.0115
-14,00	0.0050	0.0127
-15,00	0.0046	0.0119
-16,00	0.0044	0.0107
-17,00	0.0041	0.0115
-18,00	0.0041	0.0108
-19,00	0.0039	0.0100
-20,00	0.0040	0.0115
-21,00	0.0040	0.0098
-22,00	0.0036	0.0093
-23,00	0.0037	0.0100
-24,00	0.0033	0.0090
-25,00	0.0031	0.0086
-26,00	0.0030	0.0094
-27,00	0.0030	0.0096
-28,00	0.0029	0.0094
-29,00	0.0030	0.0089
-30,00	0.0029	0.0084
-31,00	0.0027	0.0081
-32,00	0.0027	0.0083
-33,00	0.0026	0.0081
-34,00	0.0025	0.0073
-35,00	0.0025	0.0076



CH 246-247		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0170	0.0334
-2,00	0.0123	0.0232
-3,00	0.0101	0.0195
-4,00	0.0088	0.0168
-5,00	0.0073	0.0148
-6,00	0.0055	0.0122
-7,00	0.0050	0.0118
-8,00	0.0047	0.0112
-9,00	0.0043	0.0123
-10,00	0.0036	0.0114
-11,00	0.0039	0.0108
-12,00	0.0034	0.0094
-13,00	0.0037	0.0088
-14,00	0.0030	0.0096
-15,00	0.0028	0.0084
-16,00	0.0026	0.0076
-17,00	0.0028	0.0084
-18,00	0.0025	0.0078
-19,00	0.0025	0.0077
-20,00	0.0024	0.0072
-21,00	0.0024	0.0074
-22,00	0.0025	0.0078
-23,00	0.0023	0.0072
-24,00	0.0022	0.0071
-25,00	0.0021	0.0074
-26,00	0.0022	0.0070
-27,00	0.0022	0.0068
-28,00	0.0023	0.0073
-29,00	0.0020	0.0068
-30,00	0.0021	0.0066
-31,00	0.0020	0.0073
-32,00	0.0020	0.0067
-33,00	0.0021	0.0072
-34,00	0.0019	0.0065
-35,00	0.0020	0.0069



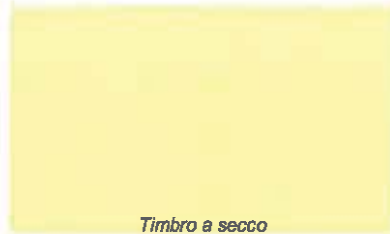
CH 249-250		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0151	0.0372
-2,00	0.0138	0.0333
-3,00	0.0134	0.0293
-4,00	0.0124	0.0254
-5,00	0.0101	0.0220
-6,00	0.0092	0.0179
-7,00	0.0060	0.0124
-8,00	0.0052	0.0112
-9,00	0.0044	0.0114
-10,00	0.0044	0.0106
-11,00	0.0042	0.0103
-12,00	0.0042	0.0110
-13,00	0.0039	0.0103
-14,00	0.0039	0.0101
-15,00	0.0038	0.0109
-16,00	0.0037	0.0099
-17,00	0.0035	0.0083
-18,00	0.0036	0.0090
-19,00	0.0035	0.0089
-20,00	0.0034	0.0082
-21,00	0.0034	0.0088
-22,00	0.0032	0.0086
-23,00	0.0031	0.0083
-24,00	0.0032	0.0088
-25,00	0.0031	0.0082
-26,00	0.0031	0.0086
-27,00	0.0030	0.0089
-28,00	0.0030	0.0080
-29,00	0.0029	0.0078
-30,00	0.0030	0.0072
-31,00	0.0029	0.0079
-32,00	0.0030	0.0075
-33,00	0.0029	0.0074
-34,00	0.0029	0.0073
-35,00	0.0029	0.0077



CH 252-253		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0178	0.0370
-2,00	0.0159	0.0331
-3,00	0.0148	0.0282
-4,00	0.0105	0.0205
-5,00	0.0101	0.0218
-6,00	0.0088	0.0185
-7,00	0.0073	0.0131
-8,00	0.0069	0.0136
-9,00	0.0069	0.0122
-10,00	0.0064	0.0128
-11,00	0.0062	0.0113
-12,00	0.0056	0.0119
-13,00	0.0059	0.0112
-14,00	0.0052	0.0116
-15,00	0.0049	0.0110
-16,00	0.0051	0.0117
-17,00	0.0048	0.0106
-18,00	0.0047	0.0100
-19,00	0.0044	0.0111
-20,00	0.0044	0.0099
-21,00	0.0041	0.0096
-22,00	0.0040	0.0088
-23,00	0.0037	0.0081
-24,00	0.0038	0.0078
-25,00	0.0039	0.0075
-26,00	0.0037	0.0078
-27,00	0.0036	0.0070
-28,00	0.0036	0.0072
-29,00	0.0034	0.0066
-30,00	0.0032	0.0069
-31,00	0.0030	0.0070
-32,00	0.0030	0.0064
-33,00	0.0030	0.0065
-34,00	0.0028	0.0064
-35,00	0.0027	0.0067



CH 254-255		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0272	0.0542
-2,00	0.0252	0.0510
-3,00	0.0200	0.0367
-4,00	0.0151	0.0296
-5,00	0.0117	0.0243
-6,00	0.0134	0.0272
-7,00	0.0116	0.0234
-8,00	0.0109	0.0218
-9,00	0.0090	0.0174
-10,00	0.0094	0.0184
-11,00	0.0084	0.0156
-12,00	0.0076	0.0165
-13,00	0.0072	0.0151
-14,00	0.0062	0.0142
-15,00	0.0065	0.0148
-16,00	0.0057	0.0139
-17,00	0.0051	0.0122
-18,00	0.0048	0.0124
-19,00	0.0042	0.0115
-20,00	0.0040	0.0125
-21,00	0.0040	0.0105
-22,00	0.0039	0.0117
-23,00	0.0042	0.0124
-24,00	0.0039	0.0116
-25,00	0.0040	0.0119
-26,00	0.0040	0.0111
-27,00	0.0041	0.0115
-28,00	0.0038	0.0099
-29,00	0.0035	0.0106
-30,00	0.0033	0.0100
-31,00	0.0032	0.0107
-32,00	0.0034	0.0104
-33,00	0.0032	0.0099
-34,00	0.0035	0.0111
-35,00	0.0035	0.0104



CH 260-261		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0302	0.0701
-2,00	0.0233	0.0485
-3,00	0.0199	0.0444
-4,00	0.0180	0.0382
-5,00	0.0150	0.0339
-6,00	0.0143	0.0362
-7,00	0.0119	0.0274
-8,00	0.0109	0.0268
-9,00	0.0096	0.0244
-10,00	0.0110	0.0264
-11,00	0.0091	0.0243
-12,00	0.0086	0.0290
-13,00	0.0080	0.0240
-14,00	0.0085	0.0258
-15,00	0.0082	0.0276
-16,00	0.0073	0.0231
-17,00	0.0070	0.0254
-18,00	0.0080	0.0250
-19,00	0.0072	0.0260
-20,00	0.0064	0.0224
-21,00	0.0059	0.0209
-22,00	0.0061	0.0232
-23,00	0.0059	0.0230
-24,00	0.0062	0.0185
-25,00	0.0066	0.0155
-26,00	0.0062	0.0138
-27,00	0.0059	0.0133
-28,00	0.0061	0.0130
-29,00	0.0054	0.0141
-30,00	0.0057	0.0124
-31,00	0.0060	0.0132
-32,00	0.0063	0.0130
-33,00	0.0059	0.0121
-34,00	0.0060	0.0122
-35,00	0.0058	0.0119



CH 267-268		
Depth(m)	arrivi P (sec)	arrivi S (sec)
-1,00	0.0136	0.0289
-2,00	0.0115	0.0220
-3,00	0.0085	0.0168
-4,00	0.0069	0.0130
-5,00	0.0065	0.0123
-6,00	0.0056	0.0129
-7,00	0.0060	0.0112
-8,00	0.0062	0.0125
-9,00	0.0055	0.0105
-10,00	0.0051	0.0095
-11,00	0.0046	0.0088
-12,00	0.0041	0.0078
-13,00	0.0045	0.0086
-14,00	0.0042	0.0083
-15,00	0.0037	0.0076
-16,00	0.0041	0.0084
-17,00	0.0043	0.0091
-18,00	0.0037	0.0079
-19,00	0.0034	0.0078
-20,00	0.0036	0.0081
-21,00	0.0029	0.0062
-22,00	0.0027	0.0059
-23,00	0.0028	0.0063
-24,00	0.0026	0.0066
-25,00	0.0028	0.0061
-26,00	0.0033	0.0068
-27,00	0.0027	0.0065
-28,00	0.0025	0.0062
-29,00	0.0022	0.0067
-30,00	0.0023	0.0064
-31,00	0.0022	0.0065
-32,00	0.0023	0.0068
-33,00	0.0021	0.0061
-34,00	0.0020	0.0059
-35,00	0.0020	0.0057
-36,00	0.0020	0.0055
-37,00	0.0019	0.0053
-38,00	0.0019	0.0055
-39,00	0.0018	0.0058
-40,00	0.0019	0.0056



2.4 Correlazione con i Moduli Elastici

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano. In tali condizioni ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici: omogeneità, isotropia e continuità. Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

nella quale:

- σ = sforzo applicato
- ε = deformazione prodotta
- K = coefficiente di proporzionalità.

K , è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti (costanti elastiche dei mezzi).

Le deformazioni e le tensioni generate da un impulso sismico rispondono ai requisiti visti prima: sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi, come già detto, i terreni e le rocce attraversate da onde sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico. Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza biunivoca con le fasi P e S dell'input sismico.

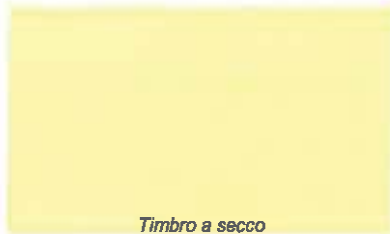
Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati. Tali parametri esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando sottoposto ad uno sforzo e sono:

E (modulo di elasticità o di Young), esprime la resistenza alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o di compressione;

ν (rapporto di Poisson), indica la misura del cambiamento geometrico in forma di un corpo elastico;

G (modulo di rigidità), dà una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo tangenziale ed esprime quindi la capacità del materiale a resistere cambiando di forma e non di volume;

K (modulo di incompressibilità-Bulk), misura il rapporto sforzo-deformazione nel caso di una pressione idrostatica ed indica la resistenza di un corpo alle variazioni di volume.



3. Interpretazione della prova "Cross Hole"

I dati sismici della prova cross-hole acquisiti in campagna sono stati elaborati mediante la separazione dei singoli sismogrammi contenenti le registrazioni relative allo stesso scoppio ed allo stesso geofono, nelle quali è stato eseguito il controllo e il riconoscimento rispettivamente degli arrivi delle fasi P e S.

Dai suddetti tempi rilevati, sono stati costruiti i grafici interpretativi, in cui sono riportate le velocità tra i punti di misura all'interno dei fori di sondaggio e l'andamento dei relativi moduli elastici dinamici.

3.1 Analisi dei risultati della prova "Cross Hole" e determinazione dei moduli elastici dinamici

Dall'analisi dei dati sismici relativi alla prova cross-hole, opportunamente correlati con la colonna litostratigrafica del relativo sondaggio geognostico a c.c., è stato possibile calcolare e verificare l'andamento delle variazioni delle velocità e dei valori dei moduli dinamici lungo la verticale del foro di sondaggio.

In particolar modo è stato possibile discretizzare dei sismostrati di spessore pari a 1,00 m e di calcolare al proprio interno la velocità di transito delle onde P ed S con i relativi moduli dinamici elastici.

Oltre a ciò, dalla determinazione del modulo di Poisson, dalla stima delle Vs e Vp, e dai valori del peso di volume, sono stati calcolati i moduli elastici dinamici e geosismici, utilizzando le seguenti relazioni:

Mod. di Poisson	Mod. di Taglio	Mod. di Incompressibilità (Bulk)	Mod. di Young
$\nu = \frac{[0.5(V_p / V_s)^2 - 1]}{[(V_p / V_s)^2 - 1]}$	$G = V_s^2 \gamma$	$K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$	$E = K [3(1-2\nu)]$

A seguire le tabelle con le velocità Vp, Vs, e i moduli elastici dinamici per ogni punto di misura.

Timbro a secco

CH 243-244						
Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod di taglio)-G (MPa)	(Mod di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E(MPa)
-1	125.98	280.36	30.02	108.64	0.37	82.46
-2	142.41	325.35	38.36	148.06	0.38	105.98
-3	180.12	390.47	66.36	197.21	0.34	183.84
-4	245.36	502.67	113.86	326.45	0.34	306.00
-5	285.74	596.35	150.32	481.53	0.35	430.48
-6	342.88	690.58	229.54	624.53	0.34	613.47
-7	325.85	702.65	207.19	687.15	0.36	684.80
-8	280.78	665.65	164.99	644.82	0.38	456.06
-9	325.68	780.55	206.97	912.90	0.39	577.29
-10	378.45	852.36	279.48	1046.03	0.38	769.81
-11	310.25	878.35	187.82	1255.01	0.43	536.70
-12	390.58	925.47	297.88	1274.39	0.39	828.53
-13	425.35	990.78	353.04	1444.79	0.39	979.35
-14	385.67	980.25	290.24	1488.02	0.41	817.57
-15	410.25	1059.44	328.42	1762.30	0.41	927.32
-16	456.38	1102.55	418.85	1877.09	0.40	1164.35
-17	425.88	1189.78	363.16	2348.88	0.43	1038.09
-18	452.25	1200.87	408.94	2340.35	0.42	1160.38
-19	485.78	1259.47	472.28	2544.97	0.41	1334.32
-20	425.85	1225.89	362.80	2524.18	0.43	1038.10
-21	498.36	1205.38	487.88	2246.01	0.40	1388.70
-22	525.83	1356.88	582.95	2947.48	0.41	1561.22
-23	485.83	1302.70	471.99	2787.03	0.42	1339.80
-24	542.36	1489.38	588.71	3654.45	0.42	1676.12
-25	566.34	1587.25	846.46	4180.20	0.43	1844.30
-26	521.35	1625.14	543.88	4680.44	0.44	1589.54
-27	507.36	1800.54	515.18	4440.03	0.44	1487.98
-28	516.98	1889.71	534.80	5000.92	0.45	1549.46
-29	550.95	1625.22	607.50	4476.26	0.44	1743.63
-30	578.85	1690.21	670.82	4823.07	0.43	1923.30
-31	604.35	1785.88	730.97	5407.00	0.44	2098.38
-32	580.24	1825.84	697.24	5740.79	0.44	2010.33
-33	602.32	1890.65	728.07	6185.87	0.44	2095.20
-34	670.25	1970.30	899.08	6570.66	0.43	2579.58
-35	645.32	1980.25	833.44	6736.85	0.44	2401.30

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 243-244

CH 246-247						
Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod di taglio)-G (MPa)	(Mod di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E(MPa)
-1	128.56	252.89	31.26	79.28	0.33	82.88
-2	185.32	350.60	64.95	145.87	0.31	169.88
-3	220.15	425.36	91.66	219.97	0.32	241.45
-4	256.40	490.65	124.33	289.52	0.31	326.30
-5	290.25	589.87	164.39	459.77	0.34	440.65
-6	382.25	785.58	242.12	881.40	0.37	685.43
-7	384.52	885.23	259.28	1115.10	0.39	721.89
-8	385.65	912.88	290.21	1239.19	0.39	807.59
-9	360.25	990.48	239.36	1595.10	0.43	683.92
-10	378.36	1190.87	279.34	2394.85	0.44	806.67
-11	388.25	1115.87	309.49	2017.07	0.43	883.28
-12	456.25	1250.36	406.20	2509.11	0.42	1156.19
-13	486.28	1165.36	481.43	2034.78	0.39	1286.99
-14	450.25	1412.35	395.58	3364.93	0.44	1142.00
-15	512.23	1550.87	511.99	4010.67	0.44	1478.27
-16	565.66	1628.77	640.38	4455.55	0.43	1833.30
-17	510.38	1552.23	521.33	4127.00	0.44	1500.79
-18	550.28	1725.44	608.03	5150.29	0.44	1749.46
-19	560.69	1887.24	629.17	4858.52	0.44	1809.41
-20	598.36	1789.22	718.58	5451.55	0.44	2059.43
-21	582.25	1925.21	678.49	5782.85	0.44	1958.80
-22	550.78	1745.28	607.13	5286.63	0.44	1754.23
-23	598.85	1867.44	712.47	6029.44	0.44	2058.40
-24	602.65	1987.24	728.63	6934.77	0.45	2106.31
-25	580.28	2057.46	673.86	7573.55	0.48	1963.35
-26	612.78	1988.47	751.51	8911.38	0.45	2175.67
-27	636.23	1973.73	810.13	8716.34	0.44	2336.44
-28	590.28	1900.21	697.33	8296.72	0.45	2017.52
-29	628.86	2100.25	791.77	7772.40	0.45	2287.30
-30	650.28	2047.55	846.30	7282.21	0.44	2443.97
-31	585.75	2128.35	686.67	8150.33	0.46	2003.74
-32	645.89	2198.77	834.91	8582.52	0.45	2425.89
-33	698.39	2090.24	718.63	7788.63	0.46	2085.91
-34	858.25	2214.32	867.17	8656.85	0.45	2517.46
-35	821.37	2174.22	772.73	8430.58	0.46	2249.45

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 246-247

Timbro a secco

CH 249-250

Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod di taglio)-G (MPa)	(Mod. di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E(MPa)
-1	130.00	320.20	31.06	151.29	0.40	89.58
-2	145.20	350.54	39.87	179.23	0.40	111.36
-3	165.30	360.28	51.68	176.59	0.37	141.25
-4	190.25	390.27	68.46	196.79	0.34	184.03
-5	220.21	480.28	94.62	323.94	0.37	258.69
-6	270.25	528.84	142.52	355.71	0.32	377.17
-7	390.23	812.58	297.15	892.24	0.35	902.37
-8	432.20	925.47	364.50	1185.30	0.36	991.63
-9	425.20	1098.52	352.79	1884.37	0.41	996.20
-10	458.23	1102.57	400.73	1825.64	0.40	1143.64
-11	470.23	1154.87	431.47	2027.24	0.40	1208.66
-12	440.85	1145.95	379.24	2054.15	0.41	1071.78
-13	470.25	1250.54	431.51	2478.24	0.42	1223.45
-14	480.12	1254.25	449.81	2469.98	0.41	1272.20
-15	445.23	1287.25	386.81	2717.62	0.43	1107.87
-16	490.28	1295.23	481.08	2718.08	0.42	1362.77
-17	585.22	1362.87	685.43	2813.35	0.39	1908.75
-18	535.15	1345.28	573.18	2857.60	0.41	1611.73
-19	548.25	1365.27	597.18	3099.95	0.41	1683.45
-20	588.28	1442.58	692.62	3241.41	0.40	1939.69
-21	550.25	1428.58	605.96	3276.50	0.41	1712.32
-22	580.28	1525.25	628.25	3818.28	0.42	1786.76
-23	590.25	1569.65	673.84	4032.50	0.42	1914.85
-24	548.23	1535.25	601.52	3916.16	0.43	1718.65
-25	590.14	1562.47	697.00	3956.60	0.42	1975.03
-26	563.25	1545.64	634.93	3934.67	0.42	1807.57
-27	545.26	1598.23	565.02	4318.78	0.43	1706.66
-28	602.25	1602.47	725.90	4171.44	0.42	2058.31
-29	623.14	1662.74	777.13	4496.98	0.42	2204.42
-30	672.58	1632.45	905.34	4126.28	0.40	2530.92
-31	612.14	1655.74	749.94	4486.75	0.42	2131.08
-32	642.28	1634.37	825.61	4245.15	0.41	2326.03
-33	655.64	1678.84	860.84	4493.05	0.41	2427.48
-34	662.45	1688.73	878.28	4536.45	0.41	2476.10
-35	630.67	1645.24	796.03	4355.93	0.41	2250.97

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 249-250

CH 252-253

Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod di taglio)-G (MPa)	(Mod. di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E(MPa)
-1	130.28	270.25	32.10	95.33	0.35	66.68
-2	145.64	302.54	40.12	119.62	0.35	108.25
-3	170.87	325.24	55.22	126.44	0.31	144.81
-4	235.45	458.87	104.85	258.44	0.32	277.07
-5	220.75	478.24	95.09	319.51	0.36	269.52
-6	260.76	545.54	132.70	403.80	0.35	358.80
-7	368.64	660.24	255.03	497.24	0.27	675.14
-8	355.45	694.85	246.54	613.41	0.32	652.24
-9	394.47	702.45	303.64	658.00	0.27	771.06
-10	375.68	750.24	275.25	731.32	0.33	733.71
-11	428.25	772.76	357.87	688.09	0.28	914.98
-12	405.68	855.27	321.14	999.18	0.35	870.20
-13	432.25	820.24	364.59	826.72	0.31	953.58
-14	415.89	925.47	337.61	1221.29	0.37	927.12
-15	438.85	985.24	372.99	1397.83	0.38	1028.03
-16	410.98	845.28	338.04	1337.60	0.38	935.32
-17	455.89	1005.58	415.95	1469.15	0.37	1140.25
-18	482.58	1024.27	468.09	1478.24	0.36	1265.27
-19	435.58	1095.32	379.72	1894.79	0.41	1067.02
-20	485.29	1100.24	471.33	1784.26	0.38	1300.15
-21	503.56	1188.85	507.53	2150.99	0.39	1411.57
-22	550.68	1200.24	608.91	2073.90	0.37	1658.90
-23	562.54	1295.95	702.68	2424.34	0.37	1922.33
-24	621.57	1254.87	773.22	2120.57	0.34	2068.28
-25	642.54	1238.42	828.28	1967.75	0.32	2174.47
-26	615.37	1302.57	757.87	2385.18	0.36	2055.88
-27	685.25	1350.27	939.77	2395.90	0.33	2483.32
-28	672.35	1330.27	904.72	2335.34	0.33	2403.76
-29	730.25	1412.28	1067.25	2568.77	0.32	2812.29
-30	702.24	1521.27	986.95	3315.73	0.36	2693.60
-31	690.28	1587.98	953.62	3775.29	0.38	2638.69
-32	755.37	1612.87	1141.94	3683.64	0.36	3104.97
-33	738.45	1628.95	1091.36	3855.41	0.37	2981.78
-34	750.25	1712.89	1126.51	4369.95	0.38	3112.12
-35	720.28	1765.25	1088.31	4852.03	0.40	2907.53

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 252-253

Timbro a secco

CH 254-255						
Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod.di taglio)-G (MPa)	(Mod. di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E (MPa)
-1	125.66	250.44	29.66	78.80	0.33	79.54
-2	133.40	270.01	33.66	93.01	0.34	90.10
-3	185.36	340.22	64.98	132.27	0.29	167.51
-4	230.45	450.22	100.44	246.44	0.32	265.66
-5	280.48	580.36	153.51	452.56	0.35	413.75
-6	250.36	508.85	122.31	342.17	0.34	327.86
-7	290.46	586.34	164.82	451.37	0.34	440.32
-8	312.22	625.22	190.22	509.15	0.33	507.46
-9	390.44	768.85	297.47	726.17	0.32	765.18
-10	370.43	725.88	267.76	671.15	0.32	708.99
-11	435.44	812.55	369.99	795.02	0.30	960.90
-12	412.98	900.20	332.80	1137.54	0.37	909.69
-13	452.30	950.66	399.19	1231.26	0.35	1080.78
-14	480.36	1100.55	450.26	1763.12	0.38	1244.81
-15	458.69	1055.64	410.55	1627.11	0.38	1136.10
-16	498.55	1190.46	477.69	2199.40	0.40	1336.31
-17	560.36	1325.55	628.43	2678.64	0.39	1748.56
-18	550.35	1425.79	608.18	3260.27	0.41	1712.41
-19	590.50	1625.36	697.65	4356.70	0.42	1987.45
-20	545.54	1712.50	595.63	5075.12	0.44	1719.62
-21	650.25	1690.45	846.22	4590.82	0.41	2391.72
-22	580.25	1728.98	673.84	5094.35	0.44	1935.98
-23	550.47	1633.47	606.45	4531.48	0.44	1741.64
-24	587.88	1758.45	691.91	5265.94	0.44	1988.63
-25	670.25	1700.55	650.81	4919.82	0.44	1889.98
-26	612.55	1721.82	750.94	4928.65	0.43	2143.95
-27	590.76	1654.25	698.52	4545.45	0.43	1693.43
-28	689.84	1812.46	951.85	5305.34	0.42	2694.42
-29	644.22	1938.35	830.60	6412.03	0.44	2388.67
-30	678.55	2037.98	921.49	7083.71	0.44	2648.57
-31	636.65	2100.21	811.20	7746.15	0.45	2351.50
-32	655.32	1888.77	858.47	6789.62	0.44	2473.73
-33	690.21	2098.46	953.43	7541.81	0.44	2744.62
-34	612.98	1920.55	752.00	6379.37	0.44	2170.70
-35	655.75	1968.82	860.60	6810.30	0.44	2474.42

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 254-255

CH 260-261						
Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod di taglio)-G (MPa)	(Mod. di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E (MPa)
-1	128.45	258.00	31.21	126.35	0.38	86.49
-2	185.66	365.84	65.19	184.35	0.35	175.91
-3	202.80	452.32	77.78	283.23	0.37	213.78
-4	235.58	500.45	104.96	333.72	0.36	285.01
-5	265.60	598.47	137.65	515.36	0.38	379.20
-6	248.45	627.32	120.45	607.30	0.41	338.94
-7	326.30	756.67	210.32	837.40	0.38	582.21
-8	335.80	828.74	220.03	1046.81	0.40	616.88
-9	368.32	935.35	264.72	1354.22	0.41	745.57
-10	340.32	821.31	226.00	1014.93	0.40	631.15
-11	370.52	990.78	267.89	1558.32	0.42	760.11
-12	310.21	1052.32	187.78	1910.48	0.45	545.46
-13	375.25	1128.36	274.77	2118.06	0.44	790.14
-14	348.88	1058.30	237.51	1868.90	0.44	683.57
-15	325.88	1102.85	207.23	2097.05	0.45	601.85
-16	389.65	1232.67	303.86	2636.85	0.44	877.96
-17	354.28	1289.45	251.20	2982.68	0.46	733.09
-18	360.58	1124.80	250.21	2185.12	0.44	750.83
-19	345.90	1258.60	239.46	2851.02	0.46	698.80
-20	402.50	1398.46	324.23	3481.79	0.45	943.41
-21	430.28	1523.87	370.83	4153.47	0.46	1079.50
-22	387.87	1485.32	301.09	4013.89	0.46	881.24
-23	390.80	1522.36	305.68	4230.78	0.46	895.41
-24	485.68	1452.52	472.09	3591.88	0.44	1358.83
-25	580.50	1389.36	674.42	2853.61	0.39	1875.50
-26	650.28	1458.32	846.30	3127.08	0.38	2328.87
-27	674.28	1526.36	908.92	3443.37	0.39	2508.79
-28	690.20	1468.38	853.40	3043.89	0.38	2569.81
-29	640.20	1652.20	820.27	4369.54	0.41	2315.89
-30	725.25	1587.33	1052.69	3639.08	0.37	2880.33
-31	680.32	1495.32	926.30	3239.83	0.37	2537.11
-32	690.23	1423.36	853.48	2763.35	0.35	2567.29
-33	745.25	1526.35	1111.55	3188.93	0.34	2688.50
-34	735.28	1489.47	1082.01	2997.38	0.34	2887.38
-35	755.26	1554.32	1141.81	3312.95	0.35	3071.97

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 260-261



Timbro a secco

CH 267-268						
Strato	Vs m/s	Vp m/s	(Mod.di taglio)-G (MPa)	(Mod. di incompressibilità)-k (MPa)	(Modulo di poisson) v	Modulo di Young-E(MPa)
-1	125.66	266.32	29.66	94.32	0.36	81.04
-2	164.88	315.25	61.42	119.41	0.31	134.89
-3	215.67	425.66	88.13	225.20	0.33	233.89
-4	278.65	525.98	146.65	327.43	0.30	383.26
-5	295.45	556.42	170.33	377.03	0.30	444.12
-6	280.44	652.67	153.46	627.11	0.39	425.67
-7	322.69	602.65	203.19	437.78	0.30	527.69
-8	290.55	589.36	164.73	458.14	0.34	441.30
-9	345.22	658.36	232.55	535.71	0.31	609.47
-10	380.45	712.87	282.44	615.05	0.30	734.83
-11	412.78	789.85	332.48	773.43	0.31	872.43
-12	466.88	895.84	425.34	998.17	0.31	1117.32
-13	422.23	867.79	347.88	809.45	0.31	912.86
-14	435.55	865.78	370.17	969.10	0.33	985.09
-15	480.22	985.67	450.00	1295.60	0.34	1209.63
-16	430.67	890.73	371.21	1062.94	0.35	1000.36
-17	400.78	845.76	321.47	1003.04	0.36	871.32
-18	466.96	985.65	417.94	1367.07	0.36	1139.40
-19	468.11	1052.32	438.55	1631.52	0.38	1207.47
-20	450.60	1007.78	406.72	1490.33	0.37	1118.41
-21	585.66	1256.06	666.46	2256.03	0.36	1869.81
-22	612.87	1368.35	751.73	2690.43	0.37	2063.04
-23	580.77	1289.45	675.05	2427.56	0.37	1853.35
-24	550.36	1389.76	606.20	3057.33	0.41	1705.86
-25	590.25	1289.34	697.26	2397.37	0.37	1906.82
-26	530.25	1102.76	562.71	1663.62	0.35	1518.91
-27	560.28	1325.68	628.25	2676.57	0.39	1748.14
-28	585.89	1458.05	687.00	3342.21	0.40	1928.84
-29	540.89	1625.25	585.52	4505.77	0.44	1663.63
-30	562.06	1588.47	634.32	4210.49	0.43	1811.98
-31	555.74	1650.89	618.11	4630.42	0.44	1775.34
-32	532.77	1596.75	588.07	4345.25	0.44	1633.05
-33	590.25	1725.36	697.26	5028.09	0.43	1999.37
-34	612.55	1793.25	750.94	5434.60	0.43	2153.64
-35	634.77	1825.88	806.41	5597.71	0.43	2308.39
-36	655.32	1900.14	859.47	5339.44	0.42	2447.11
-37	680.45	1869.60	926.65	5760.02	0.42	2636.47
-38	654.10	1925.37	856.27	6277.43	0.43	2457.10
-39	630.40	1965.87	765.35	6930.66	0.44	2296.60
-40	645.52	1924.76	833.96	6302.72	0.44	2396.19

Velocità medie di intervallo e relativi valori dei moduli dinamici CH 267-268

In ottemperanza alle "Nuove Norme Tecniche per la Costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018" la classificazione del sito può essere ottenuta sulla base del valore "Vs,eq" (velocità media equivalente delle onde di taglio con substrato rigido presente entro i primi 30,00 m), o "Vs 30" (velocità media delle onde di taglio nei primi 30,00 m con substrato rigido > di 30,00 m di profondità) utilizzando la seguente espressione:

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

dove:

h_i: spessore dell'i-esimo strato;

V_{s,i}: velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N: numero strati;

H: profondità del substrato rigido (Bed Rock) < di 30,00 m caratterizzato da velocità non inferiore a 800,00 m/s; o H = 30,00 m nel caso in cui il substrato rigido sia a profondità maggiori di 30,00 m.



Da quanto sopra esposto, ai fini della definizione della azione sismica di progetto, si è calcolato un valore di velocità di $V_{s,30}$ a partire dal piano di campagna su n.30 strati con spessore di 1,0 m e considerando il *Bedrock* a profondità maggiori di 30,0 m.

A seguire una tabella riepilogativa con i valori di $V_{s,30}$ per ogni sito con la relativa categoria di suolo di appartenenza ai sensi delle NTC 2018:

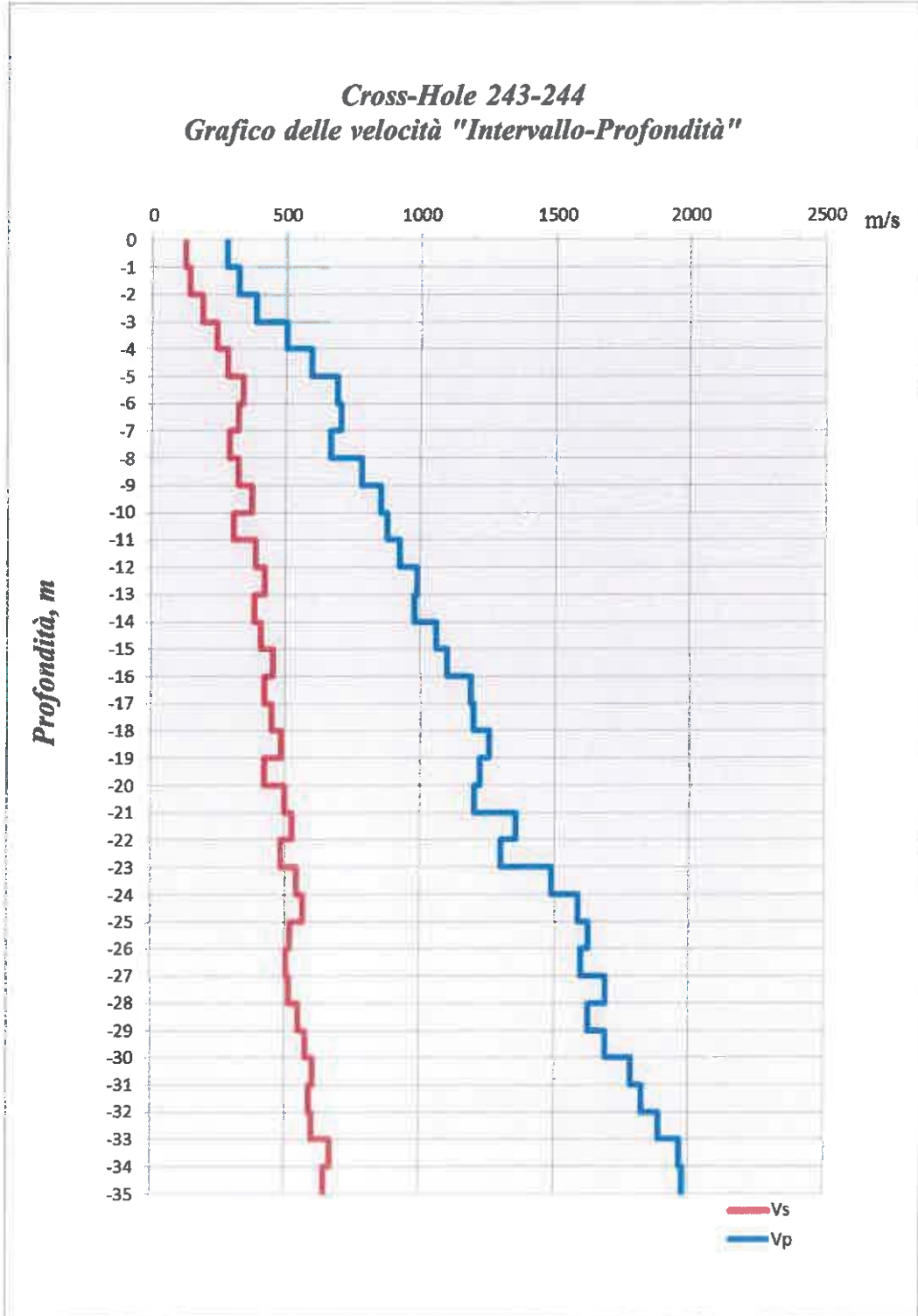
Sito	$V_{s,30}$ m/s	Cat. di Suolo NTC 2018
CH 243-244	348,05	C
CH 246-247	398,49	B
CH 249-250	371,56	B
CH 252-253	363,14	B
CH 254-255	368,76	B
CH 260-261	338,88	C
CH 267-268	368,08	B

Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

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

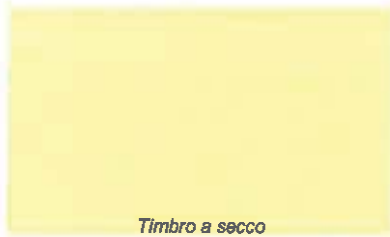


4. Grafici di output.





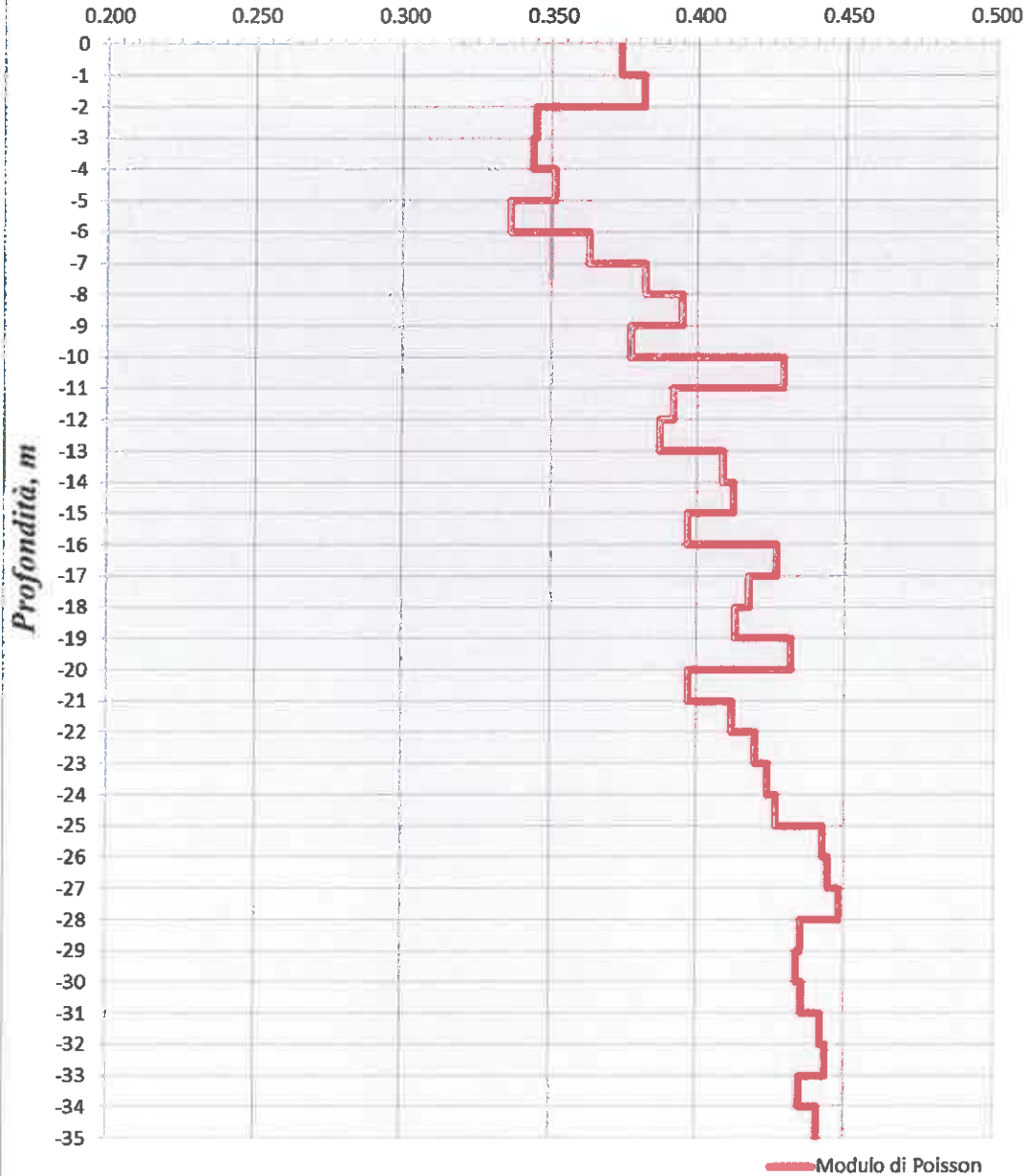
S.r.l.
ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE
P.I.V.A.: 01479620856
C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874
Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.

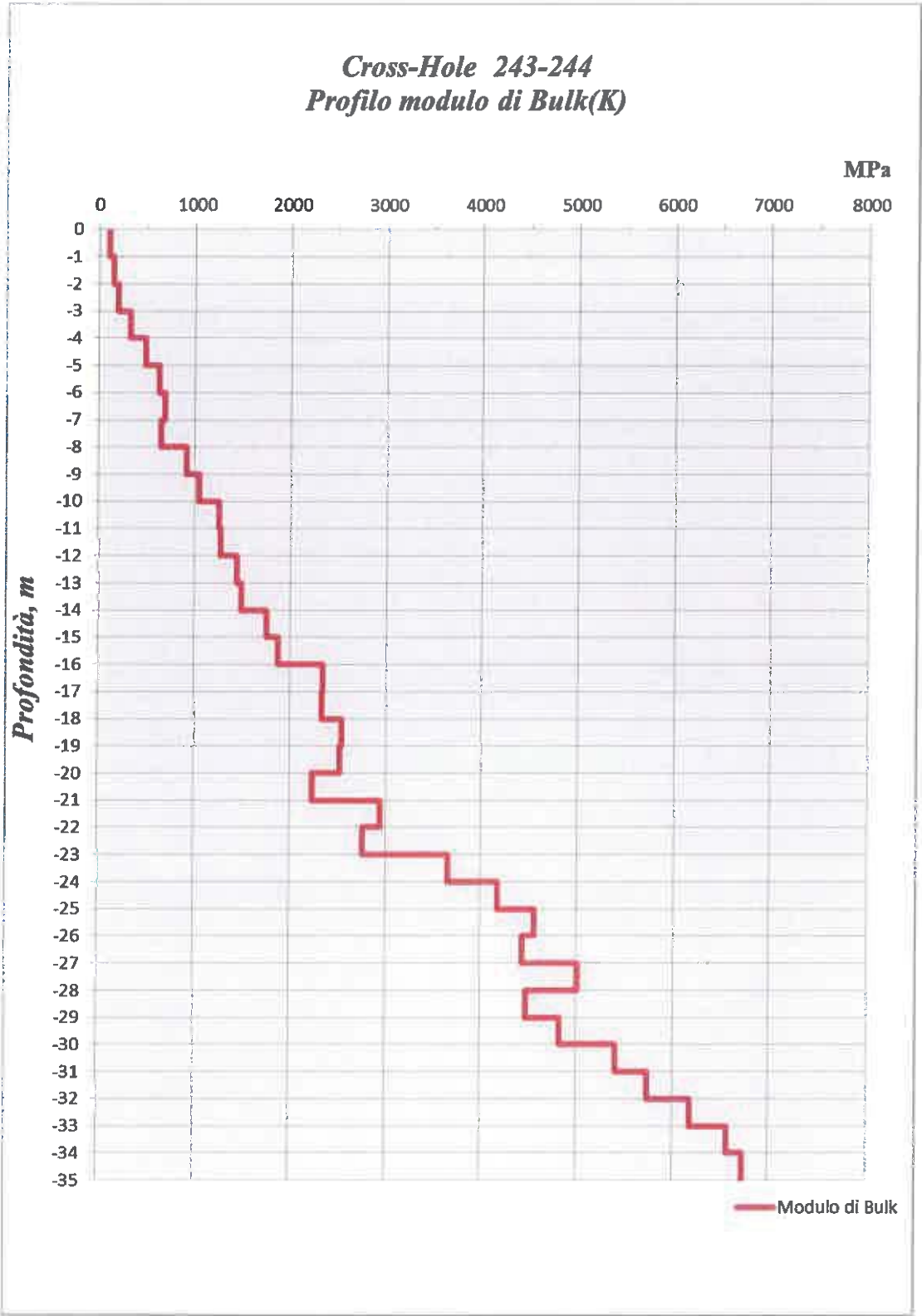
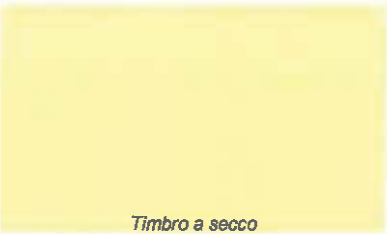


Timbro a secco

Laboratorio: Via Libero Grassi,7
(Area Industriale Calderaro)
C.P. 287 - 93100 Caltanissetta
Tel.: 0934565012
Fax.: 0934575422
e-mail: info@sidercem.it
pec: sidercem@legalmail.it
web: www.sidercem.it

Cross Hole 243-244 Profilo modulo di POISSON







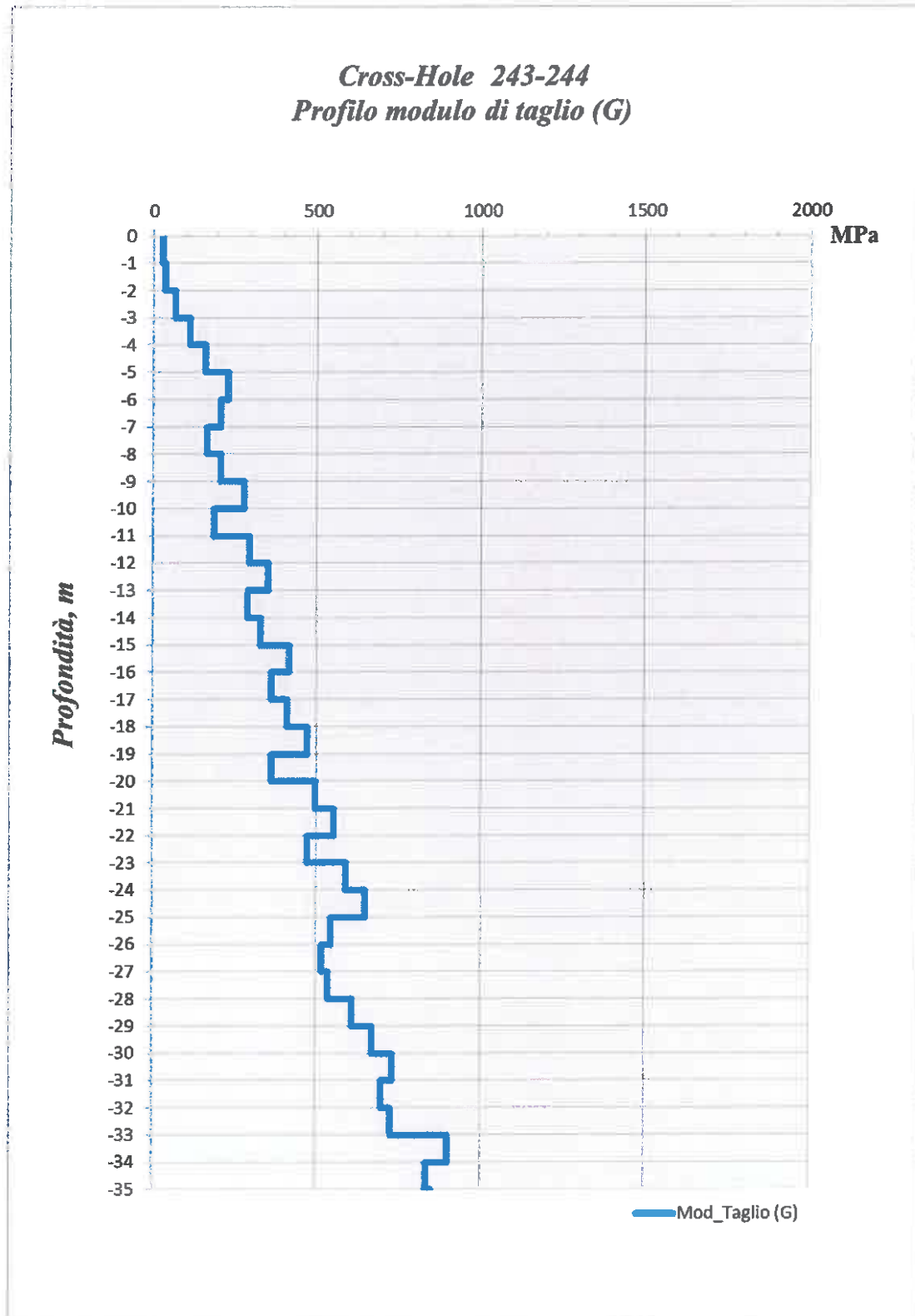
S.R.L.
ISTITUTO DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE
P.I.V.A.: 01479620856
C.F. - Iscr. C.C.I.A.A. di Caltanissetta: 01754820874
Capitale Sociale: € 102.774,92 i.v.



Timbro a secco

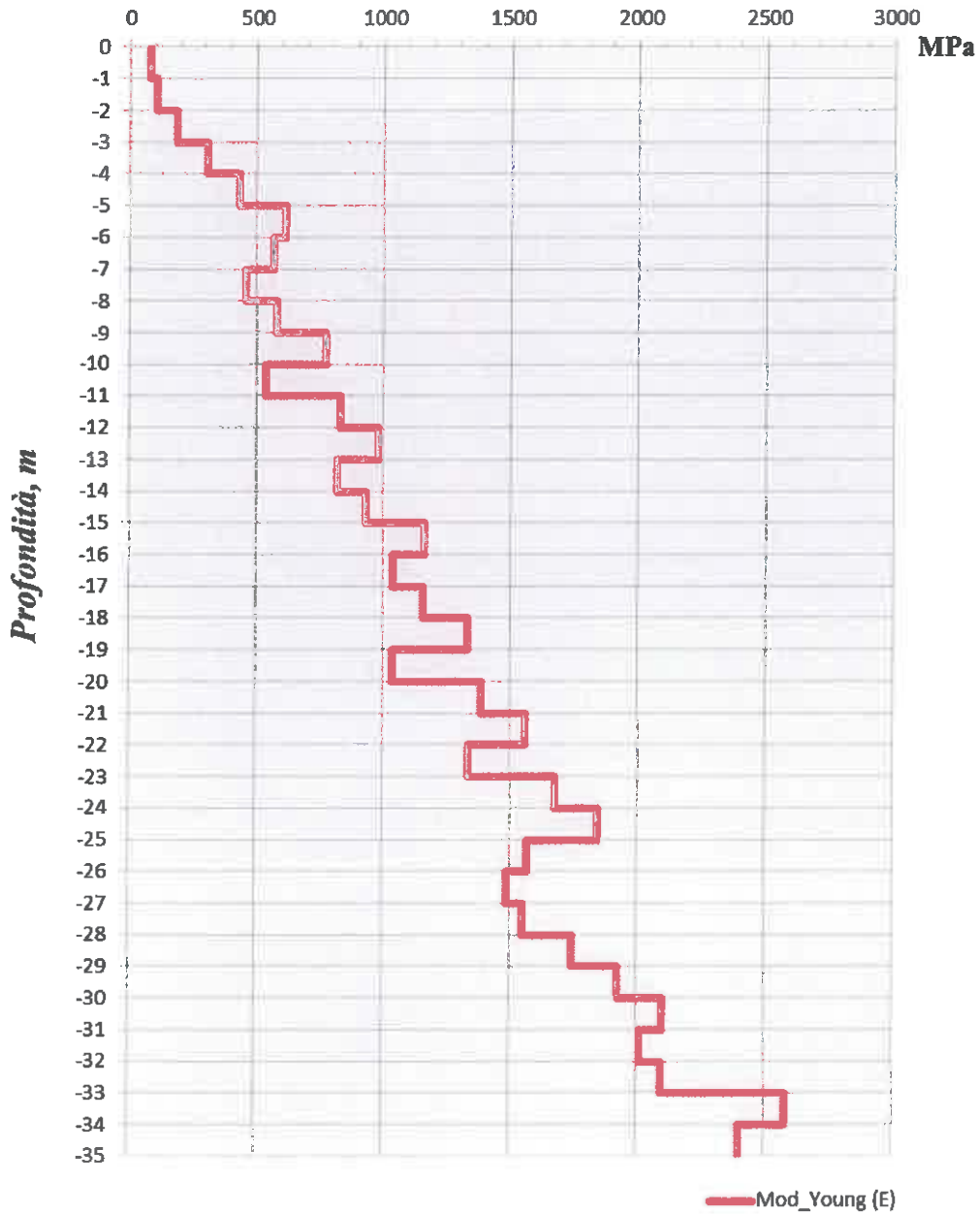
Laboratorio: Via Libero Grassi,7
(Area Industriale Calderaro)
C.P. 287 - 93100 Caltanissetta
Tel.: 0934565012
Fax.: 0934575422
e-mail: info@sidercem.it
sidercem@legalmail.it
web: www.sidercem.it

Cross-Hole 243-244 Profilo modulo di taglio (G)



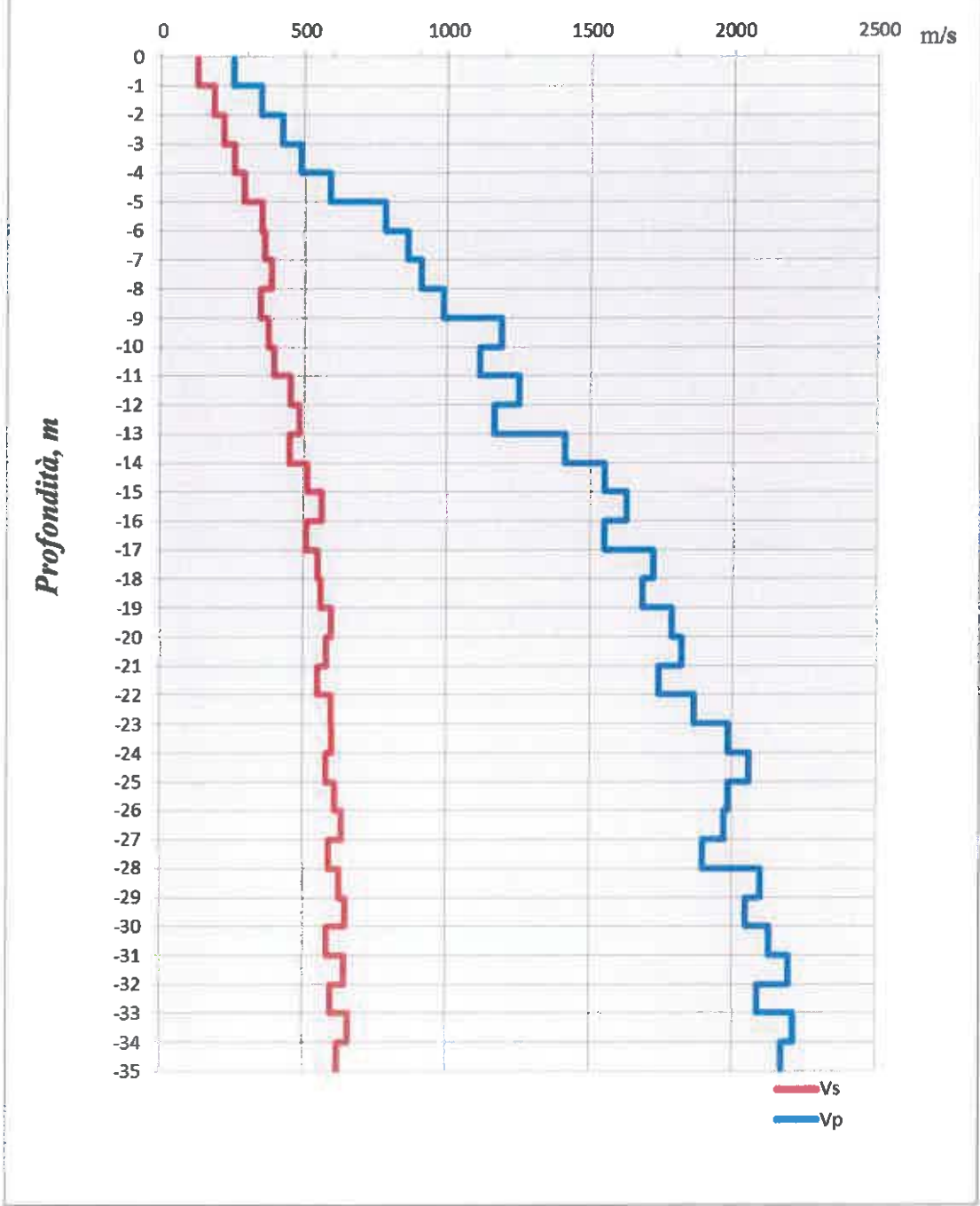


Cross-Hole 243-244
Profilo modulo di Young (E)



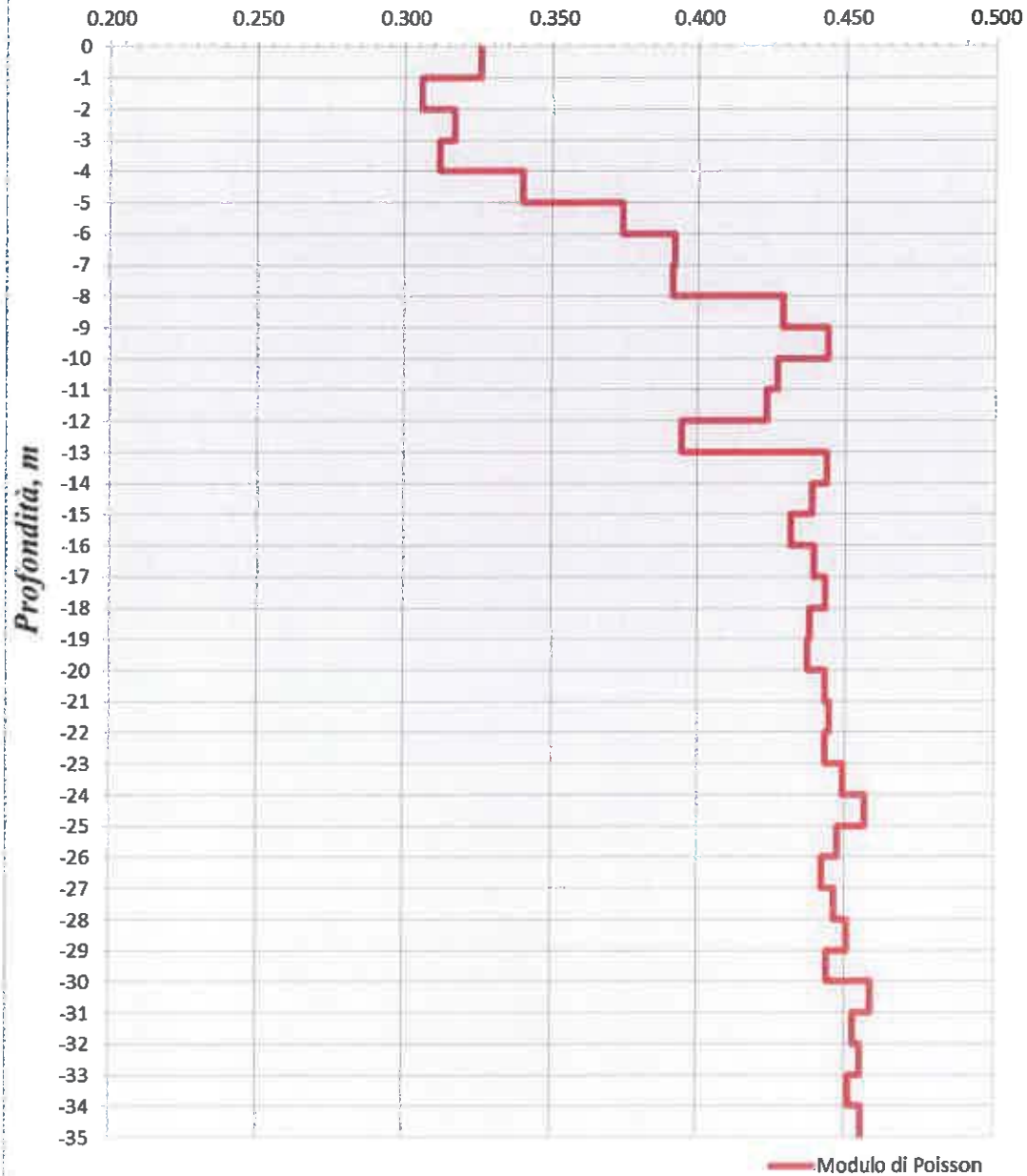


Cross-Hole 246-247
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



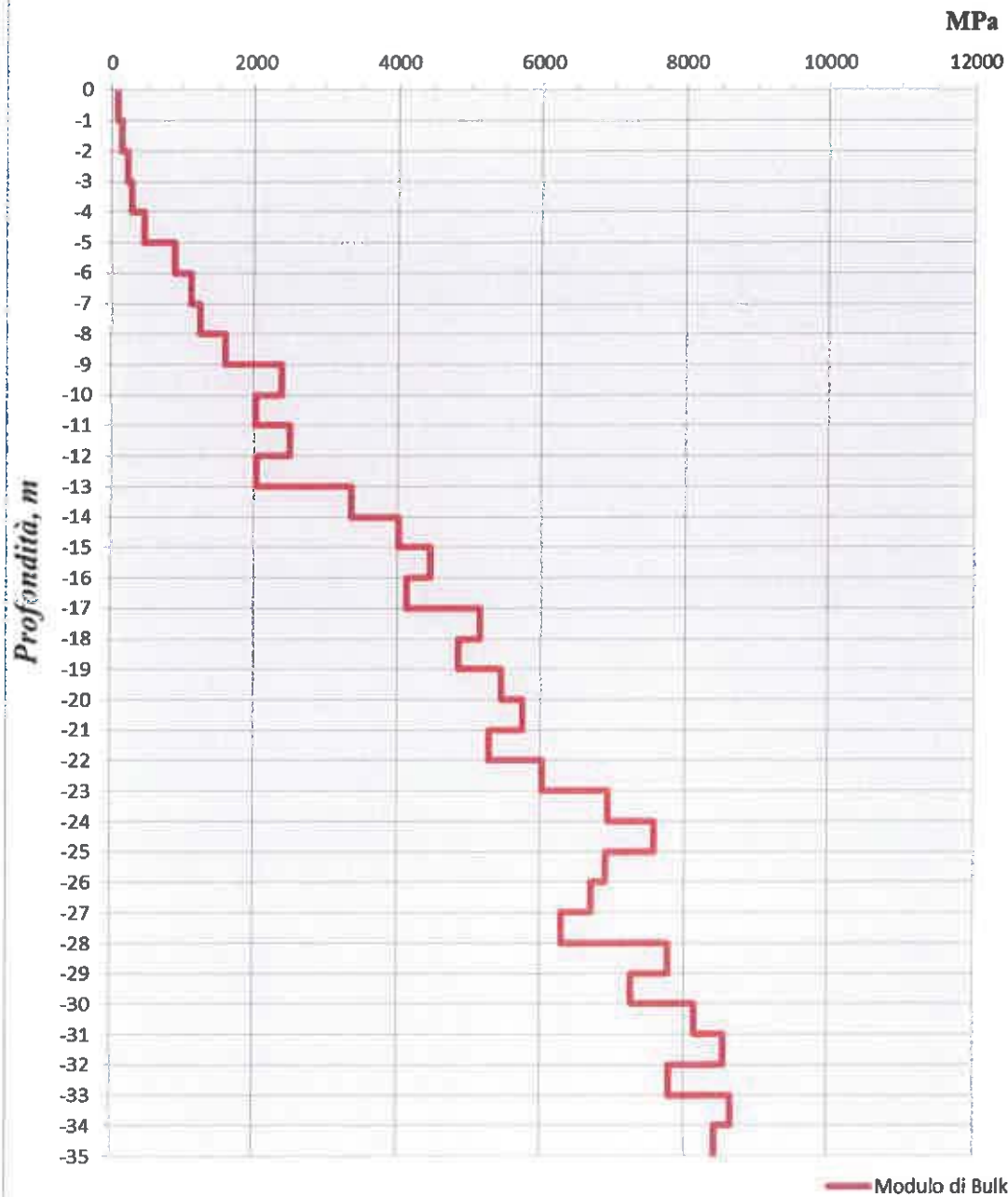


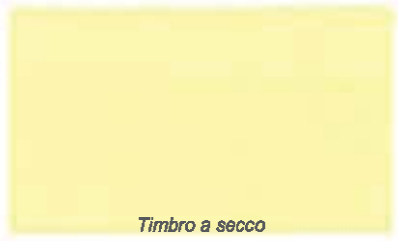
Cross Hole 246-247
Profilo modulo di POISSON



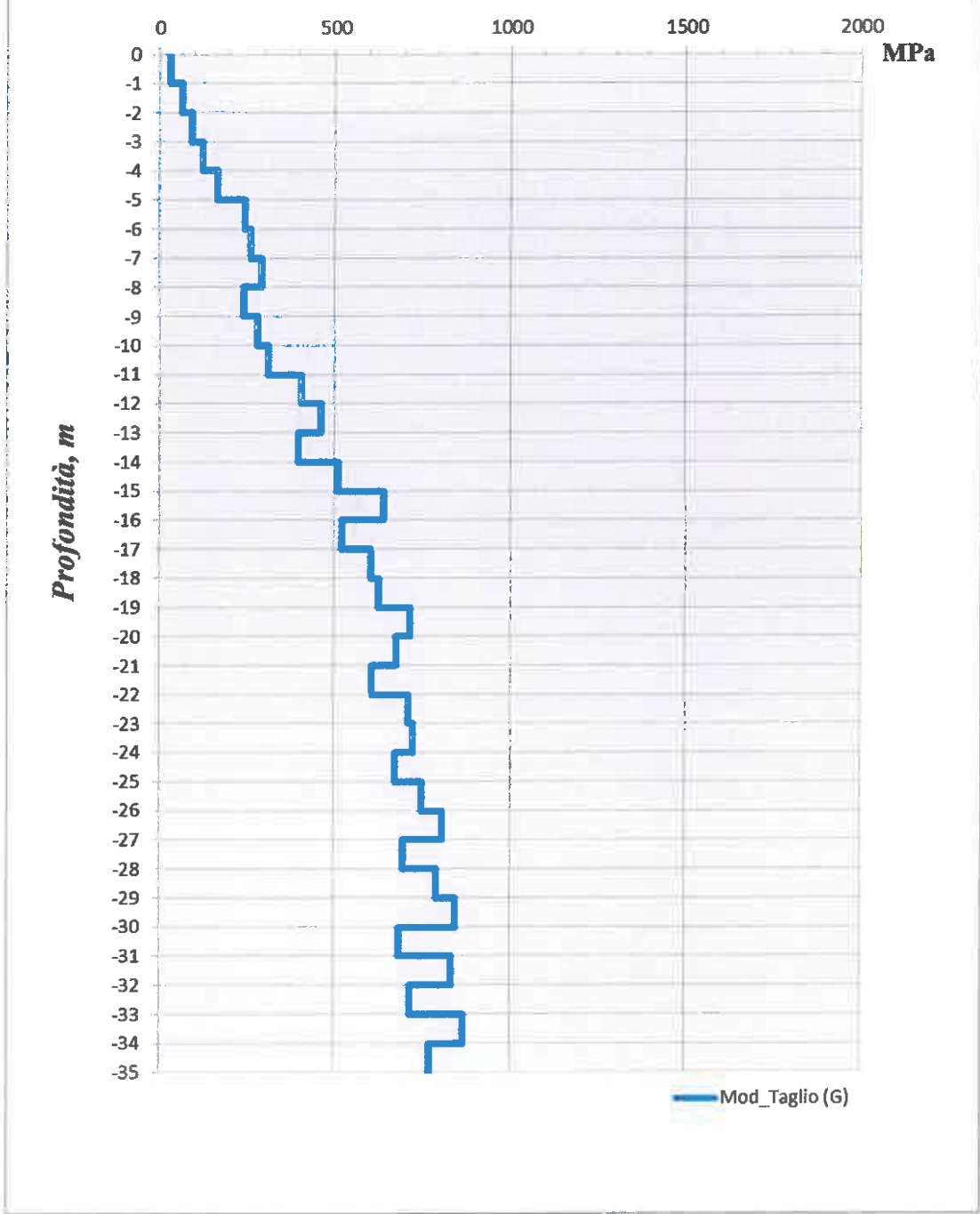


Cross-Hole 246-247
Profilo modulo di Bulk(K)



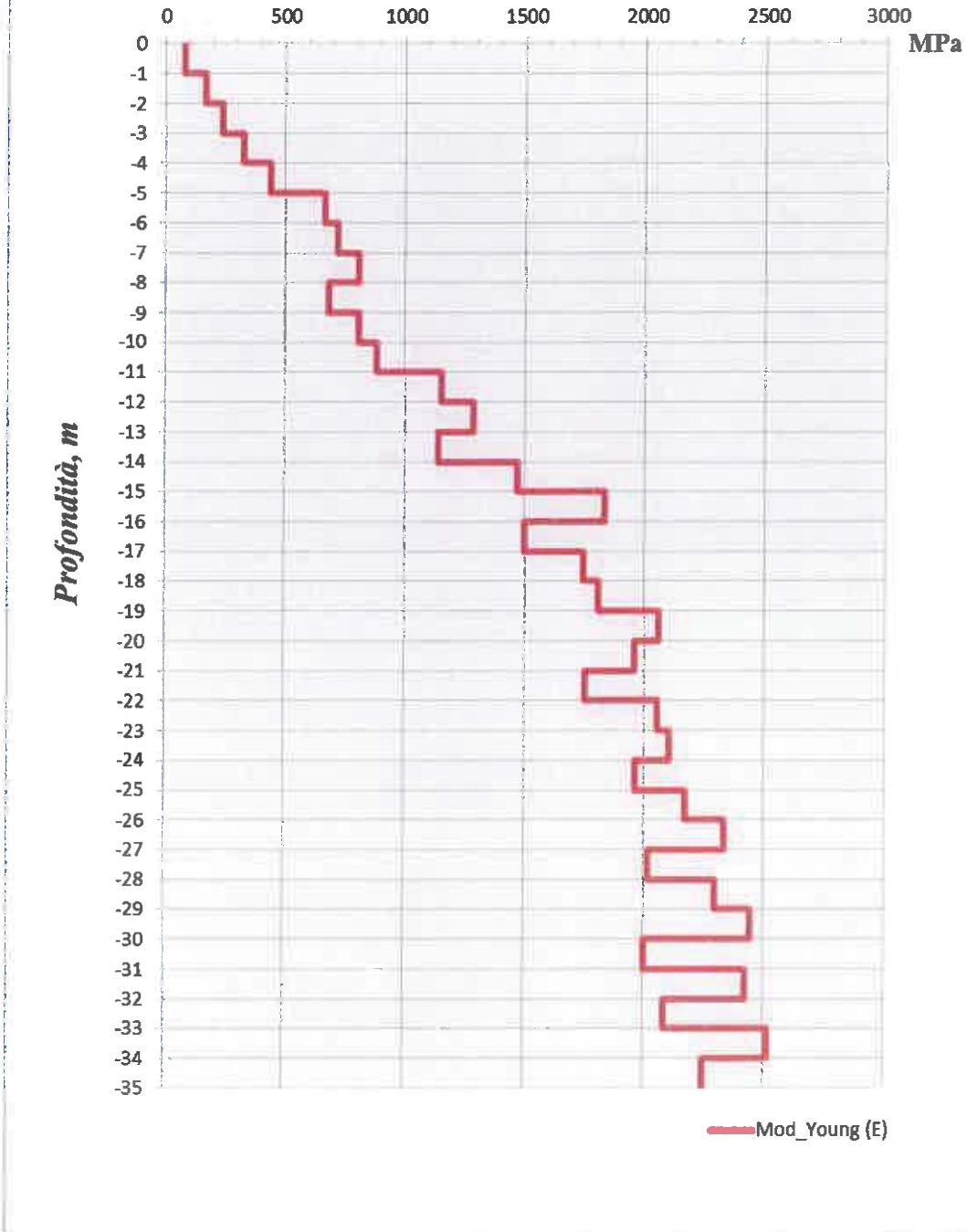


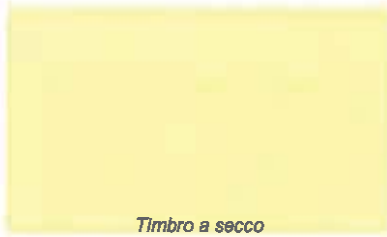
Cross-Hole 246-247
Profilo modulo di taglio (G)



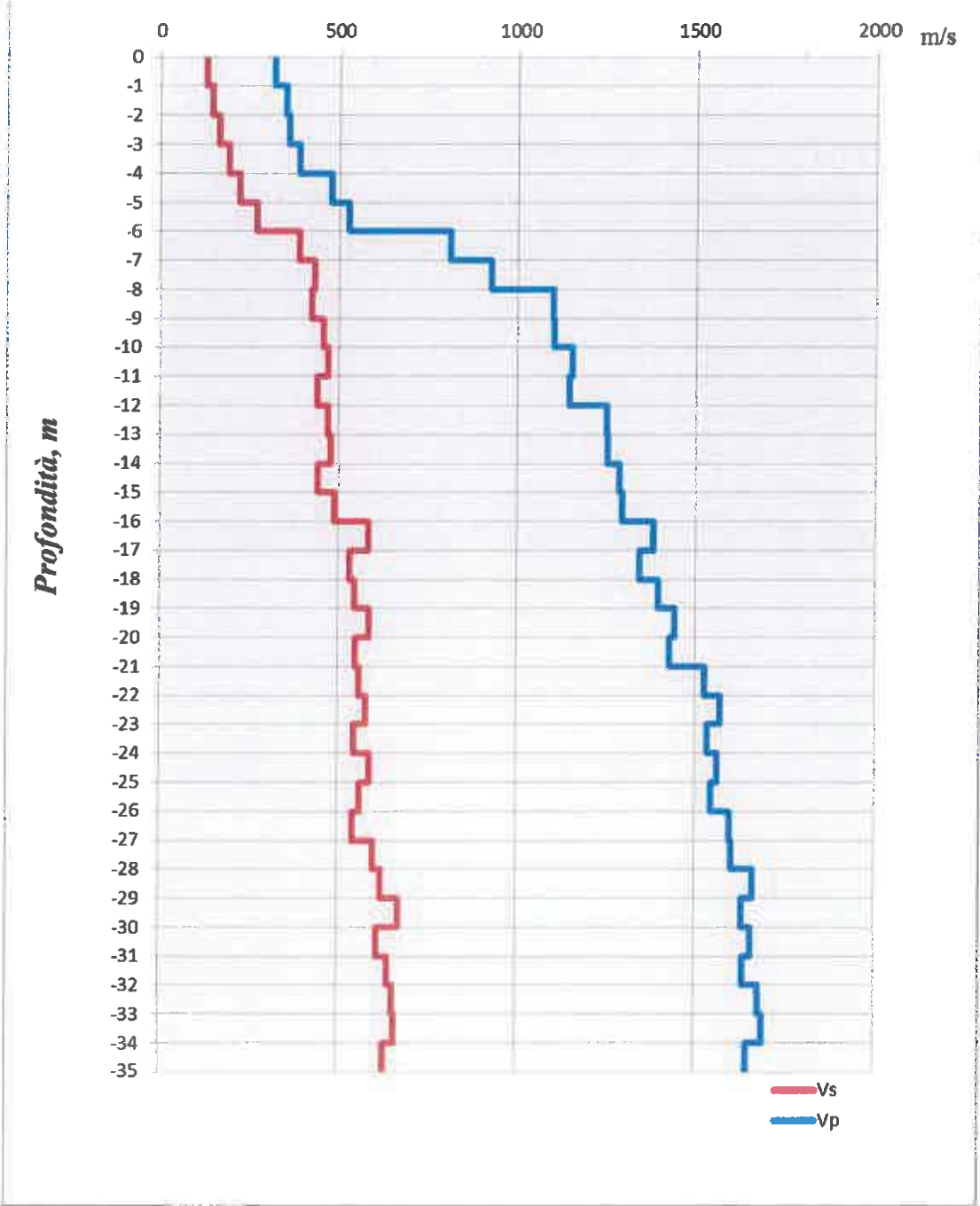


Cross-Hole 246-247
Profilo modulo di Young (E)



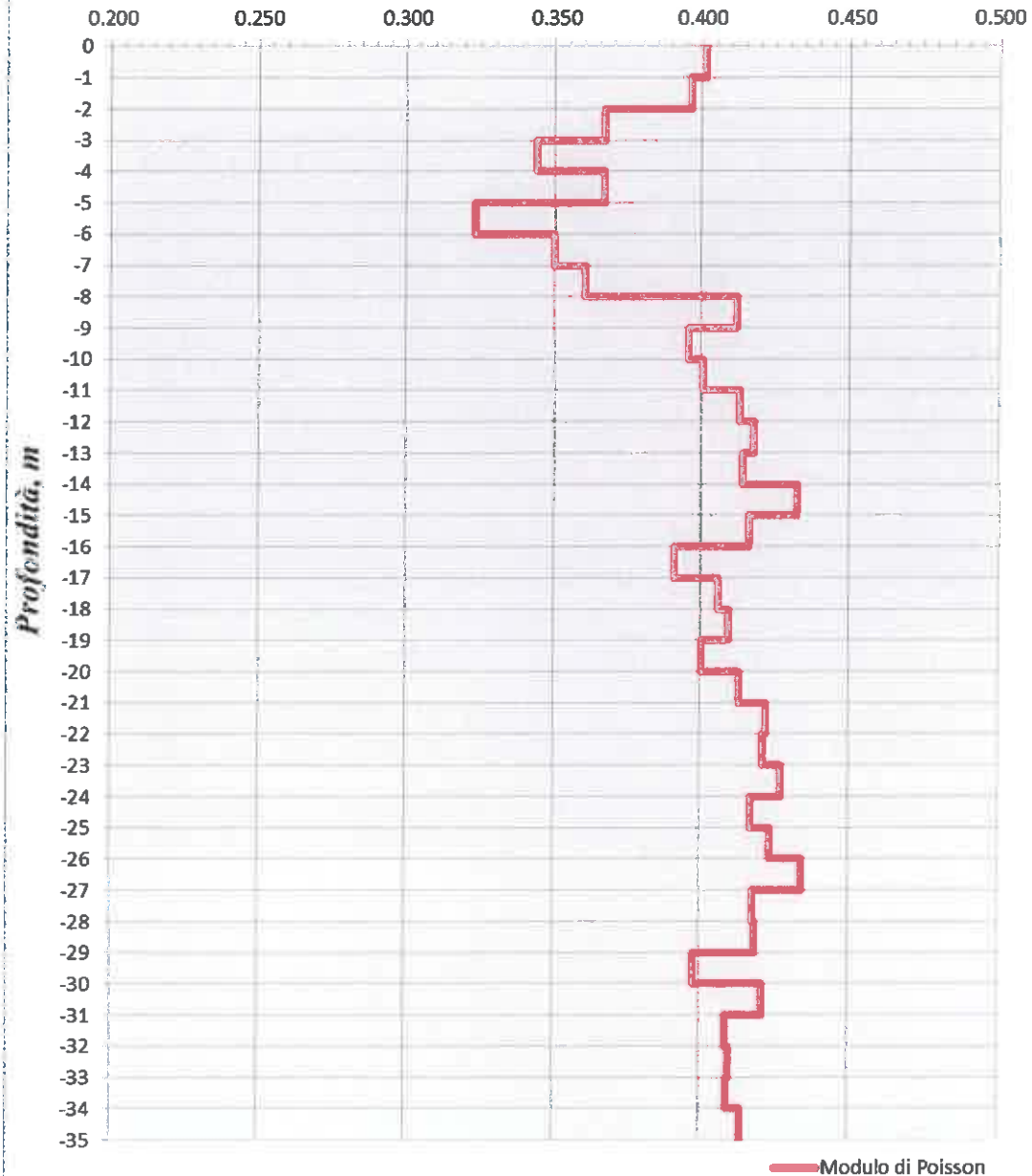


Cross-Hole 249-250
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



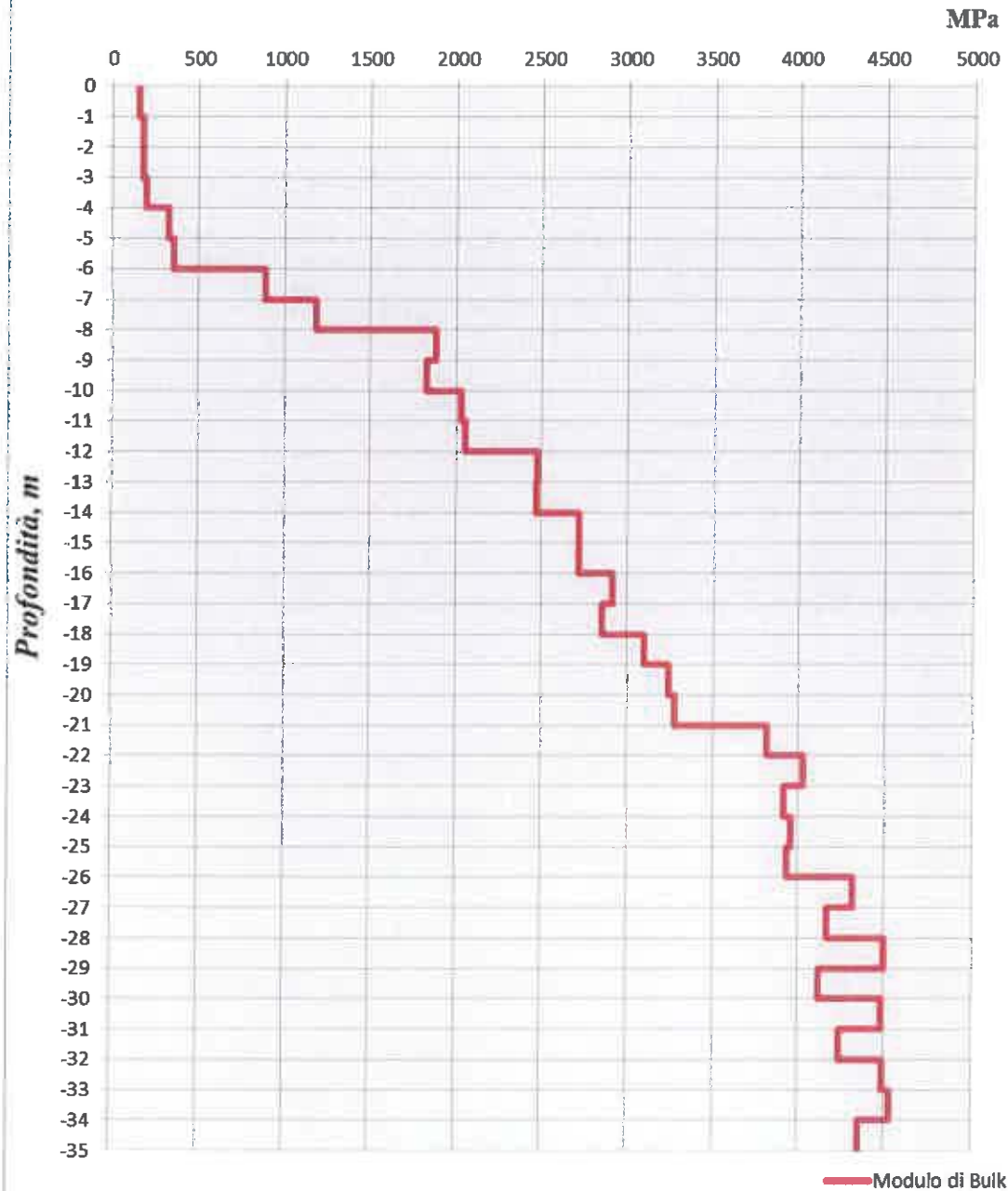


Cross Hole 249-250
Profilo modulo di POISSON



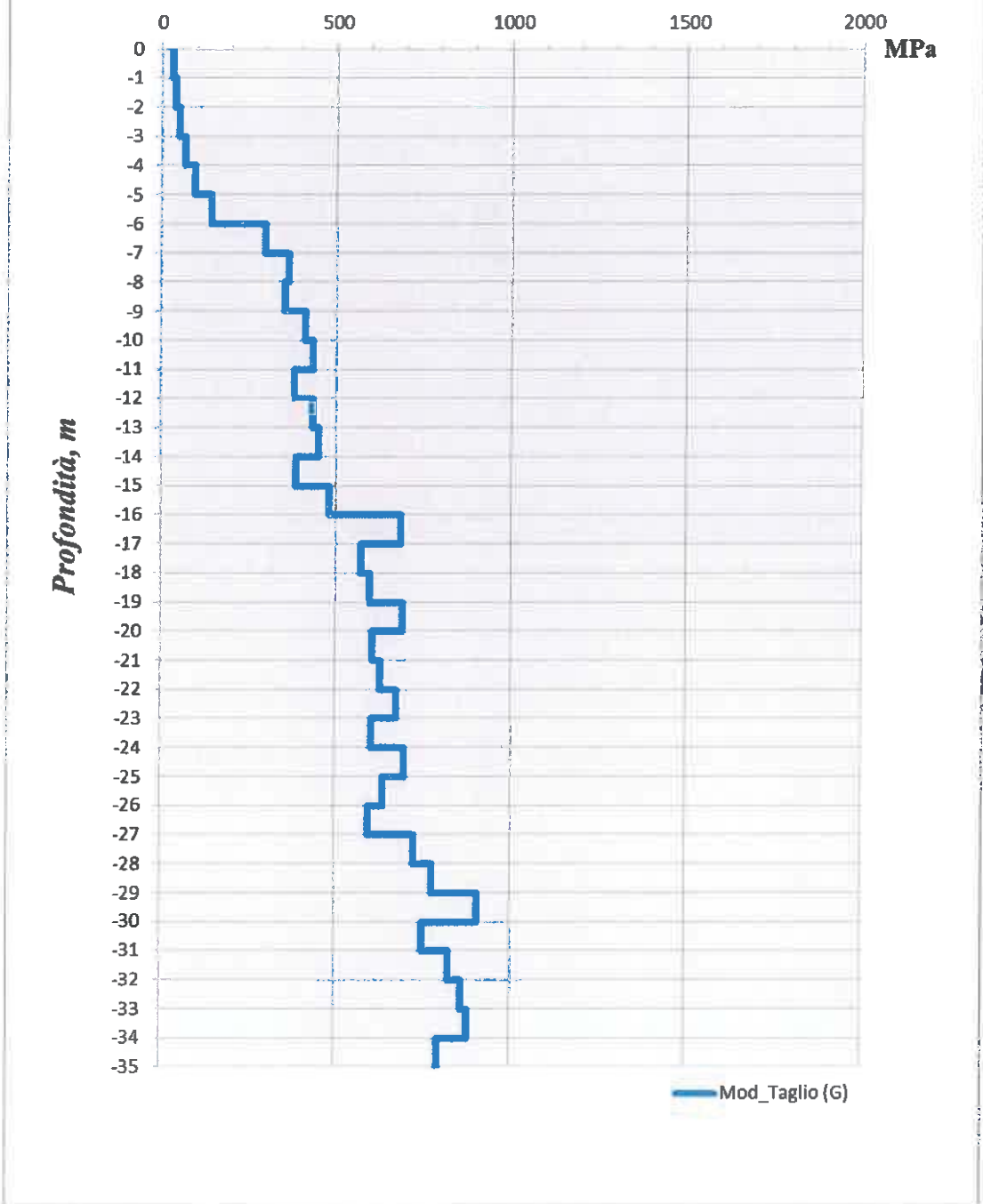


Cross-Hole 249-250
Profilo modulo di Bulk(K)



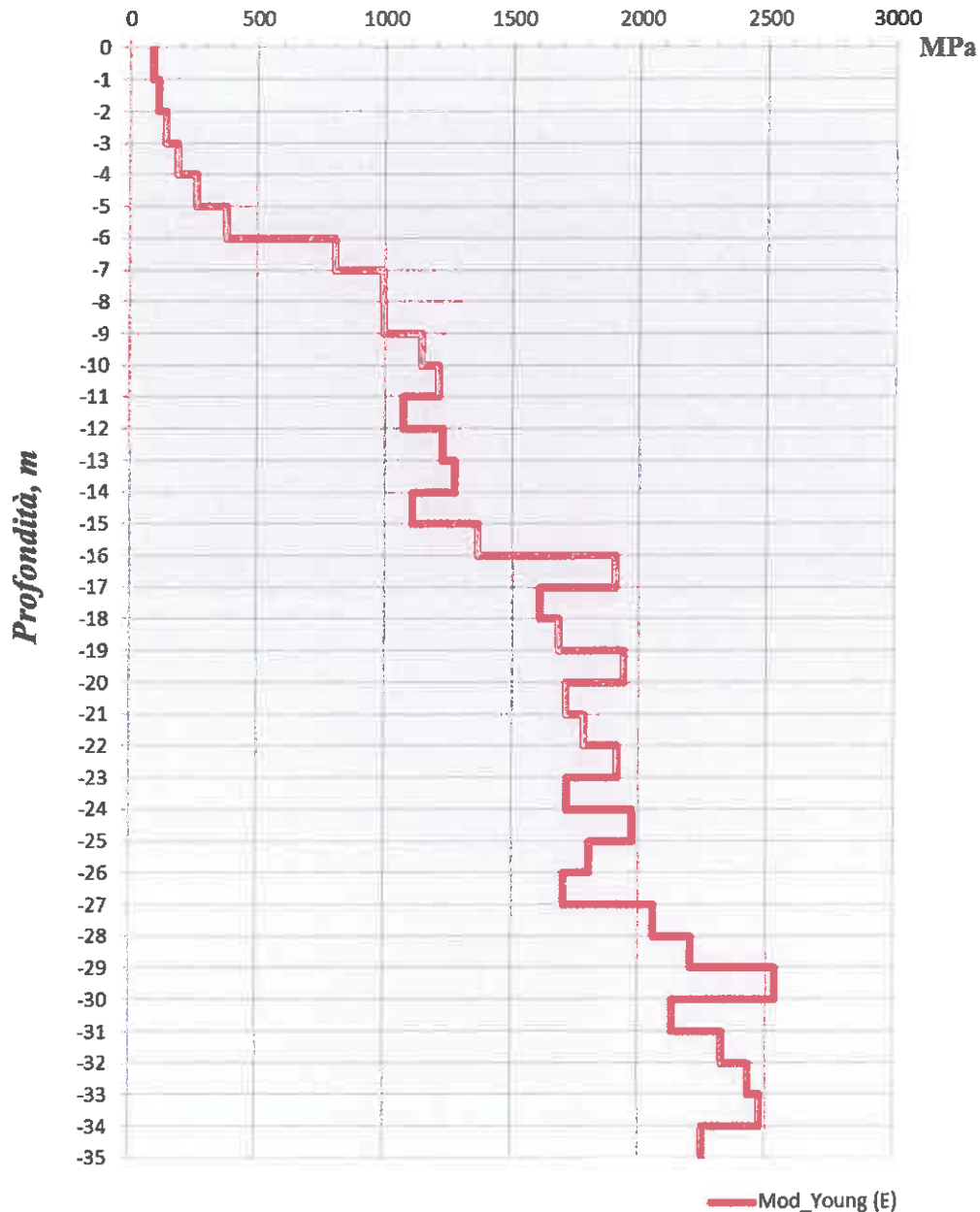


Cross-Hole 249-250
Profilo modulo di taglio (G)



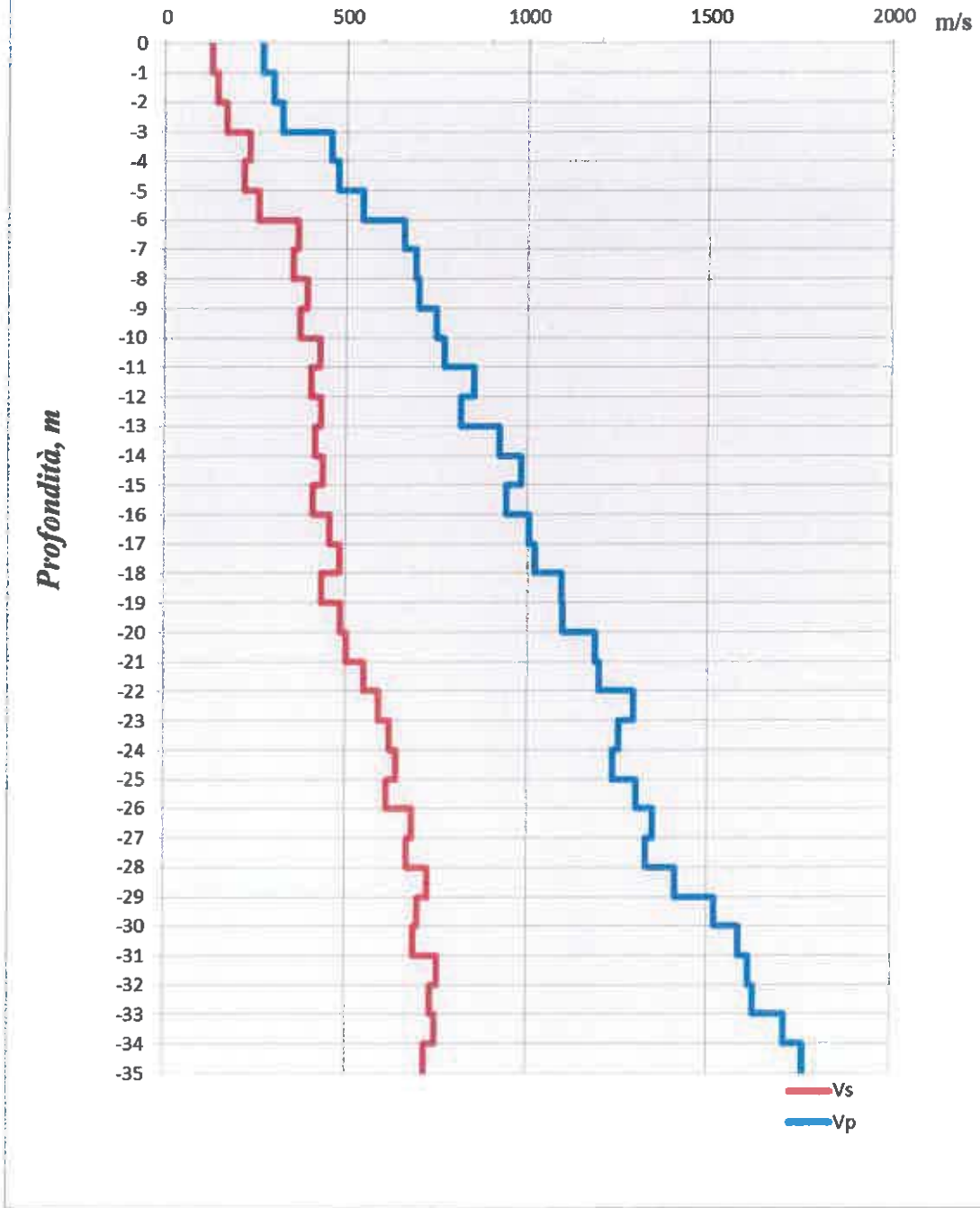


Cross-Hole 249-250
Profilo modulo di Young (E)



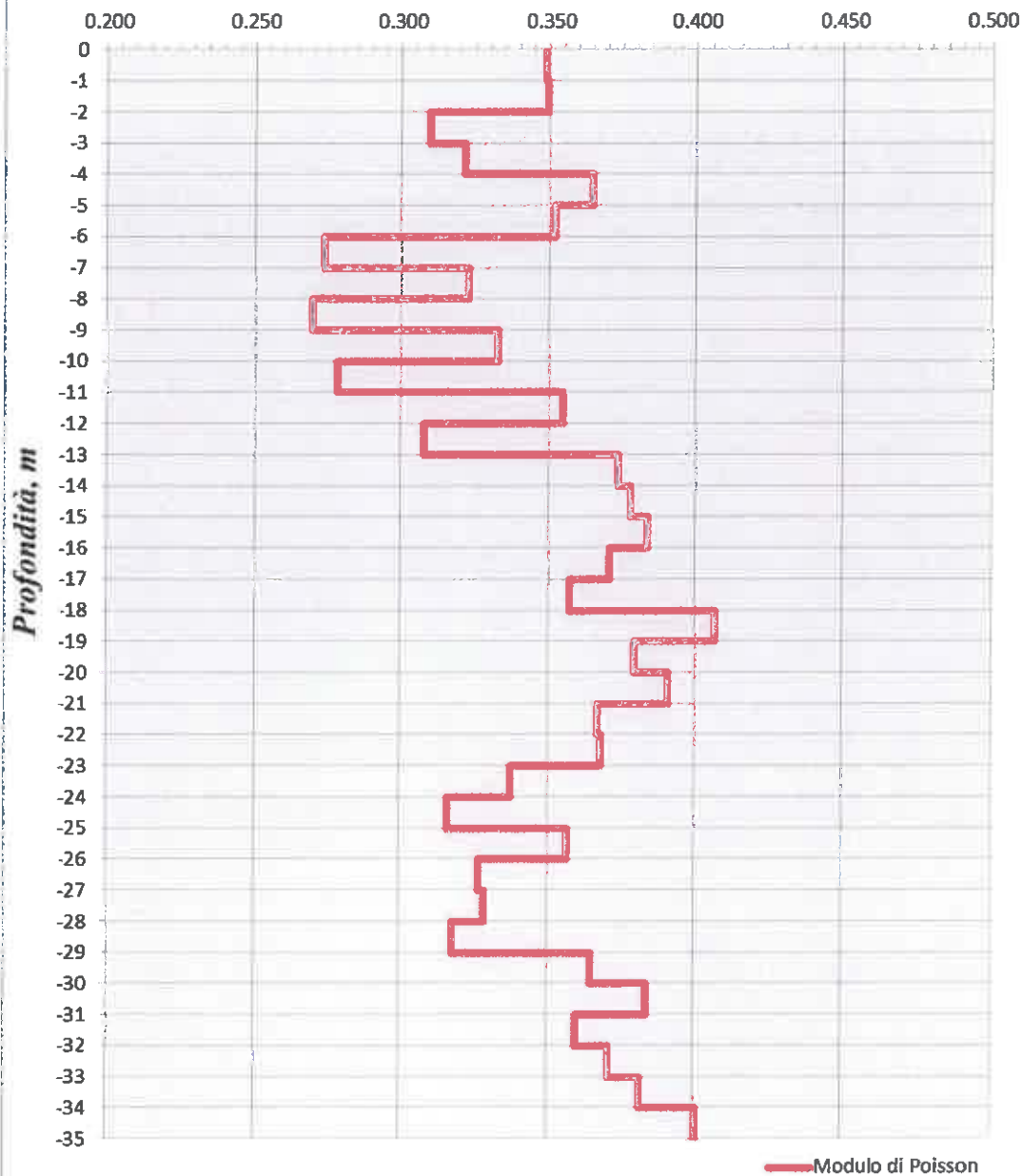


Cross-Hole 252-253
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



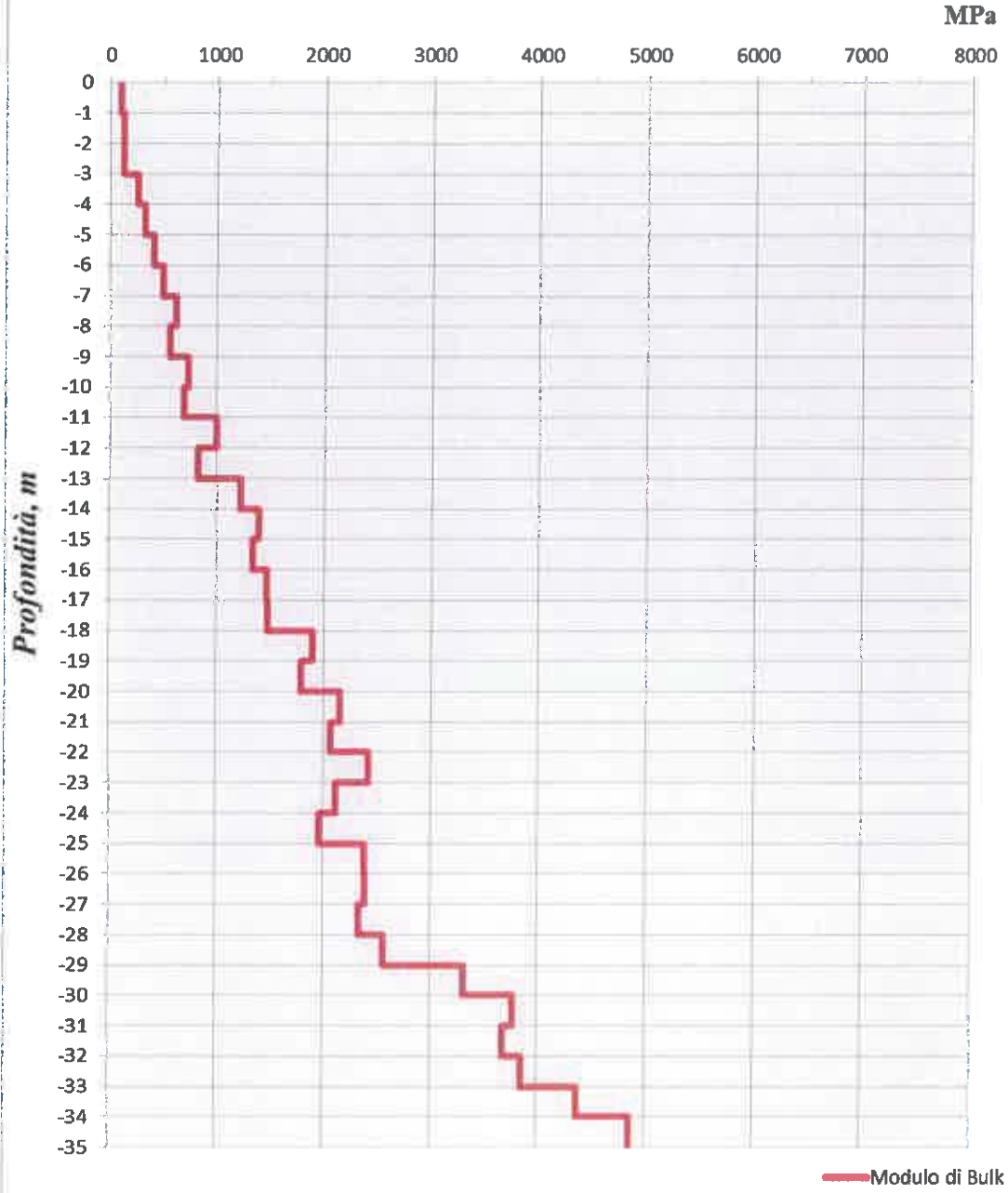


Cross Hole 252-253
Profilo modulo di POISSON



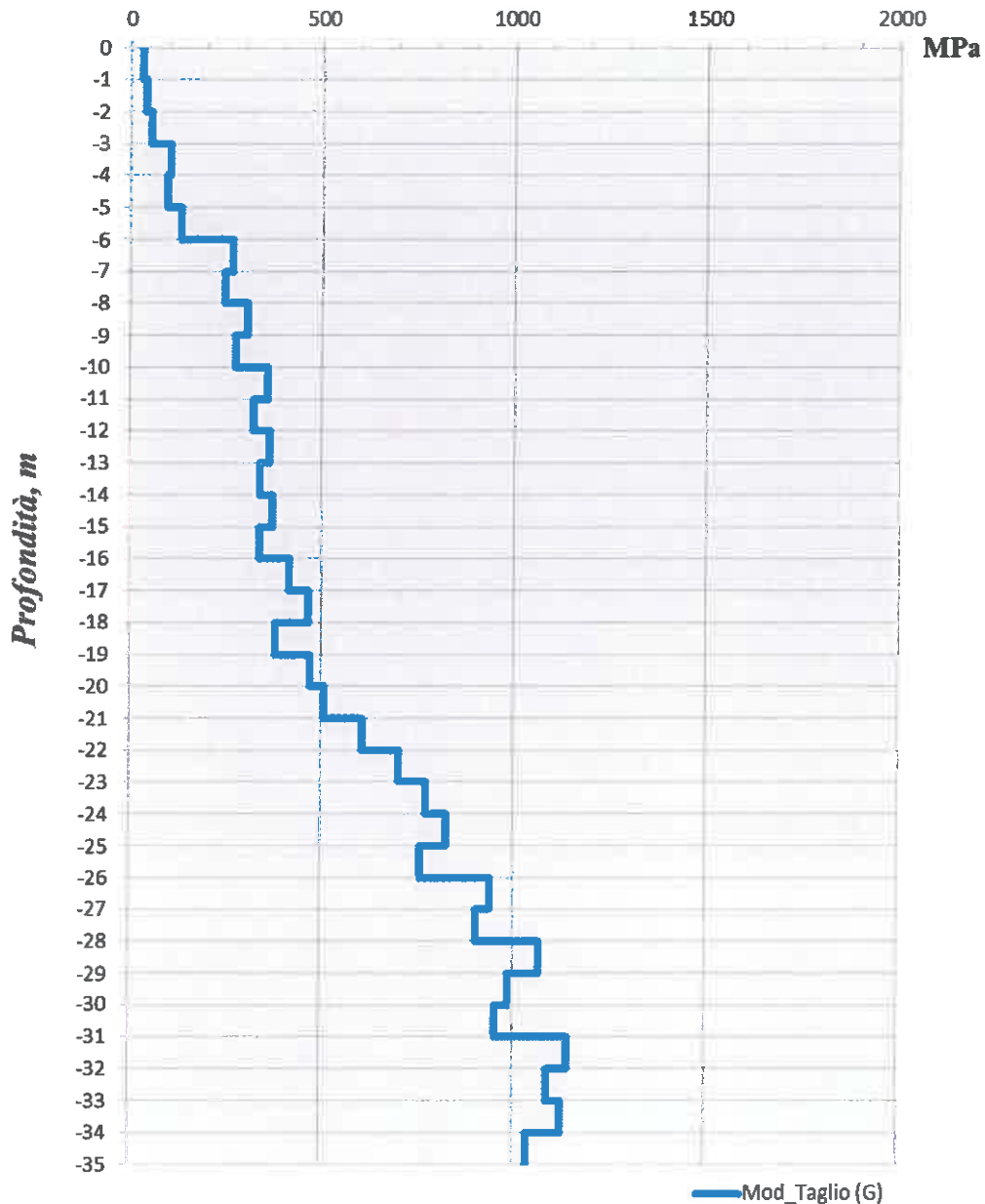


Cross-Hole 252-253
Profilo modulo di Bulk(K)



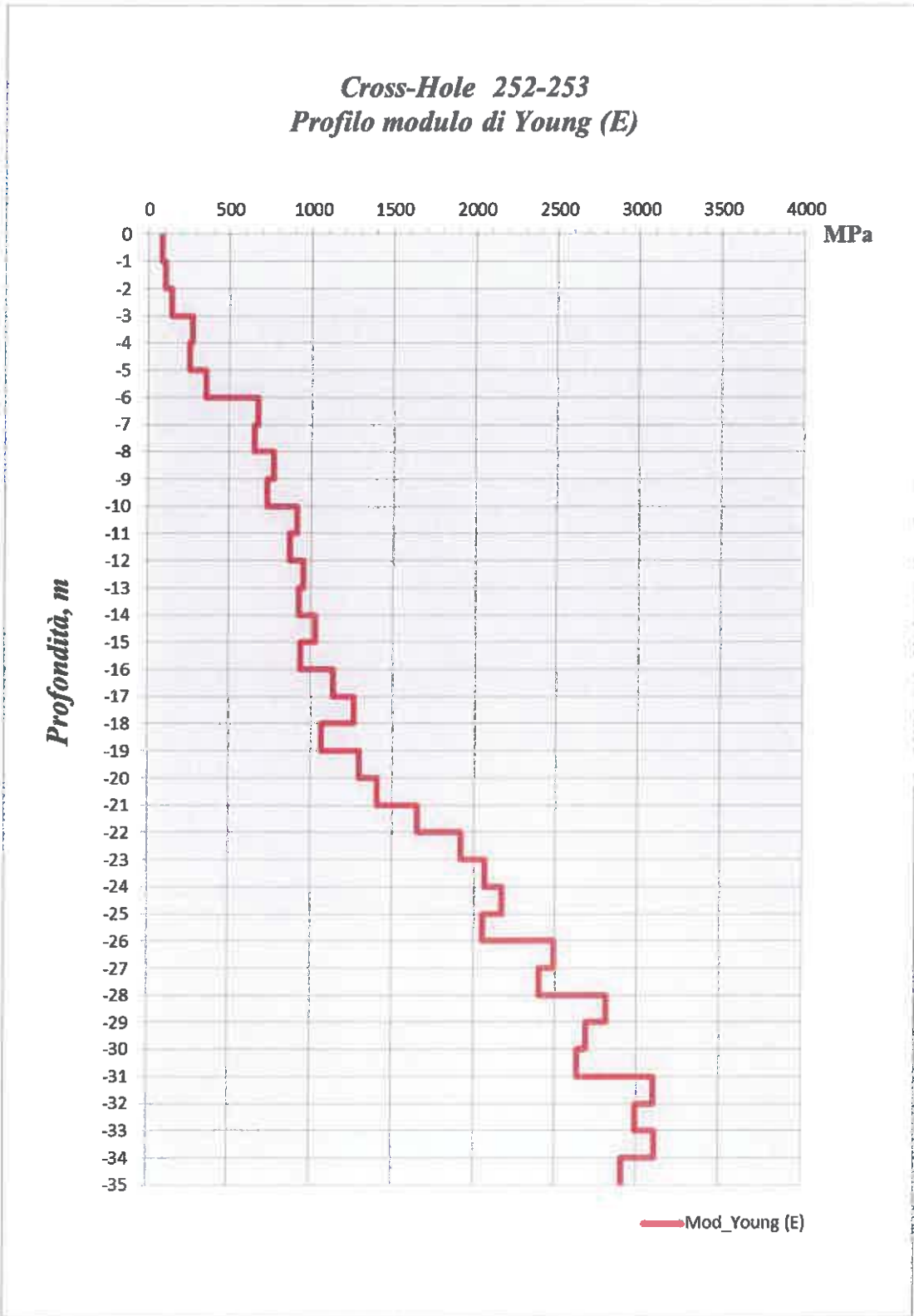


Cross-Hole 252-253
Profilo modulo di taglio (G)



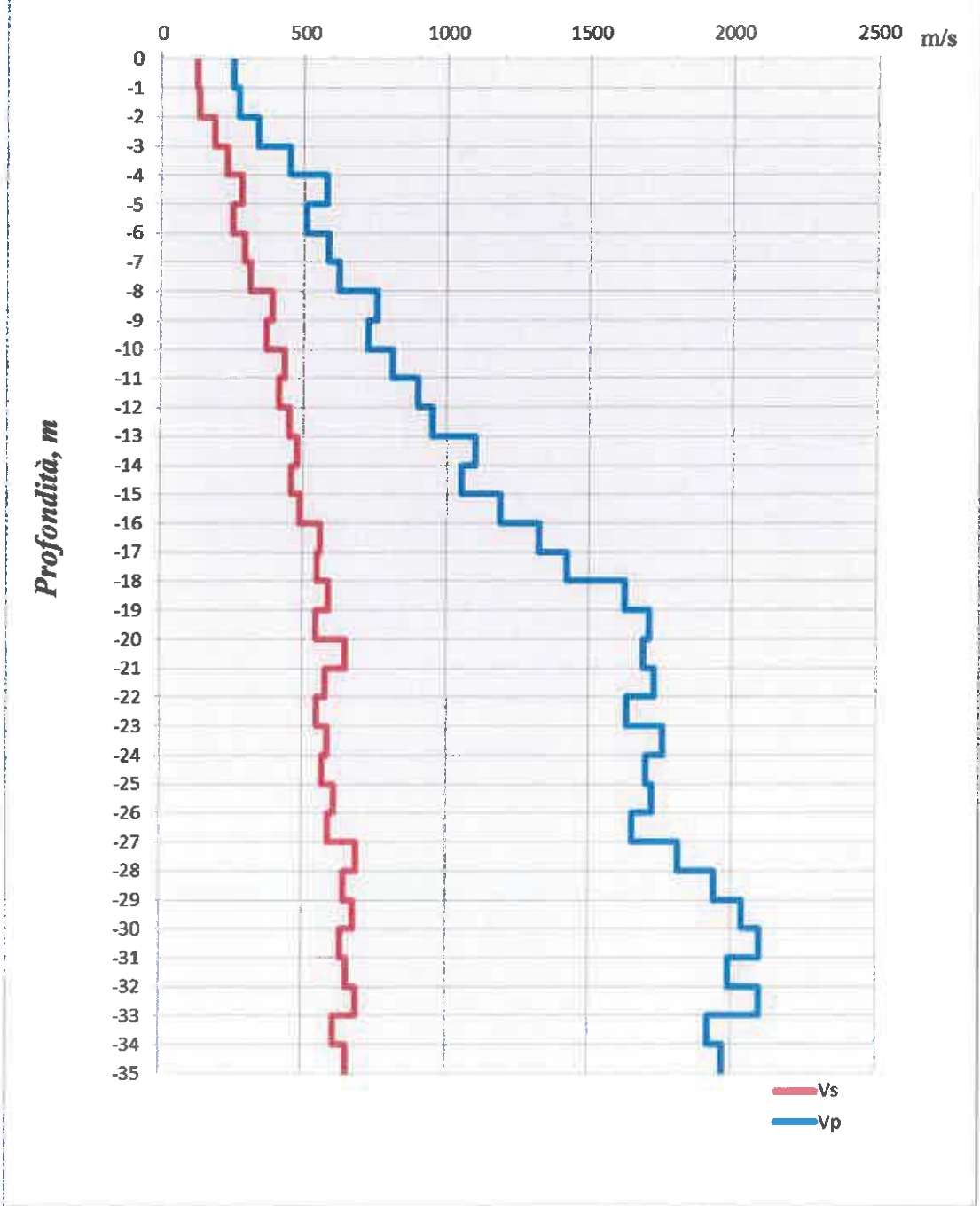


Cross-Hole 252-253
Profilo modulo di Young (E)



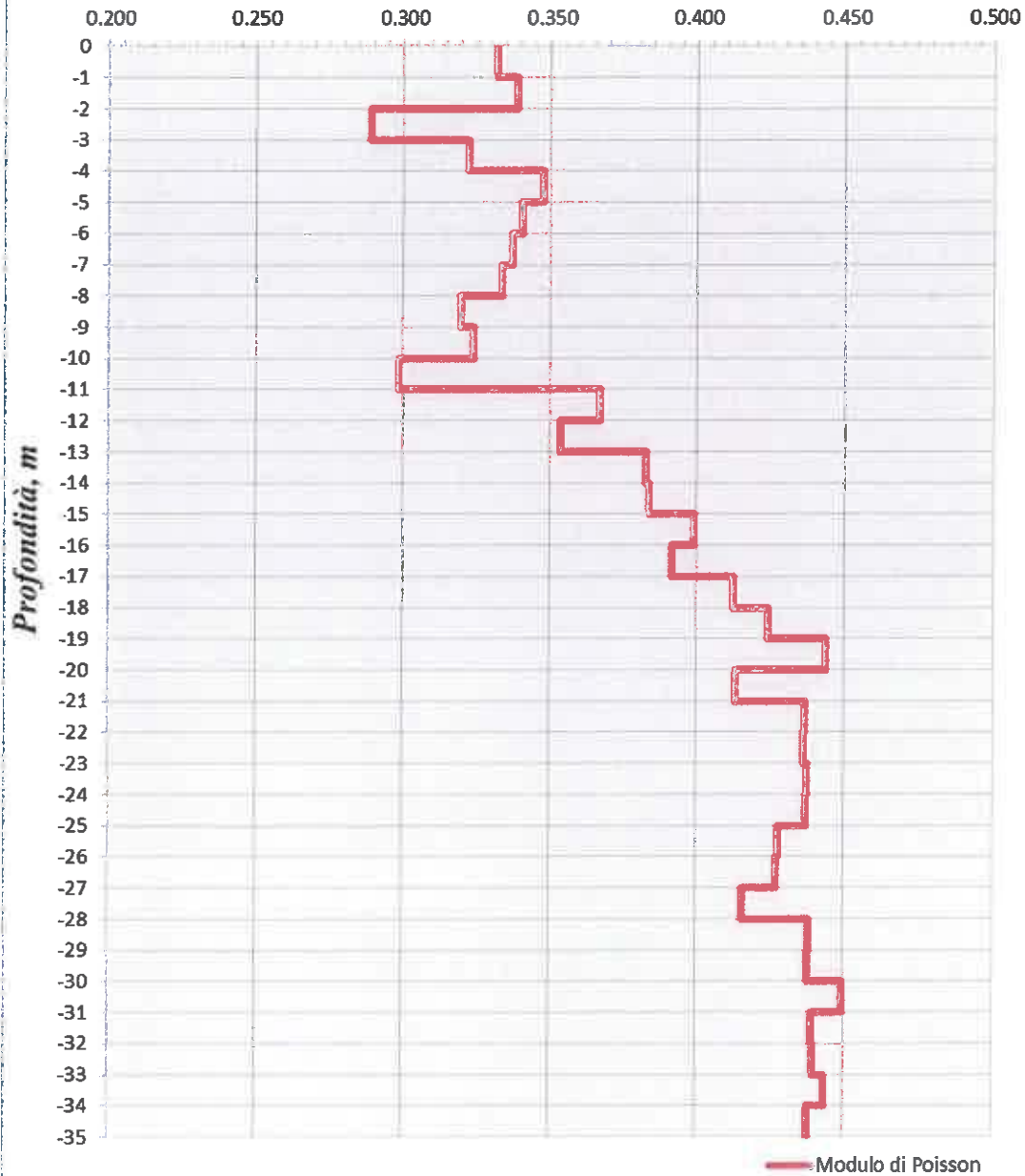


Cross-Hole 254-255
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



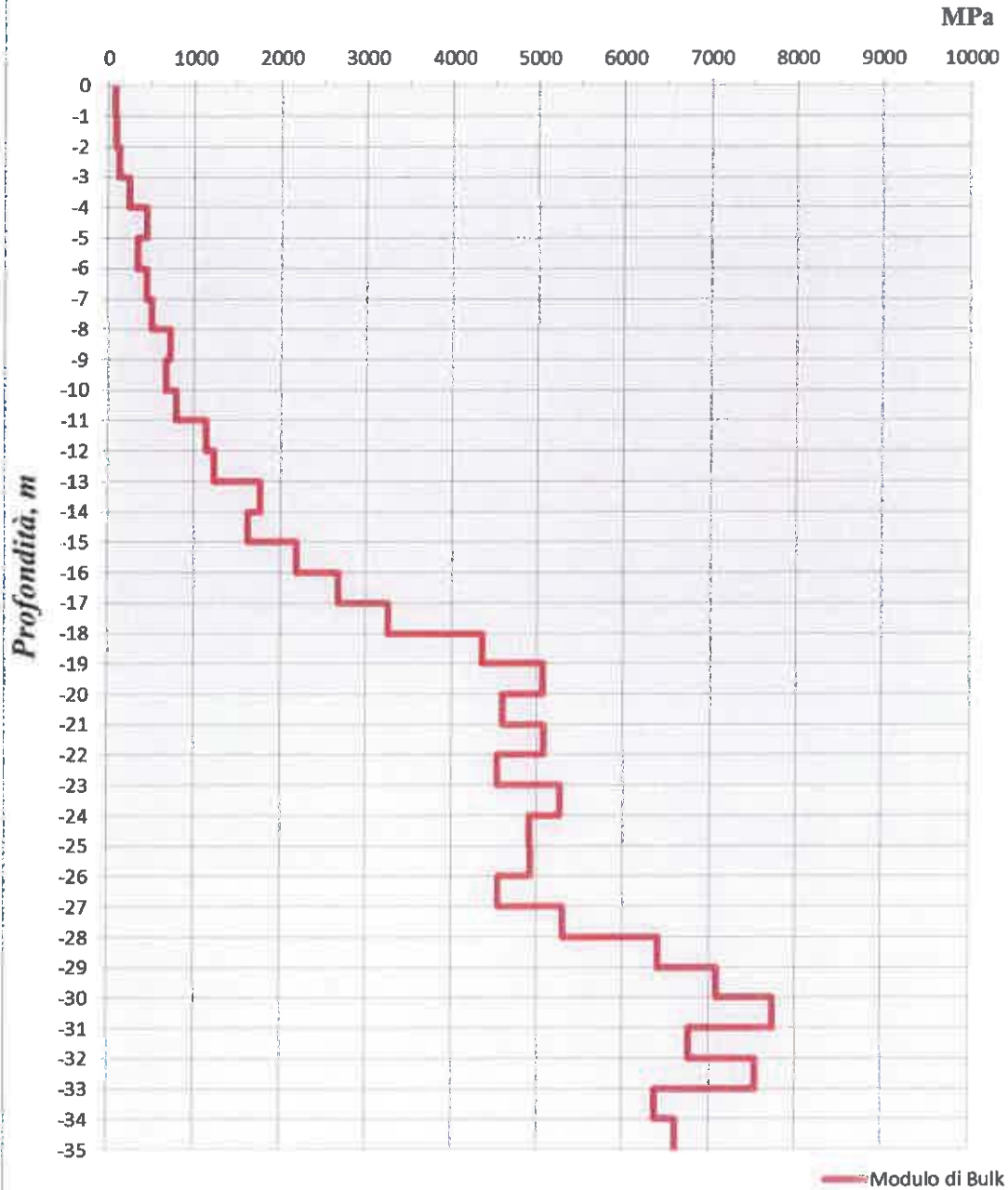


Cross Hole 254-255
Profilo modulo di POISSON



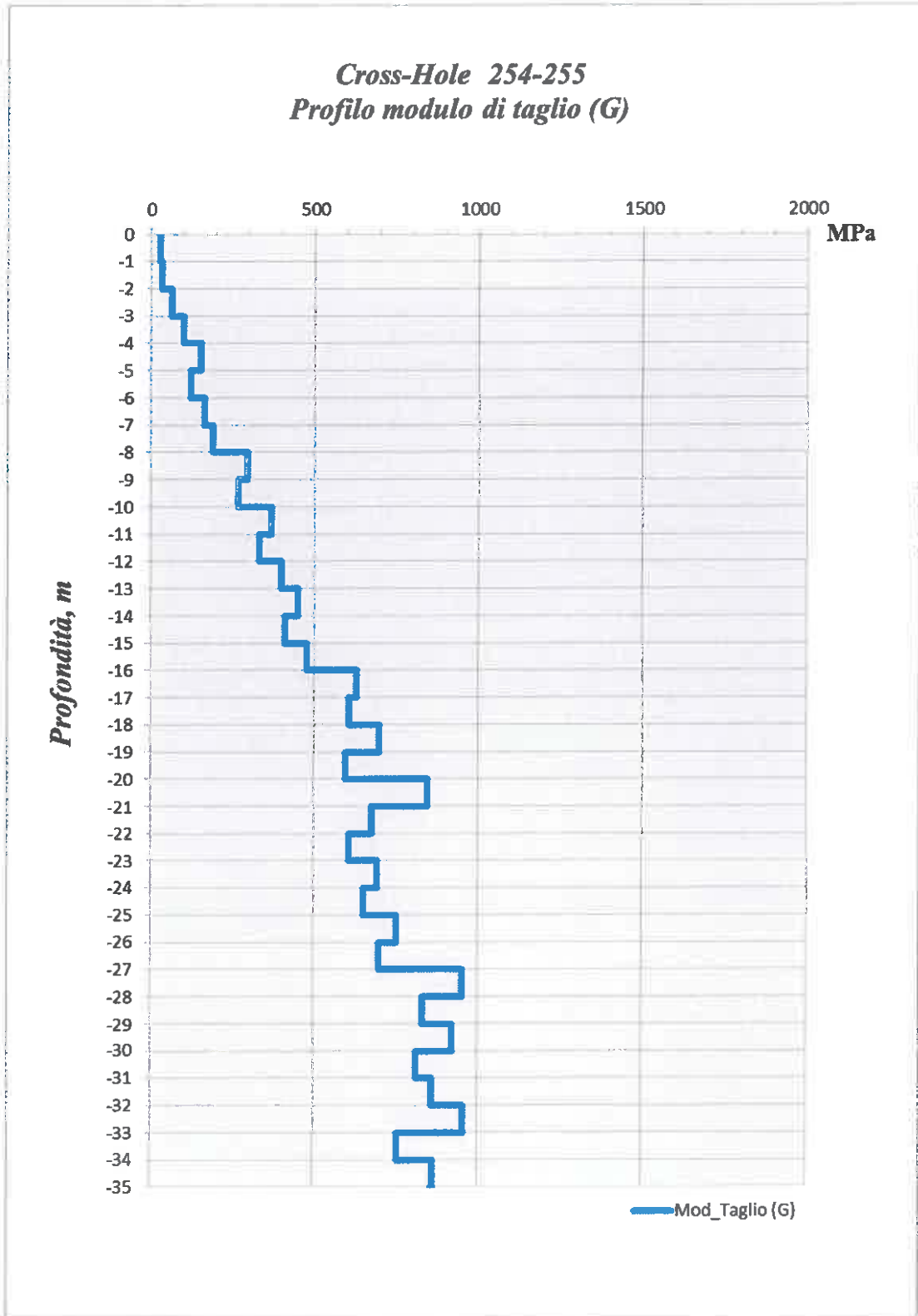


Cross-Hole 254-255
Profilo modulo di Bulk(K)



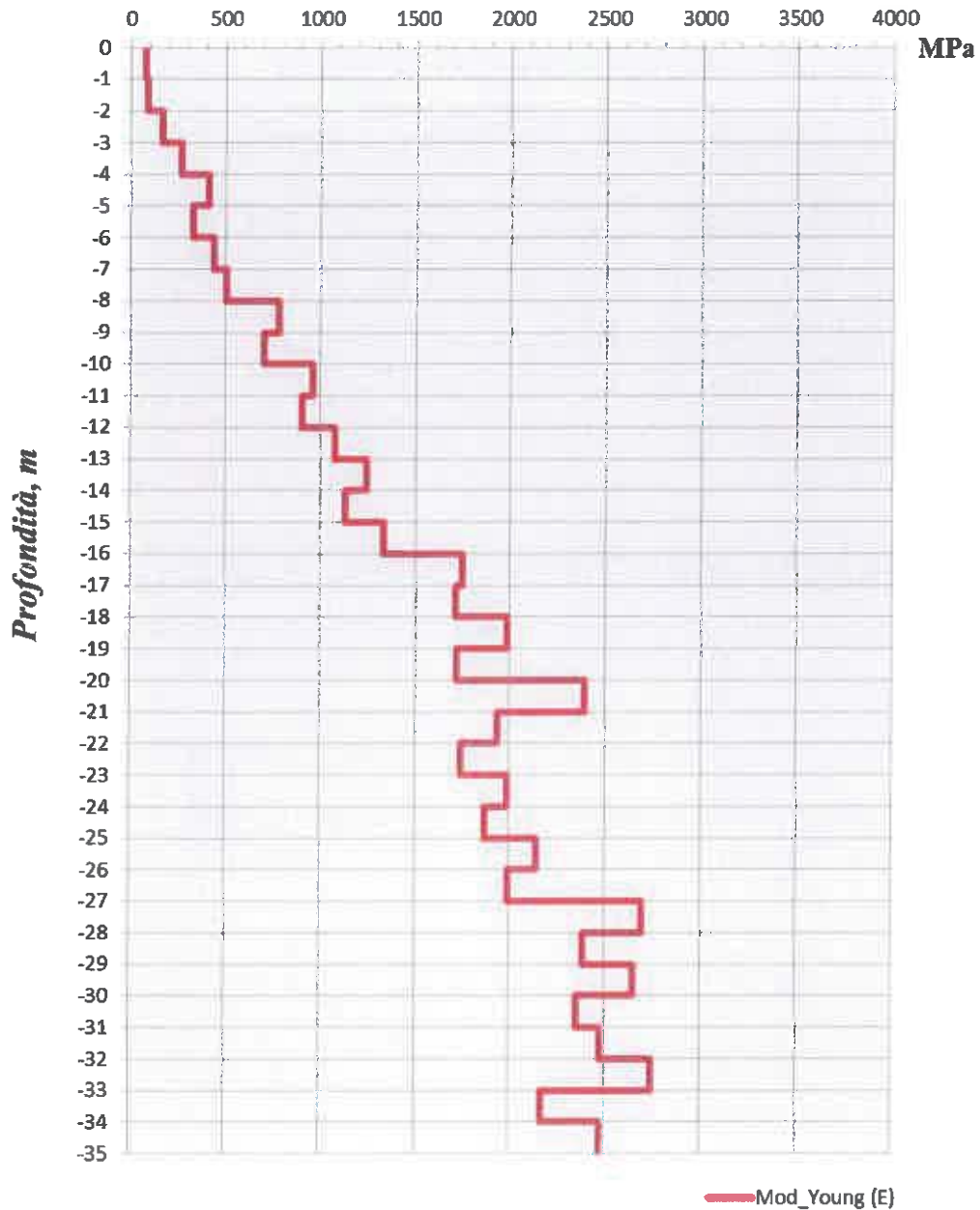


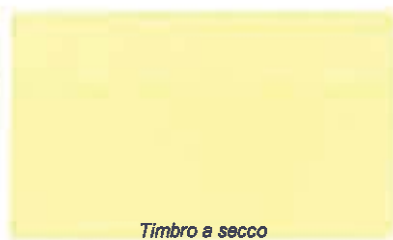
Cross-Hole 254-255
Profilo modulo di taglio (G)



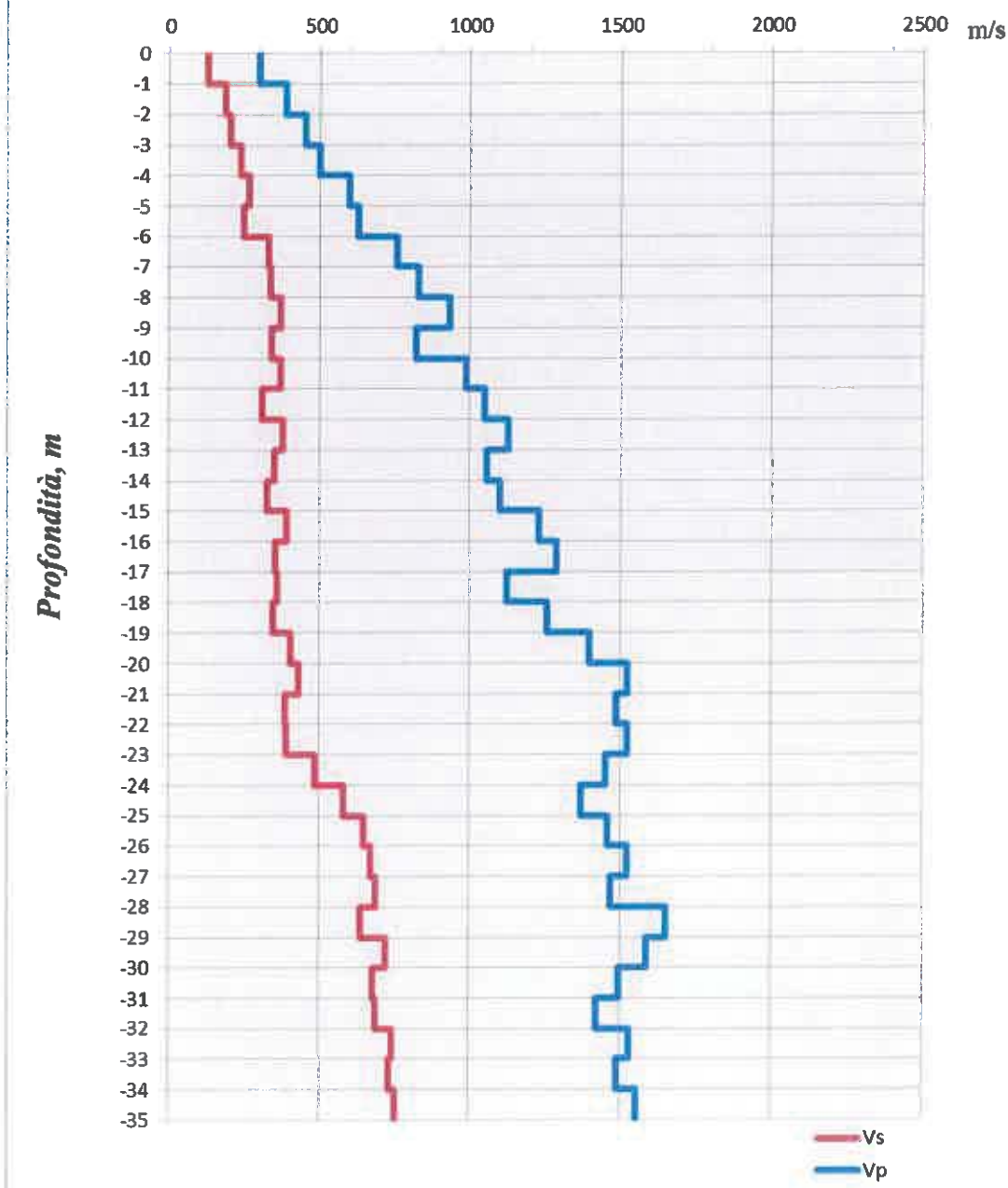


Cross-Hole 254-255
Profilo modulo di Young (E)



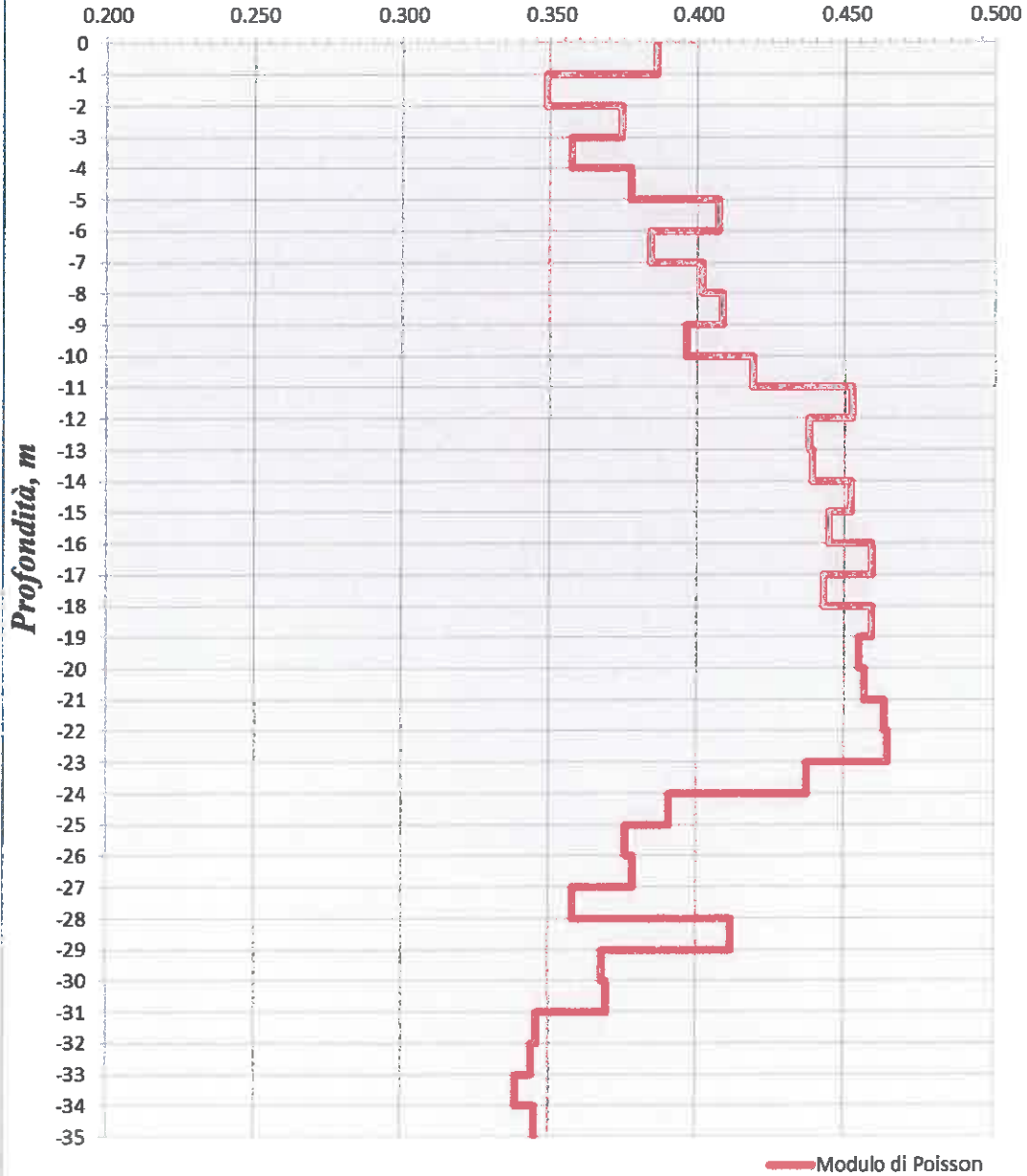


Cross-Hole 260-261
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



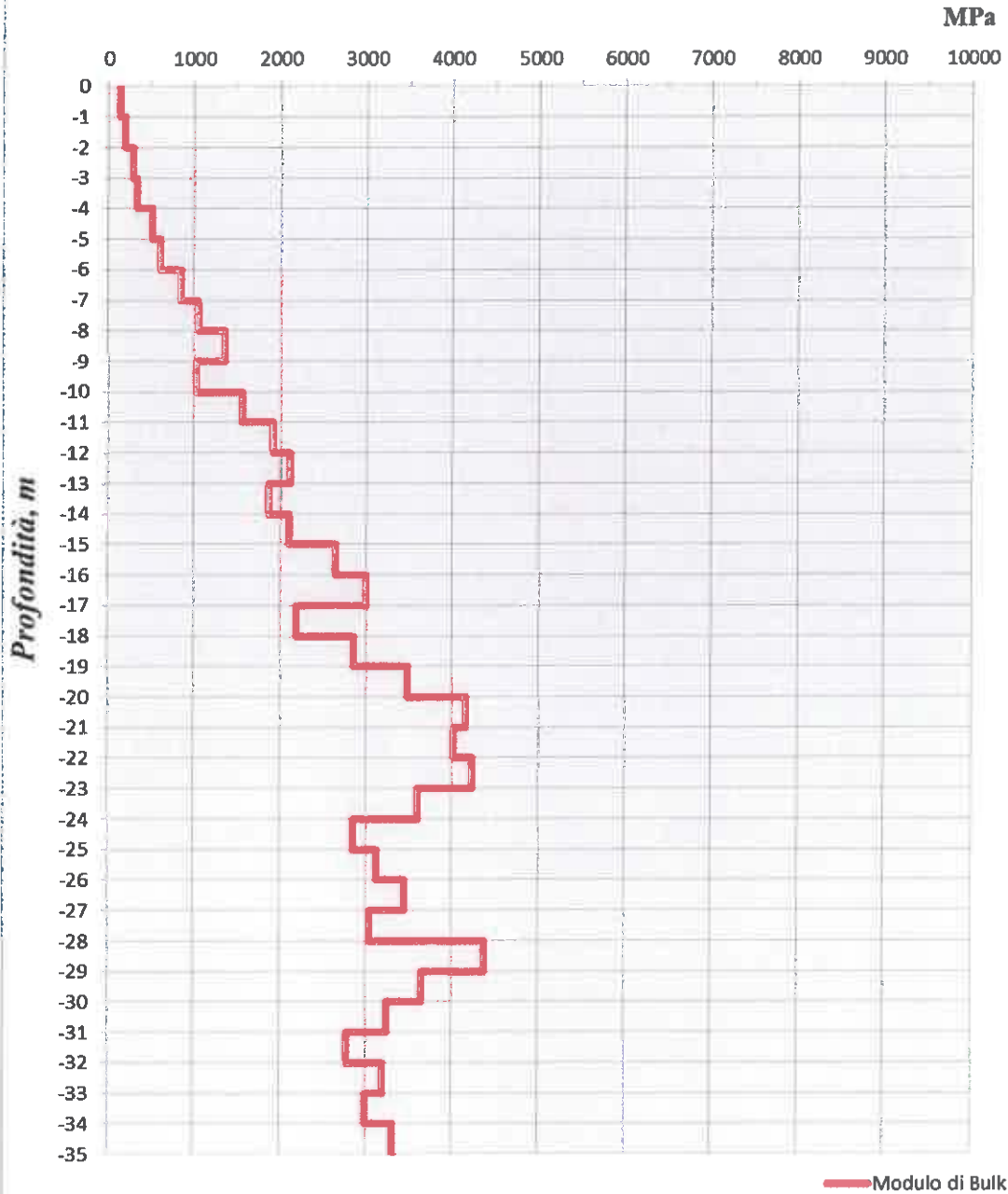


Cross Hole 260-261
Profilo modulo di POISSON



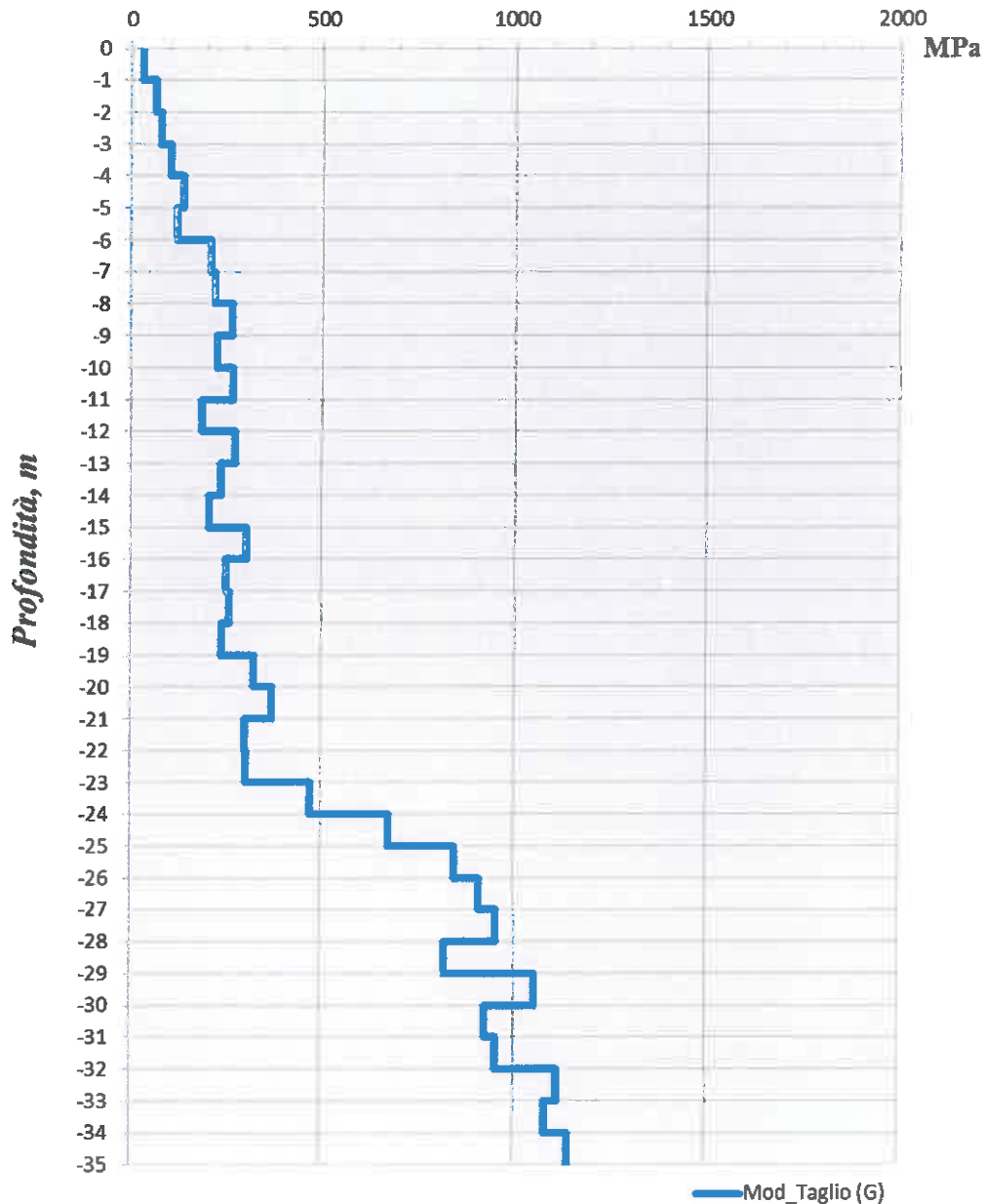


Cross-Hole 260-261
Profilo modulo di Bulk(K)



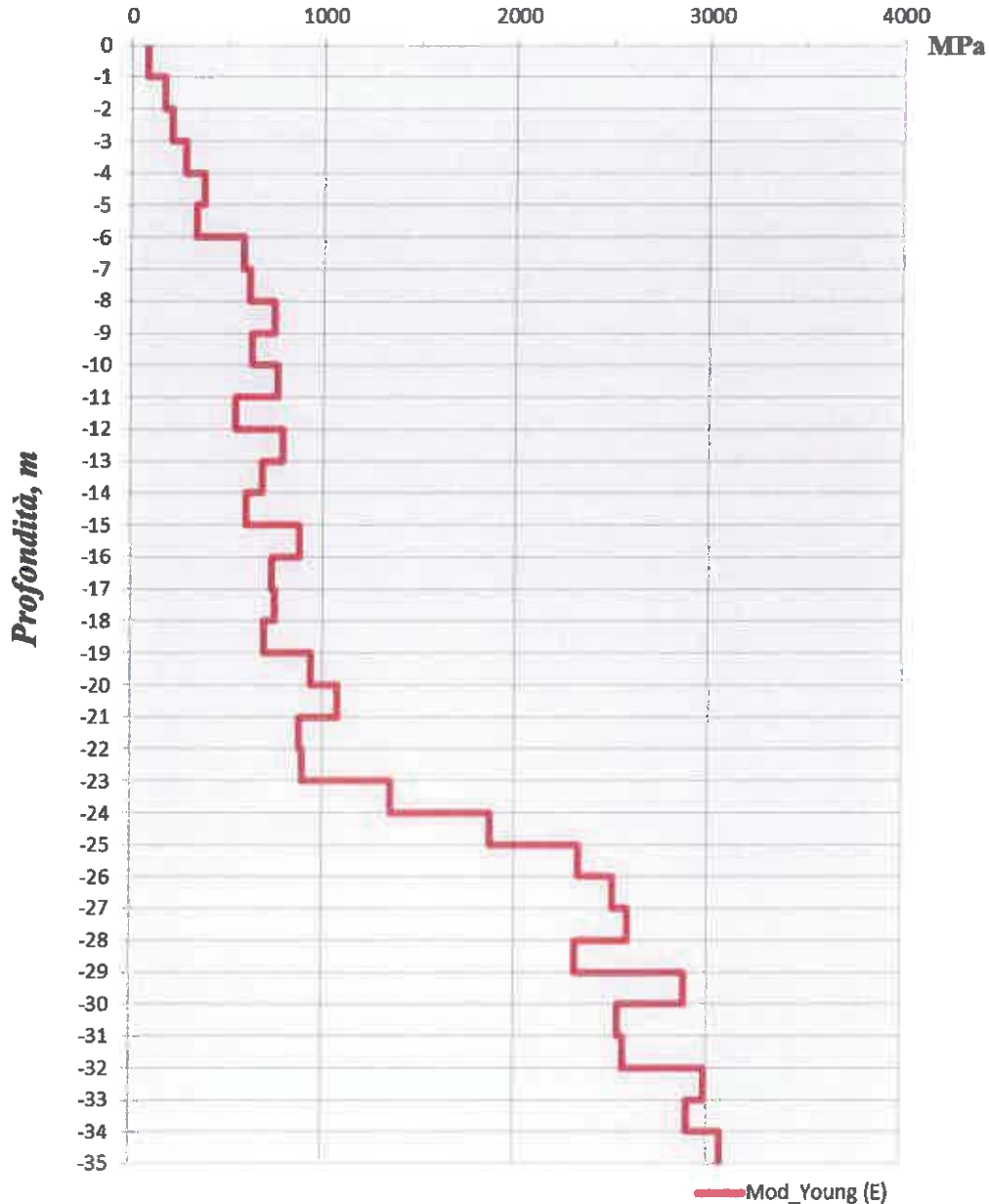


Cross-Hole 260-261
Profilo modulo di taglio (G)



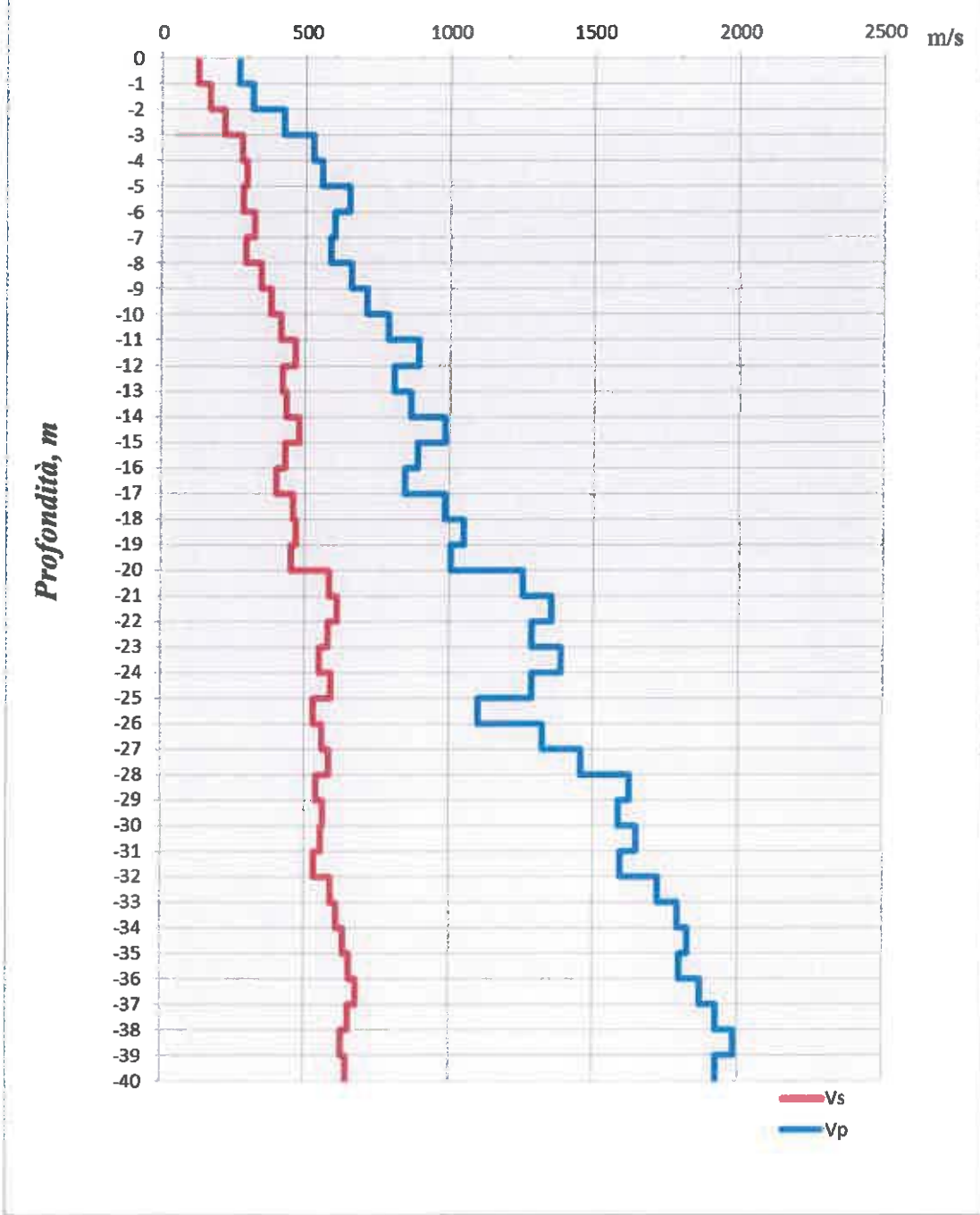


Cross-Hole 260-261
Profilo modulo di Young (E)



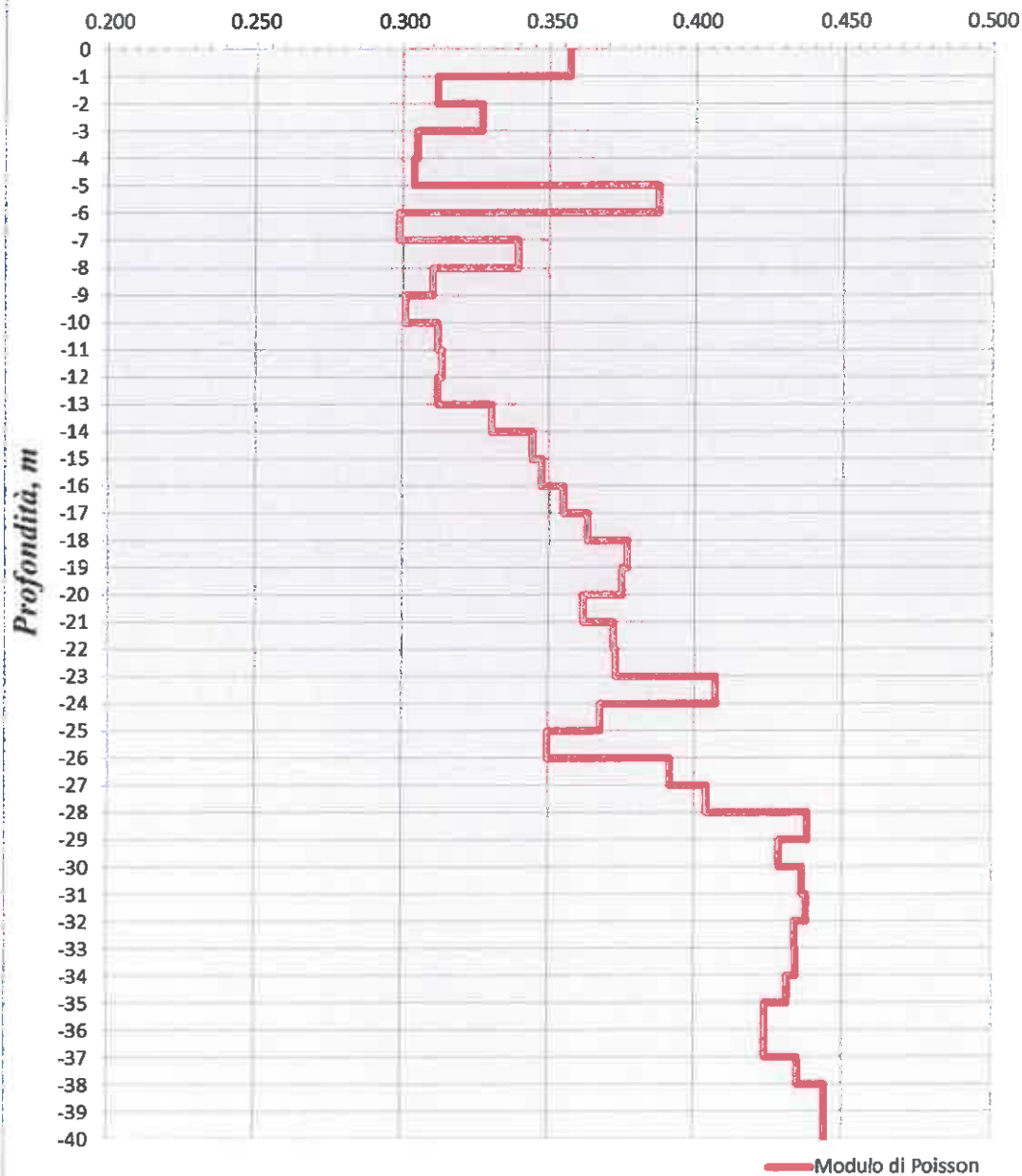


Cross-Hole 267-268
Grafico delle velocità "Intervallo-Profondità"



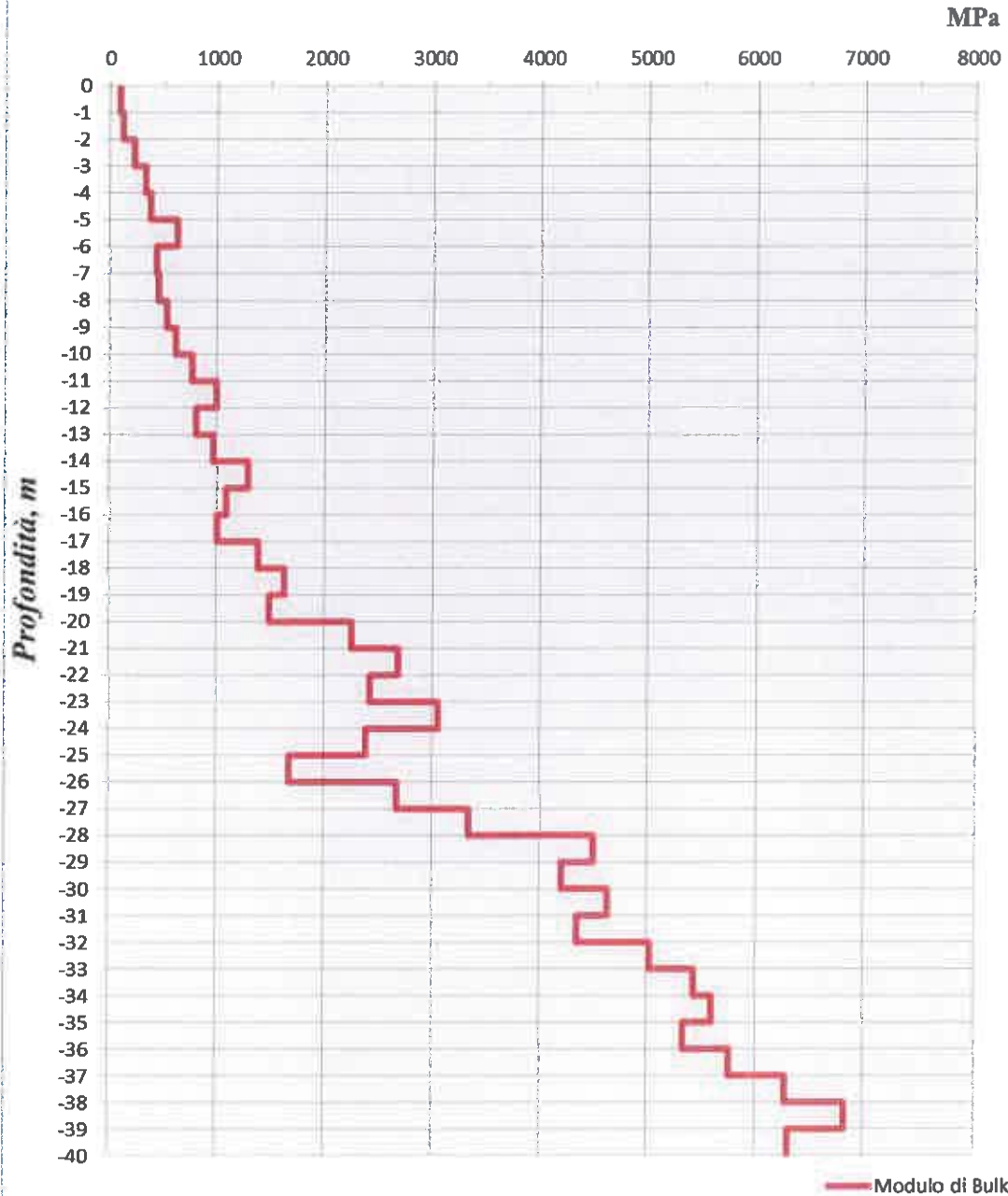


Cross Hole 267-268
Profilo modulo di POISSON



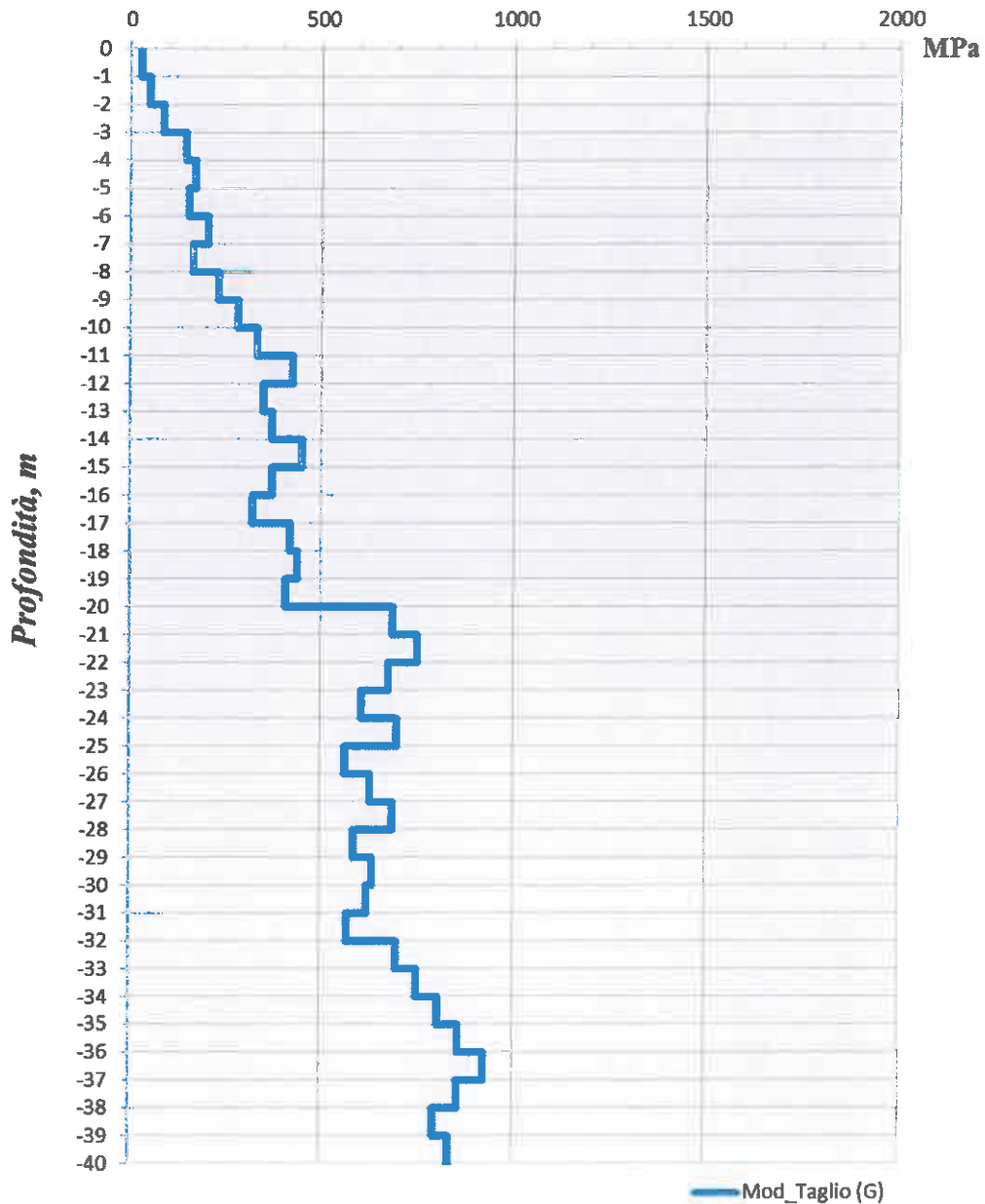


Cross-Hole 267-268
Profilo modulo di Bulk(K)





Cross-Hole 267-268
Profilo modulo di taglio (G)





5. Considerazioni conclusive

La risultanza della prova Cross-Hole, mediante il calcolo dei valori di velocità delle onde longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) e dei relativi moduli elastici dinamici, ha permesso di caratterizzare e quantificare l'aspetto sismico dei terreni oggetto di studio.

Dall'elaborazione dei dati acquisiti sono stati discretizzati dei modelli di velocità di propagazione delle Onde P ed S, dai quali è emerso un alto grado di correlazione con l'assetto litologico del substrato indagato.

Si è fornita, inoltre, una quantificazione degli aspetti fisici per ogni punto di misura, e cioè per orizzonti aventi spessore di 1,0 m a partire dal piano di campagna, fino alla massima profondità di indagine.

In osservanza al Nuovo NTC di cui al D.M. del 17 Gennaio 2018, ai fini dell'azione sismica di progetto, si è calcolato il valore di $V_s 30$ (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 metri), relativamente ai diversi punti di indagine, assegnando così la relativa categoria di sottosuolo di appartenenza.

Sito	$V_s 30$ m/s	Cat. di Suolo NTC 2018
CH 243-244	348,05	C
CH 246-247	398,49	B
CH 249-250	371,56	B
CH 252-253	363,14	B
CH 254-255	368,76	B
CH 260-261	338,88	C
CH 267-268	368,08	B

Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

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



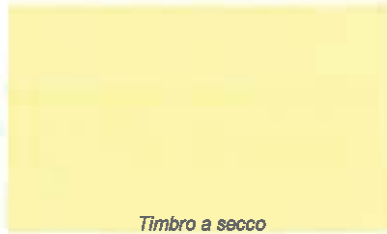
6. Documentazione fotografica



Martello fondo foro ad ancoraggio pneumatico




Geofono 3D in foro ad ancoraggio pneumatico



AQ D.G. 26/18 - C.A. n° 1

Servizi di indagini geognostiche e monitoraggio geomorfologico relativi al Progetto Esecutivo "Collegamento viario compreso tra lo svincolo della SS514 "di Chiaramonte" con la SS115 e lo svincolo della SS194 'Ragusana'

Lotto 4

	A	Stratigrafie sondaggi geognostici				
	B	Stratigrafie pozzetti esplorativi				
	C	Indagini geofisiche: MASW				
	D	Indagini geofisiche: Down-hole				
	E	Indagini geofisiche: Cross-hole				
	F	Indagini geofisiche: tom. Sism. 2D				
	G	Rilievo masse ferrose				
	H	Monitoraggio inclinometrico				
	I	Monitoraggio piezometrico				
	L	Prove di laboratorio geotecnico				
	M	Analisi chimiche				
	N	Rilievi GPS				
	O	Prove di carico su piastra				
	Commissa	Rev.	Periodo di indagine	Data Emissione	Redazione (RS)	Verifica (VRSQ)
526/1	0	Giugno-Ottobre 2021	05/10/2021	dott. geol. Marco Pirrone	dott. geol. Salvatore Manta	dott. ing. Vincenzo Aiena



Indice

1.	Premessa	2
2.	Descrizione e finalità della tomografia sismica superficiale	6
2.1	Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione	6
3.	Interpretazione della tomografia sismica superficiale onde P	7
3.1	Analisi dei risultati relativo alla tomografia sismica superficiale delle onde P.	7
3.2	Note sui risultati delle indagini tomografiche	11
4.	Considerazioni conclusive	11
4.1	Dromocrone	12
5.	Documentazione fotografica	15



1. Premessa

Su incarico di Anas S.p.A nell'ambito del Collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della S.S. 194 "Ragusana", la scrivente SIDERCEM s.r.l. - *Istituto di Ricerca e Sperimentazione*, ha provveduto ad effettuare n°6 tomografie sismiche.

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018.

Le lunghezze totali, le distanze intergeofoniche e le caratteristiche di acquisizione per ciascuna prospezione sono riassunte nella tabella seguente:

Tomografia Sismica Lotto 4	Lunghezza Array (m)	Step Geofoni (m)	Offset (m) scoppi esterni	Offset (m) scoppi interni	Sampling Interval (msec)
BSE207	115,0 m	5,0	5,0	2,5	0,128
BSE208	80,50 m	3,50	3,50	1,75	0,128
BSE209	115,0 m	5,0	5,0	2,5	0,128
BSE210	115,0 m	5,0	5,0	2,5	0,128
BSE212	115,0 m	5,0	5,0	2,5	0,128
BSE213	115,0 m	5,0	5,0	2,5	0,128

Tabella 1.0 Geometria e caratteristiche di acquisizione della prospezione sismica

Si riporta di seguito l'ubicazione delle indagini effettuate (Fig.1.1-1.6)



Fig. 1.1 Ubicazione tomografia sismica BSE207



Fig. 1.2 Ubicazione tomografia sismica BSE208



Fig. 1.3 Ubicazione tomografia sismica BSE209



Fig. 1.4 Ubicazione tomografia sismica BSE2010



Fig. 1.5 Ubicazione tomografia sismica BSE212



Fig. 1.6 Ubicazione tomografia sismica BSE213



2. Descrizione e finalità della tomografia sismica superficiale

Il metodo della sismica consiste nel caratterizzare dinamicamente, tramite la misura delle velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) o delle onde di taglio (Onde S), le unità litologiche presenti nell'area di indagine e determinarne così, la geometria, gli spessori e i contatti delle unità litotecniche riscontrate. In particolare, il metodo della tomografia sismica superficiale, consente di individuare apprezzabili variazioni delle velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo, permettendo di ottenere un modello di distribuzione delle velocità mediante la restituzione di una mappa di tipo "profondità-velocità", dove è possibile ricostruire con buona approssimazione, la geometria dei materiali di copertura e anche, tramite la variazione progressiva della velocità nel sottosuolo, individuare quelle aree in cui i materiali risultano avere maggior grado di costipazione e quindi migliori caratteristiche fisico-meccaniche.

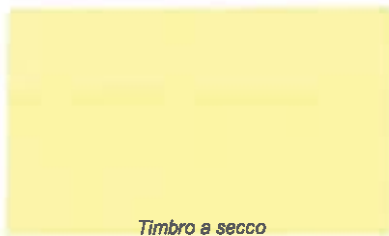
2.1 Attrezzatura utilizzata e metodologia d'esecuzione

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è una stazione sismica a 24 canali ECHO 12-24/2002 della "Ambrogeo", con n°24 geofoni verticali, aventi un periodo proprio di 4,5 Hz, una mazza battente di 8 kg, a sua volta dotata di uno starter da accoppiare al circuito trigger.

La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, lungo la direzione dello stendimento, sollecitazioni dinamiche verticali, per la precisione n°7 battute, per la generazione delle onde sismiche e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie a distanze note e prefissate, mediante sensori (geofoni) a componente verticale. Gli stendimenti sono stati eseguiti con una disposizione di n° 24 geofoni per le registrazioni degli arrivi delle fasi

A seguire la tipologia di array e la configurazione delle energizzazioni:

- n.24 Geofoni
- n. 7 energizzazioni mediante mazza battente di 8,0 kg
 - n.2 shots esterni da geofono esterni G1 e G24
 - n.5 shots interni tra geofoni G4 e G5, G8 e G9, G12 e G13 , G16 e G17, G20e G21

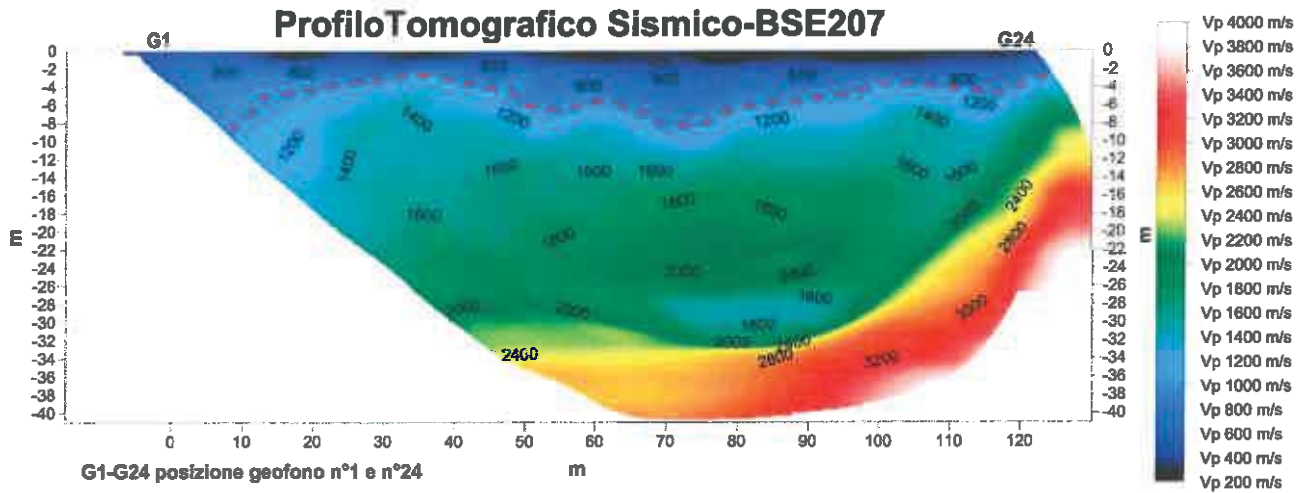


3. Interpretazione della tomografia sismica superficiale onde P

Il sismogramma registrato, è stato elaborato con un software denominato “Echo 12-24”, mediante procedura di “picking”, cioè in ogni traccia del sismogramma viene individuato il tempo di arrivo delle onde P, successivamente, si è proceduto ad utilizzare per mezzo di un software dedicato, il “Rayfract 2.65”, un codice di elaborazione tomografica denominato come “Inversione Tomografica WET” (Wavepath Eikonal Travelttime), questa particolare tecnica di inversione tomografica, permette il calcolo delle traiettorie dell’onda attraverso la soluzione di complesse equazioni, definite in letteratura come eikonal equation di Fresnel, ottenendo così un modello bidimensionale 2D di velocità-profondità, visualizzato con apposito software di countouring.

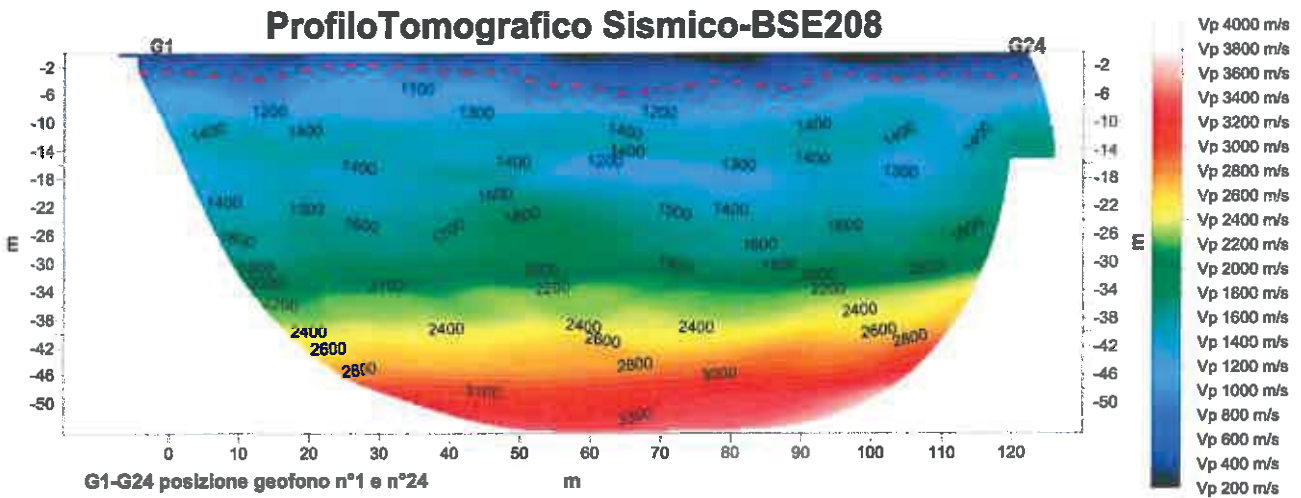
3.1 Analisi dei risultati relativi alla tomografia sismica superficiale delle onde P.

Lo scopo delle indagini, è stato quello di determinare lo spessore dei materiali areati, poco consistenti, aventi scadenti caratteristiche meccaniche. La consistenza e le caratteristiche geomeccaniche dei terreni, sono legati alla densità e al grado di costipazione dei terreni e quindi alla velocità di transito delle onde sismiche, nella fattispecie le P. Di seguito viene raffigurata la sezione tomografica superficiale. Considerato che la velocità delle propagazione delle onde sismiche, è legata essenzialmente alla densità e alla consistenza dei materiali, è possibile stimare le proprietà fisico-meccaniche dei terreni in relazione alla distribuzione della propagazione delle onde longitudinali. Di seguito si riportano i profili tomografici (Fig. 3.3.1-3.3.6).



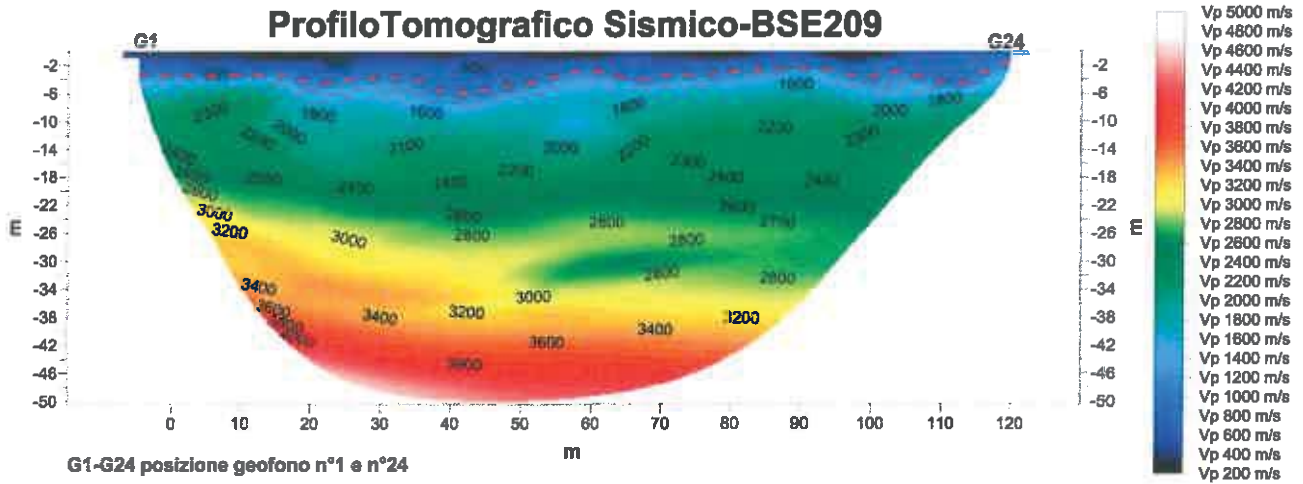
Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. Vp < 1000,00 m/s

Fig.3.3.1 Profilo Tomografico Sismico BSE207



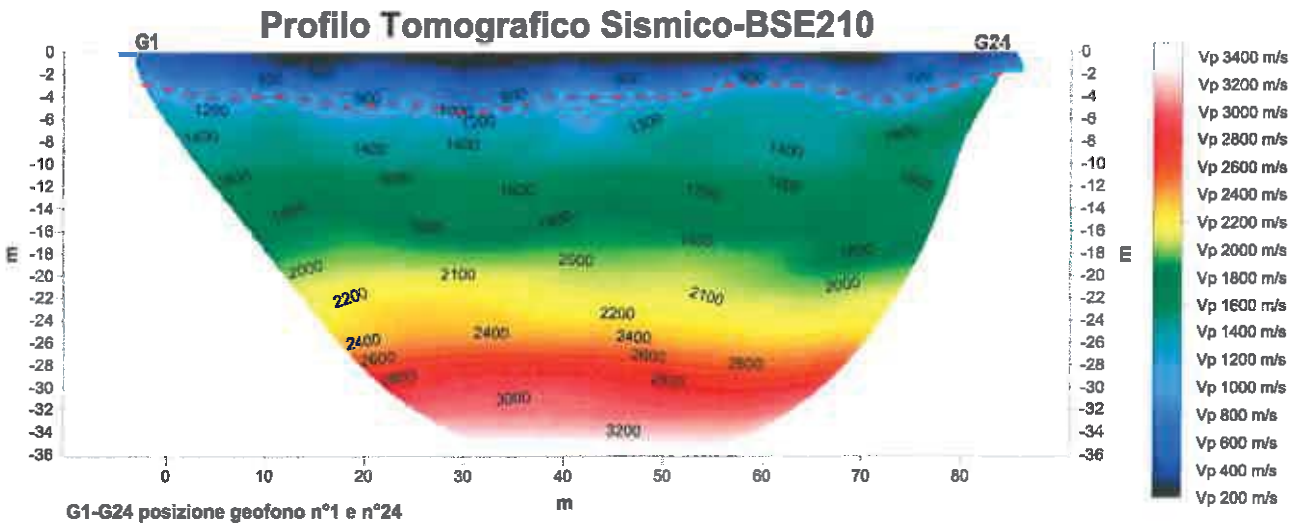
Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. Vp < 800,00 m/s

Fig.3.3.2 Profilo Tomografico Sismico BSE208



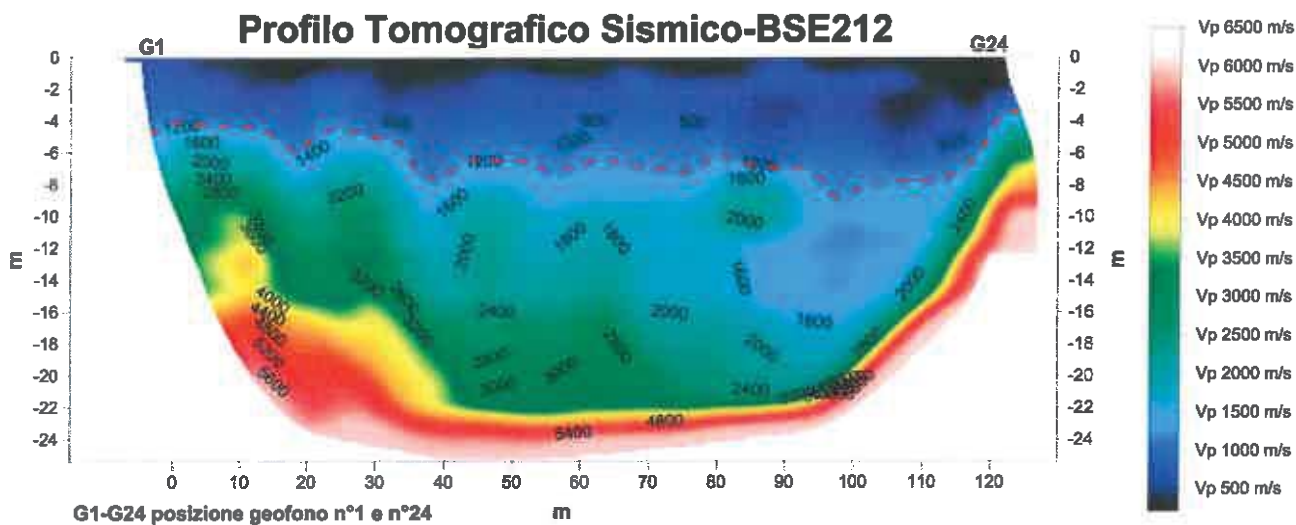
Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. $V_p < 1000,00$ m/s

Fig.3.3.3 Profilo Tomografico Sismico BSE209



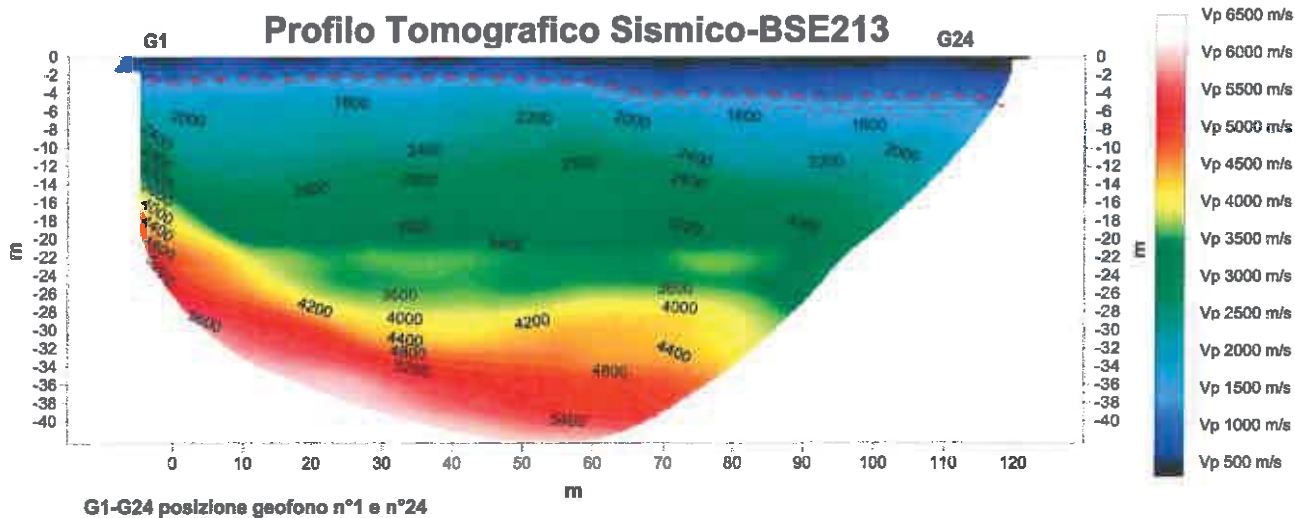
Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. $V_p < 1000,00$ m/s

Fig.3.3.4 Profilo Tomografico Sismico BSE210



--- Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. $V_p < 1200,00$ m/s

Fig.3.3.5 Profilo Tomografico Sismico BSE212



--- Riflettore che segna il passaggio tra materiali superficiali di copertura (da alterati a mediamente alterati in profondità) e materiali con migliori caratteristiche fisico-meccaniche a maggior grado di addensamento. $V_p < 1200,00$ m/s

Fig.3.3.6 Profilo Tomografico Sismico BSE213



3.2 Note sui risultati delle indagini tomografiche

Dalla analisi del tomogramma è stato possibile definire l'andamento del rifrattore che segna il passaggio tra i materiali superficiali, da alterati a parzialmente alterati, a quelli con migliori caratteristiche fisico meccaniche. Inoltre, dalla variazione del modello di velocità verso la profondità, è stato possibile localizzare delle inversioni di velocità attribuibili a dei passaggi latero-verticali che interessano delle alternanze tra materiali litoidi e materiali sciolti a grana medio-grossolana. In particolar modo, tali inversioni sono state riscontrate nelle Tomografie del lotto n.3 quali: BSE200,201,203,205,

Invece, particolari difformità delle linee di isovelocità, si sono notate principalmente nelle Tomografie BSE200,201,211bis, dove il loro andamento, denota probabili eterogeneità litologiche e/o movimenti gravitativi in atto o pregressi. Da sottolineare la presenza di elevati spessori (compresi tra circa 8,0m e 18,0m) di materiali superficiali da alterati a mediamente alterati riscontrabili nelle Tomografie BSE200,201,202,207,208,211.

Nel complesso, l'andamento delle linee di isovelocità nelle tomografie, mostrano una tendenza regolare e morbida, laddove le litologie risultano omogenee e non interessate da rilevanti movimenti gravitativi attuali o pregressi. Di contro, risultano difformi e piuttosto irregolari, nei casi in cui ci siano sostanziali variazioni litologiche latero-verticali, e/o quando sono stati interessanti da imponenti movimenti gravitativi.

4. Considerazioni conclusive

Le risultanze delle tomografie sismiche superficiali, hanno consentito di qualificare e quantificare le caratteristiche sismiche dai materiali interessati dall'indagine.

Dall'analisi delle indagini sismiche si è definito un modello sismostratigrafico con cui è stato possibile discriminare la porzione dei terreni superficiali alterata da quella con migliori caratteristiche fisico-meccaniche. Nelle sezioni tomografiche è stato possibile evidenziare evidenti inversioni di velocità verso la profondità per la presenza di alternanze tra materiali a grana media litoidi a sciolti.

Infine, in considerazione del ruolo che possiedono le indagini geofisiche, per quanto le indicazioni che forniscono siano di norma piuttosto significative, l'utilizzo di metodologie indirette non sostituisce la verifica diretta, ma eventualmente è in grado di indirizzarla in aree che, in base alla risultanze delle indagini, risultino più sensibili.



4.1 Dromocrone

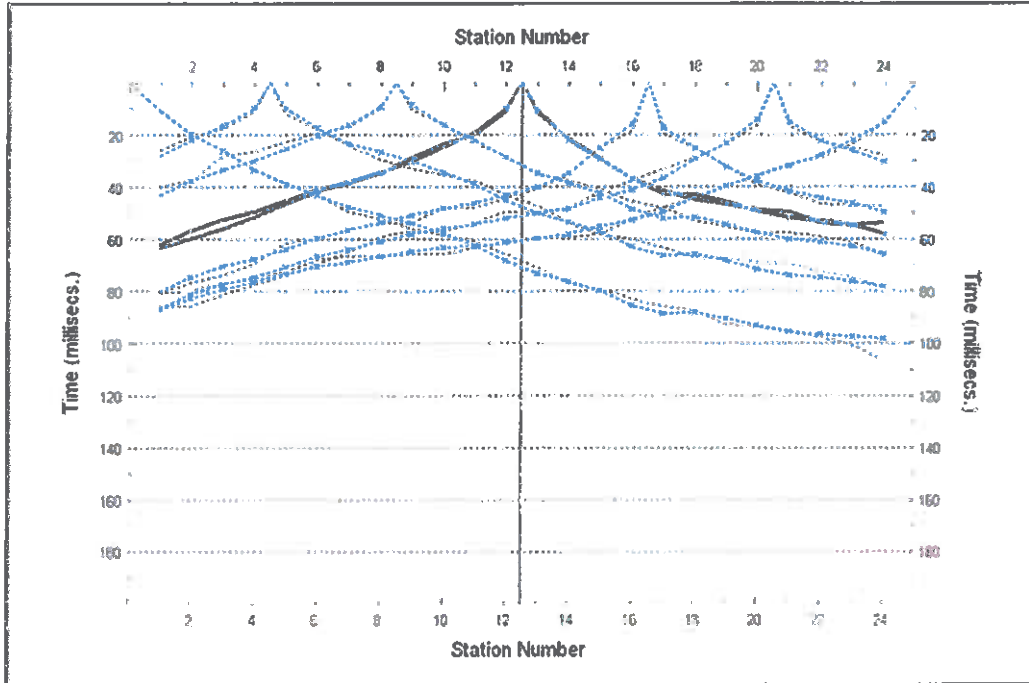


Fig. 4.1.1 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE207

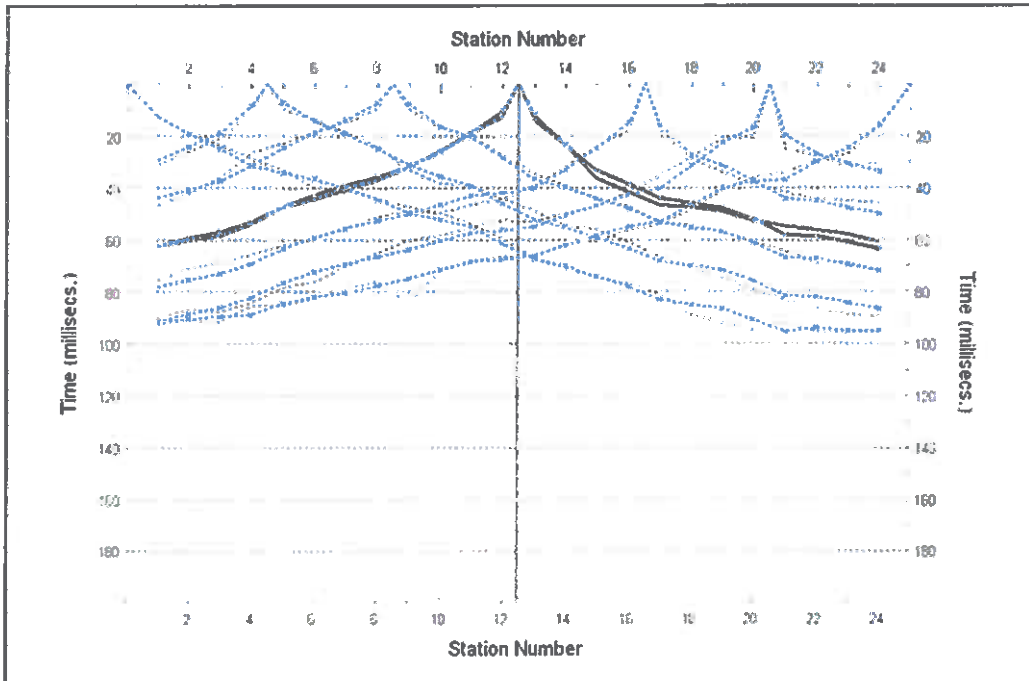


Fig. 4.1.2 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE208

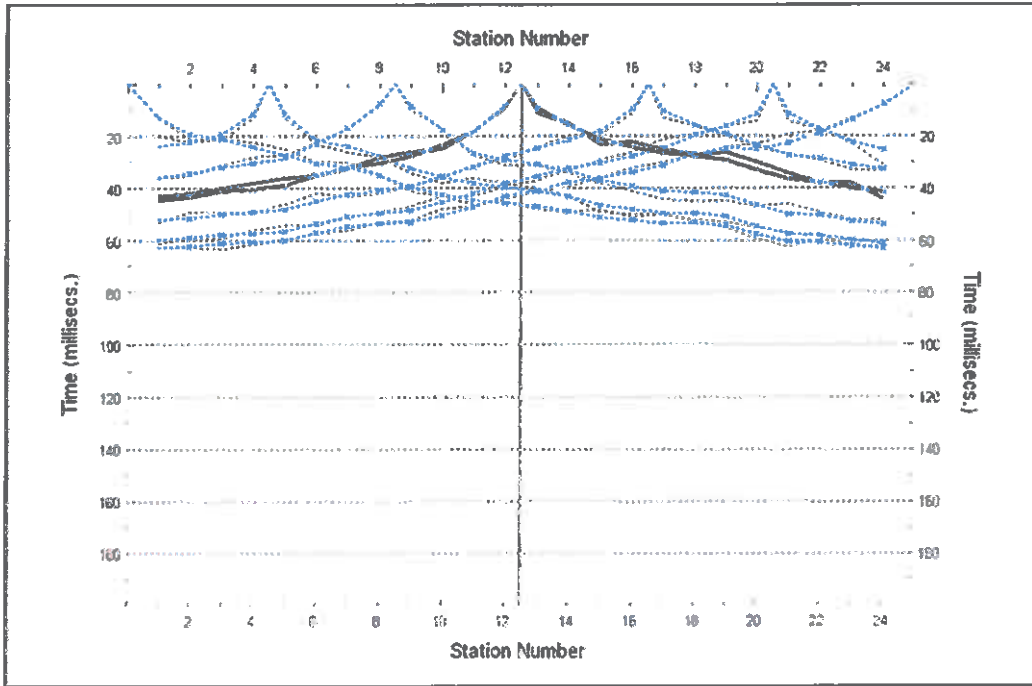


Fig. 4.1.3 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE209

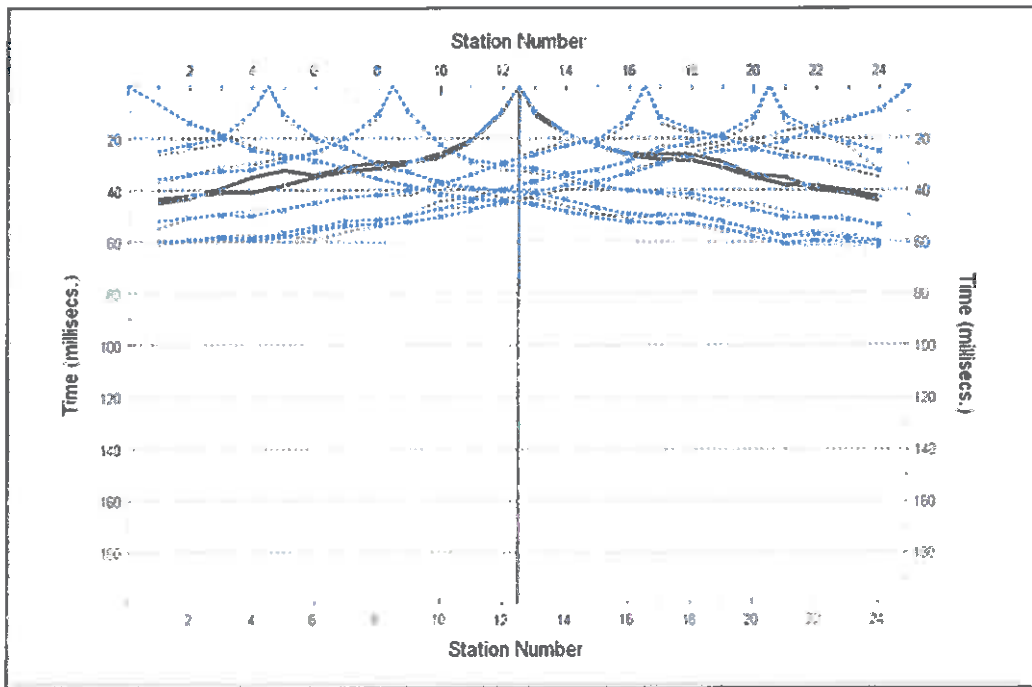


Fig. 4.1.4 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE210

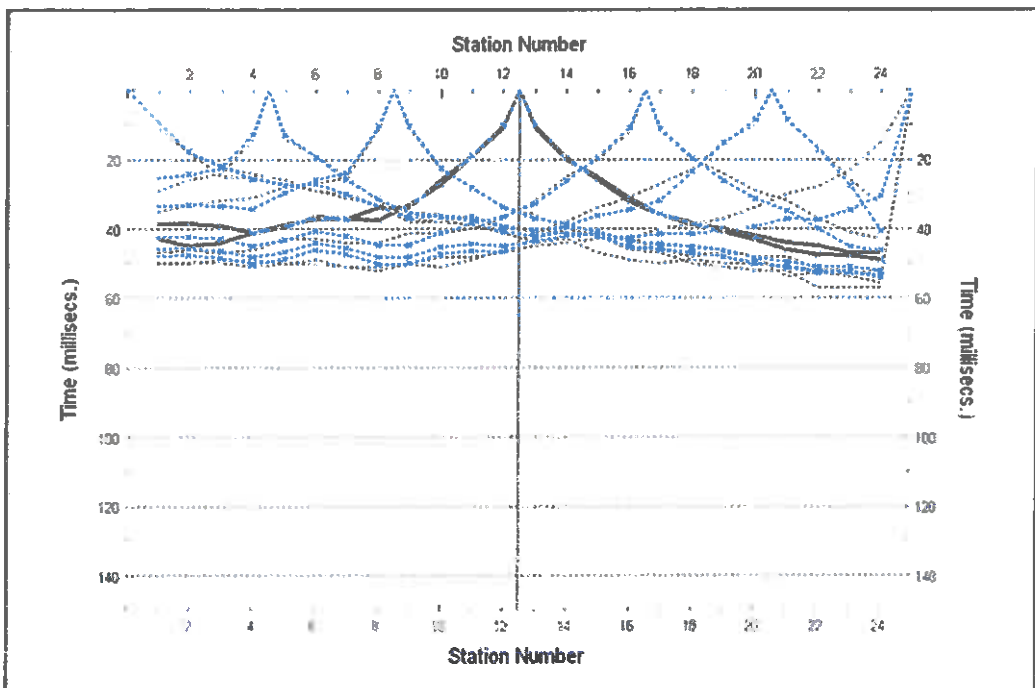


Fig. 4.1.5 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE212

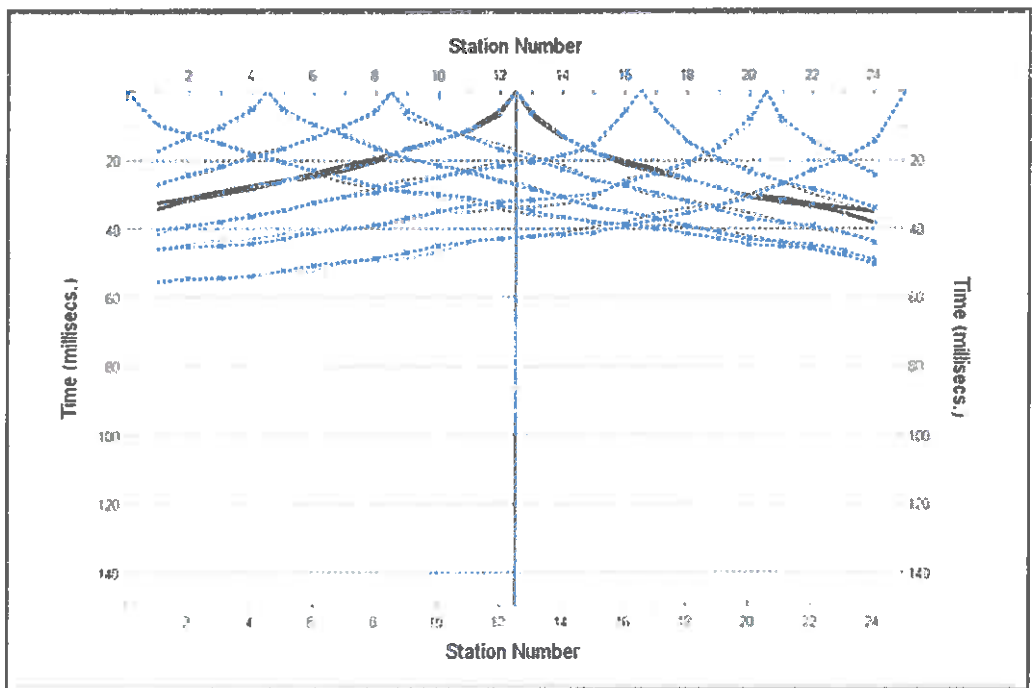
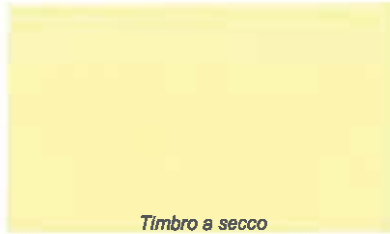


Fig. 4.1.6 Dromocrone con fitting del modello sperimentale e di calcolo Tom_BSE213



5. Documentazione fotografica



Fig. 1 - Tomografia sismica BSE207



Fig. 2 - Tomografia sismica BSE208



Fig. 3 - Tomografia sismica BSE209



Fig. 4 - Tomografia sismica BSE210



Fig. 5 - Tomografia sismica BSE212



Fig. 6 - Tomografia sismica BSE213