



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU

MISSIONE 4: ISTRUZIONE E RICERCA



PROVINCIA DI
MATERA

PROGETTO UNIFICATO DEFINITIVO - ESECUTIVO

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT).

C.U.P.: H31B21002120001

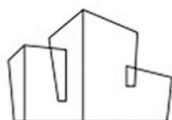
IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. Francesco Tagliente

STUDIO GEOLOGICO

ELABORATO 1.D.4: INDAGINI GEOFISICHE

REDATTO DA:



COVING S.R.L.
SERVIZI DI INGEGNERIA E COSTRUZIONI

COVING S.R.L. – Servizi di Ingegneria
Via Nazario Sauro n.102 – POTENZA (PZ)
P.IVA 02113980763

Legale Rappresentante
Dott. Ing. Giovanni Corallo

IL DIRETTORE TECNICO
Ing. Paolo Montanari

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Antonio De Carlo

I COLLABORATORI

Dott.ssa Geol. Annagrazia Mancini
Dott. Geol. Bartolo Romaniello



Studio di Geologia e GeoIngegneria
Dott. Geol. Antonio De Carlo

INDICE ANALITICO

1.	PREMESSA.....	2
2.	GENERALITÀ SULLE PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE	3
	2.1 Possibilità e limiti del metodo sismico a rifrazione	4
	2.2 Attrezzatura e metodologia utilizzata.....	5
3.	PROSPEZIONE SISMICA DI TIPO MASW E RE.MI.....	8
	3.1 Generalità	8
	3.2. Attrezzatura e metodologia utilizzata	9
	3.3. Processo di elaborazione dati.....	9
4.	ELABORAZIONE DATI E INTERPRETAZIONE.....	11
	4.1 Profilo sismico a rifrazione in onda P SR1	11
	4.2 Profilo sismico a rifrazione in onda P SR2	15
	4.3 Prospezione MASW/Re.Mi.....	19
5.	RAPPORTO FOTOGRAFICO	24
6.	UBICAZIONE INDAGINI	26

1. PREMESSA

La presente relazione illustra e sintetizza i risultati di una campagna di indagini geofisiche costituita da n.° 2 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e 1 prospezione sismica attiva MASW e passiva Re.Mi., eseguite nell'ambito dei **"Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)"** su committenza della Provincia di Matera. In dettaglio sono state eseguite:

- n°2 prospezioni sismiche a rifrazione in onda P denominate con le sigle SR1 ed SR2, della lunghezza rispettivamente di 120 m e 90 m;
- n°1 prospezione sismica attiva di tipo MASW e passiva Re.Mi denominata con la sigla MASW/Re.Mi eseguita sullo stesso allineamento utilizzato per la prospezione sismica a rifrazione SR2.

Lo scopo delle indagini è stato quello di individuare, sulla base della velocità delle onde sismiche misurate, il profilo sismostratigrafico relativo all'area di indagine con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche delle velocità di propagazione delle onde sismiche, e quindi di identificare lo spessore degli orizzonti a diversa rigidità sismica e conseguentemente con comportamento geotecnico differente. Più in dettaglio, si è voluto valutare la variazione laterale e longitudinale delle caratteristiche elastiche del terreno e i rapporti stratimetrici delle litologie presenti nelle aree investigate con i profili sismici condotti. Le variazioni delle caratteristiche elastiche del terreno sono state rappresentate con un elevato dettaglio grazie all'adozione delle più moderne tecniche di elaborazione tomografica, che hanno permesso di ottenere una restituzione ad alta risoluzione del sottosuolo investigato.

Inoltre sono stati acquisiti i dati necessari utili alla definizione del profilo verticale della V_s (velocità di propagazione delle onde di taglio) e di classificare i terreni sulla base del valore della $V_{s,eq}$ (il valore medio della V_s negli starti sovrastanti il bedrock) in accordo con quanto previsto dal D.M. 17/01/2018. Il modello sismico monodimensionale costituisce infatti l'aspetto principale sia nella stima degli effetti sismici di sito che nella definizione dell'azione sismica di progetto, in quanto consente di conoscere l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche nella modifica della pericolosità sismica di base (amplificazioni locali di natura litologica). Ciò permette

una corretta progettazione strutturale in relazione alle condizioni sito-specifiche, garantendo un adeguato livello di protezione antisismica delle costruzioni (D.M. 17.01.2018).

2. GENERALITÀ SULLE PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

Le indagini sismiche a rifrazione si basano sulla misurazione del tempo necessario perché la perturbazione elastica causata nel terreno da una sorgente di energia pervenga a una serie di strumentazioni di ricezione (geofoni) dopo aver percorso uno strato superficiale di terreno (onde dirette) e superfici di separazione fra strati a velocità crescente verso il basso (mediante onde rifratte).

Le apparecchiature di misurazione, di solito in numero di 12 o 24, sono spaziate regolarmente lungo un allineamento; viene registrato il tempo di arrivo delle onde ad ogni geofono, a costituire un diagramma, detto sismogramma. Il sismogramma registra:

- le onde dirette: che rappresentano la perturbazione che attraversando solo il primo strato va al geofono dalla sorgente di energia;
- le onde riflesse: che vengono riflesse dalle superfici di discontinuità;
- le onde rifratte: date dal raggio che subisce la rifrazione totale e percorre la superficie di discontinuità a velocità pari a quella dello strato più veloce. L'angolo critico di incidenza dipende dal rapporto delle velocità di propagazione delle onde sismiche nei due materiali, secondo la Legge di Snell:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

Si ha l'angolo critico quando $\sin \alpha = V_1/V_2$, cioè $\beta = 90^\circ$.

Le spezzate diagrammate in un sistema di riferimento tempi/distanze relativamente ai tempi di primo arrivo sono le dromocrone. In ogni dromocrona si hanno punti che possono essere relativi alle onde dirette e alle onde rifratte.

I primi tempi di arrivo sono quelli relativi ai raggi diretti attraverso il primo strato e la pendenza della linea che passa per tali punti è il reciproco della velocità di questo strato.

A partire da una certa distanza dal punto di energizzazione (detta distanza critica) il tempo impiegato per arrivare al geofono dai raggi che percorrono il tetto dello strato sottostante (più veloce) risulta inferiore a quello degli arrivi diretti. I punti relativi a questi arrivi si allineeranno secondo una retta avente la pendenza di $1/V_2$, e così via per gli strati inferiori.

Il tempo che corrisponde all'intersezione di ciascun segmento di retta con l'asse dei tempi è detto tempo intercetto. Questo valore, come quello della distanza critica, dipendono direttamente dalla velocità dei materiali e dallo spessore degli strati, e possono quindi essere utilizzati per determinare le profondità dei tetti degli strati stessi.

In sostanza, una volta determinate le varie velocità, vi sono infatti due metodi per determinare le profondità dei vari strati sotto i punti di energizzazione: il metodo dell'intercetta e quello della distanza critica.

Una volta note queste entità è poi possibile calcolare la profondità dei vari strati in corrispondenza di ogni geofono; con il metodo ABC (delay times) o con il GRM (Generalized Reciprocal Method).

2.1 Possibilità e limiti del metodo sismico a rifrazione

Come è noto, le onde elastiche provocate da una vibrazione si trasmettono nel suolo con velocità differenti per ogni litotipo. Nella prospezione sismica a rifrazione si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P o "di compressione e dilatazione"), che sono le più veloci fra le diverse onde elastiche, o trasversali (onde S o "di taglio") per determinare spessori e andamenti dei livelli presenti.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel suolo è compresa in un *range* piuttosto ampio; per lo stesso litotipo di roccia essa diminuisce col grado di alterazione, di fessurazione e/o di fratturazione; aumenta per contro con la profondità e l'età geologica. Sensibili differenze si possono avere, in rocce stratificate, tra le velocità rilevate lungo i piani di strato e quelle rilevate perpendicolarmente a questi. La velocità delle onde compressionali, diversamente da quelle trasversali che non si trasmettono nell'acqua, è fortemente influenzata dalla presenza della falda acquifera e dal grado di saturazione.

Questo comporta che anche litotipi differenti possano avere uguali velocità delle onde sismiche di compressione, per cui non necessariamente l'interpretazione sismostratigrafica corrisponde con la reale situazione geologico-stratigrafica.

Il metodo sismico a rifrazione è soggetto inoltre alle seguenti limitazioni:

- un livello potrà essere evidenziato soltanto se la velocità di trasmissione delle onde longitudinali in esso risulterà superiore a quella dei livelli soprastanti (effetto dell'inversione di velocità);
- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni e alla sua profondità può non risultare rilevabile;
- un livello di velocità intermedia compreso tra uno strato sovrastante a velocità minore ed uno sottostante a velocità sensibilmente maggiore può non risultare rilevabile perché mascherato dagli "arrivi" dello strato sottostante (effetto dello strato nascosto e "zona oscura");
- aumentando la spaziatura tra i geofoni aumenta la profondità di investigazione ma può ovviamente ridursi la precisione della determinazione della profondità dei limiti di passaggio tra i diversi livelli individuati. In presenza di successioni di livelli con velocità (crescenti) di poco differenti tra loro, orizzonti a velocità intermedia con potenza sino anche ad 1/3 del passo adottato possono non essere evidenziati. Il limite tra due orizzonti può quindi in realtà passare "attraverso" un terzo intermedio non evidenziabile;
- analogamente, incrementi graduali di velocità con la profondità danno origine a dromocrone che consentono più schemi interpretativi.

Per contro i moderni metodi di elaborazione del dato sismico consentono di ricostruire l'andamento sepolto di più rifrattori sovrapposti, variamente accidentati e con velocità variabili lungo il profilo, anche in presenza di morfologia di superficie non piana.

2.2 Attrezzatura e metodologia utilizzata

La strumentazione utilizzata è composta da n.° 2 sismografi ciascuno dei quali a 25 canali del tipo *SoilSpy Rosina* della *Micromed® S.P.A.* dalle seguenti caratteristiche tecniche: campionamento 89 kHz per canale in modo continuo; conversione a/d 25 bit a 128 Hz; frequenze di output (fs) 256, 512, 1.024, 2.048, 4.096, 8.192, 16.384, 32.768 Hz; durata registrazione continua - nessun limite per fs < 2.048 Hz; dinamica 142 db; banda dc - 360 Hz; visualizzazione continua in tempo reale (per fs < 2.048 Hz).

L'attrezzatura è completata da n° 25 geofoni verticali e n° 25 geofoni orizzontali "Geospace" con frequenza propria di 4,5 Hz, fucile sismico armato con cartucce industriali calibro 8 a carica ridotta e massa battente del peso di 10 Kg su piastra in alluminio.

Per l'interpretazione dei dati è stato utilizzato il software Winsism 11.0 della W_Geosoft, in grado di convertire i dati acquisiti in formato SU (seismic unix) ed operare direttamente su tali tracce per la definizione dei tempi di primo arrivo ed il successivo tracciamento delle dromocrone.

L'interpretazione dei dati è stata effettuata con il metodo del Delay Time (ABC), che consente di determinare la profondità al di sotto di ogni geofono attraverso l'analisi delle velocità e degli spessori degli strati, individuandone le variazioni laterali nell'elaborazione di un modello interpretativo.

Dal modello ottenuto è stata effettuata l'inversione tomografica utilizzando il software RAYFRAC[®] della Intelligent Resources Inc., formulato per consentire l'elaborazione di dati ottenuti con prospezioni sismiche eseguite in superficie, sia onde P che S, per scopi geotecnico-ingegneristici, ambientali e per l'esplorazione nel campo delle georisorse.

RAYFRAC[®] consente sia la ricostruzione della geometria dei rifrattori con la sismica a rifrazione tradizionale, che la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche, soprattutto nel caso di strutture profonde. Tali tecniche consistono in due metodi, quello di inversione DELTA T-v, mediante il quale si ottengono dei profili 1D "profondità-velocità" dai dati di dromocrone e il metodo di inversione 2D, WET, mediante il quale si ottimizzano i modelli di velocità ottenuti con il metodo DELTA t-V. Inoltre le release più recenti di RAYFRAC[®] sono supportate dal software SURFER[™] 11 mediante il quale è stato eseguito il gridding, l'imaging ed il contouring dei suddetti modelli di velocità.

Lo stendimento sismico impiegato presenta le seguenti caratteristiche:

SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P				
STENDIMENTO SISMICO	N° Canali	Distanza intergeofonica	Lunghezza base sismica	Tipo Onde Sismiche
SR1	25	5	120 m	P
SR2	19	5	90 m	P

La geometria e la configurazione strumentale della prospezione **SR1** è di seguito riportata:

- n. geofoni: 25
- distanza tra i geofoni: 5.0 m
- lunghezza stendimento: 120 m
- frequenza campionamento: 8KHz
- durata campionamento: 120 ms
- guadagno: variabile da 20 mV/digit a 0.2 mV/digit con AGC (Automatic Gain Control)

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

- n. shots: 9, di cui:

- shot 1 in corrispondenza del geofono G1 (coord. = 0,0 m)
- shot 2 in corrispondenza del geofono G3 (coord. = 10,0 m)
- shot 3 in corrispondenza del geofono G7 (coord. = 30,0 m)
- shot 4 in corrispondenza del geofono G10 (coord. = 45,0 m)
- shot 5 in corrispondenza del geofono G13 (coord. = 60,0 m)
- shot 6 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 75,0 m)
- shot 7 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 90,0 m)
- shot 8 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 105,0 m)
- shot 9 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 120,0 m)

La geometria e la configurazione strumentale della prospezione **SR2** è invece la seguente:

- n. geofoni: 19
- distanza tra i geofoni: 5.0 m
- lunghezza stendimento: 90 m
- frequenza campionamento: 8KHz
- durata campionamento: 120 ms
- guadagno: variabile da 20 mV/digit a 0.2 mV/digit con AGC (Automatic Gain Control)
- n. shots: 7, di cui:
 - shot 1 in corrispondenza del geofono G1 (coord. = 0,0 m)
 - shot 2 in corrispondenza del geofono G3 (coord. = 10,0 m)
 - shot 3 in corrispondenza del geofono G7 (coord. = 30,0 m)
 - shot 4 in corrispondenza del geofono G10 (coord. = 45,0 m)
 - shot 5 in corrispondenza del geofono G13 (coord. = 60,0 m)
 - shot 6 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 75,0 m)
 - shot 7 in corrispondenza del geofono G16 (coord. = 90,0 m)

Gli stendimenti sono stati eseguiti su morfologia non perfettamente piana, pertanto in fase di elaborazione dei dati è stato necessario eseguire la correzione topografica della quota relativa di ciascun geofono.

3. PROSPEZIONE SISMICA DI TIPO MASW E RE.MI.

3.1 Generalità

MASW è l'acronimo di *Multi-channel Analysis of Surface Waves* (Analisi Multi-canale delle Onde di Superficie) ovvero analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva (e.g. Park et al., 1999). Ciò indica che il fenomeno che si analizza è la propagazione delle onde di superficie, in quanto la MASW classica/standard consiste appunto nella generazione e nella registrazione della propagazione di una classe di onde di superficie, più specificatamente delle onde di Rayleigh, originate dall'interferenza costruttiva di onde P e onde Sv, incidenti sulla superficie libera del terreno. Si tratta di onde con polarizzazione ellittica sul piano verticale parallelo alla direzione di propagazione delle onde (ground roll) che sono appositamente generate da una sorgente ad impatto verticale (in genere si utilizza una massa battente del peso di 10 Kg su piastra in alluminio o da un cannoncino sismico) e vengono poi registrate tramite geofoni a componente verticale o orizzontale a frequenza propria di 4.5Hz.

La metodologia Re.Mi (Refractor Microtremor), come la MASW, studia le proprietà dispersive delle onde superficiali (specificatamente le onde di Rayleigh). L'unica differenza tra le 2 metodologie è che per le prove MASW la sorgente è nota (l'energizzazione delle onde è eseguita dagli operatori) mentre per le prove Re.Mi. la registrazione delle onde avviene in passivo, ovvero sono registrati per un tempo determinato i microtremori provenienti da sorgenti ignote e lontane.

Con entrambe le metodologie si acquisiscono pertanto onde di superficie (attive o passive) ed è possibile ottenere una stratigrafia delle onde S fornendo un valore per del parametro V_s , eq.

Più specificatamente si analizza la dispersione delle onde di superficie sapendo che frequenze diverse e quindi lunghezze d'onda diverse – viaggiano a velocità diversa. Il principio di base quindi è piuttosto semplice: le varie componenti (frequenze) del segnale (cioè della perturbazione sismica che si propaga) viaggiano ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del mezzo. In particolare, le lunghezze d'onda più ampie (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda (in altre termini “sentono” gli strati più profondi), mentre le piccole lunghezze d'onda (le frequenze più alte) dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale. Poiché tipicamente la velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità, ciò si rifletterà nel fatto che le frequenze più basse (delle onde di

superficie) viaggeranno ad una velocità maggiore rispetto le frequenze più alte. L'andamento delle velocità di fase in funzione della frequenza (o della lunghezza d'onda) è detta *curva di dispersione* e fornisce informazioni sul profilo di velocità nel sottosuolo.

3.2. Attrezzatura e metodologia utilizzata

La strumentazione utilizzata è il sismografo SoilSpy Rosina della Micromed® S.P.A. dalle seguenti caratteristiche tecniche: campionamento 89 kHz per canale in modo continuo; conversione a/d 25 bit a 128 Hz; frequenze di output (fs) 256, 512, 1.024, 2.048, 4.096, 8.192, 16.384, 32.768 Hz; durata registrazione continua - nessun limite per fs < 2.048 Hz; dinamica 142 db; banda dc - 360 Hz; visualizzazione continua in tempo reale (per fs < 2.048 Hz).

L'attrezzatura è completata da 24 geofoni verticali e orizzontali "Geospace" con frequenza propria di 4,5 Hz, geofono trigger avente funzione di interruttore starter, cavo trigger montato su bobina e fucile sismico armato con cartucce industriali calibro 8 a carica ridotta e massa battente del peso di 10 Kg su piastra in alluminio.

L'indagine è stata svolta così come riportato in planimetria allegata, adottando la seguente configurazione geometrica e strumentale:

Numero di geofoni: 15

Spaziatura tra i geofoni: 5 m

Numero di offset: 3 rispettivamente a 5,0; 7,5 e 10,0 m dal primo e dall'ultimo geofono

Lunghezza stendimento: 60 m

Intervallo di campionamento: 0.977 ms

Durata acquisizione: 2 s

Guadagno: 1 mV/digit (uguale per tutti i geofoni) senza AGC (Automatic Gain Control)

Per l'interpretazione dei dati è stato utilizzato il software *WinMasw Pro 4.4.8* della *Eliosoft*. I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (.sgy format file).

3.3. Processo di elaborazione dati

L'analisi delle tracce acquisite in campagna e il processo di elaborazione dati consistono nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica adottata. Dallo spettro bidimensionale ottenuto dalle registrazioni è possibile distinguere

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple). Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze. Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

4. ELABORAZIONE DATI E INTERPRETAZIONE

4.1 Profilo sismico a rifrazione in onda P SR1

Il profilo sismico, denominato SR1, è stato eseguito all'interno del lotto in cui sarà realizzato il progetto in epigrafe, così come indicato nella planimetria allegata, con l'intento di ricostruire l'andamento sismostratigrafico del sottosuolo ed individuare lo spessore di ogni singolo sismostrato. Per la realizzazione del profilo sismico denominato SR1, sono stati impiegati n.°25 geofoni verticali, lo stendimento si è sviluppato con direzione da NW verso SE (cfr. Cap. 6 - Ubicazione delle indagini).

La **Sismosezione SR1, eseguita in onde P** (l. 120,0 m) all'interno del volume investigato, evidenzia la presenza di tre unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche misurate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

- Il **primo sismostrato**, quello più superficiale, ha uno spessore variabile da 1,60 a 5,30 metri, con velocità delle onde P compresa tra 300 e 1000 m/s, riferibile a terreni superficiali maggiormente areati, poco addensati/consistenti ascrivibili a terreno vegetale e a materiali detritici superficiali;
- Il **secondo sismostrato** presenta uno spessore variabile da 6,40 a 13,90 m, con velocità delle onde di compressione compresa tra 1000 - 1700 m/s e corrisponde a terreni mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche che tendono ad aumentare con la profondità;
- Segue un **terzo sismostrato**, a profondità variabile da 10,30 a 15,40 m dal p.c. fino alla profondità di investigazione di circa 35 m, caratterizzato da una velocità V_P dai 1700 a 2700 m/s, riferibile a depositi consistenti con buone caratteristiche geotecniche.

Dalla sismosezione ottenuta mediante inversione tomografica della prospezione sismica SR1 è possibile fare delle considerazioni in chiave litostratigrafica lungo tutto il profilo investigato. Analizzando il primo sismostrato, quello più superficiale, si nota che l'andamento delle linee di isovelocità risulta piuttosto irregolare ad indicare una certa variabilità sia verticale che laterale delle caratteristiche sismo-elastiche dei terreni. Le velocità di tale sismostrato sono

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

relativamente basse (300-1000 m/s) ascrivibili alla presenza di terreno vegetale e terreni detritici superficiali poco consistenti/addensati (cromatismo blu/fucsia nella tomografia sismica).

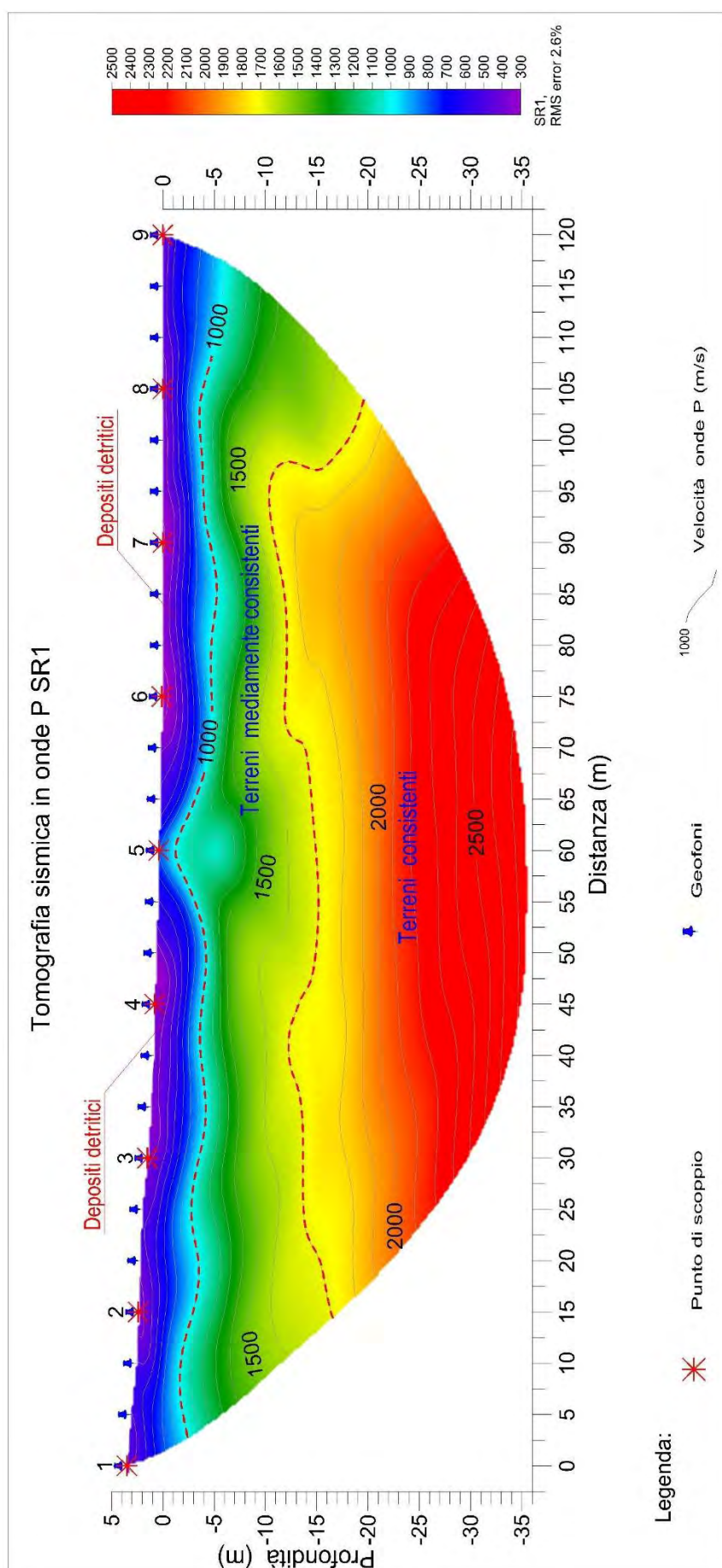
Più in profondità, nel secondo sismostrato, l'andamento delle linee di isovelocità, appare ancora irregolare ed ondulato e le velocità del sismostrato sono comprese tra 1000 e 1700 m/s, indice quindi di depositi maggiormente consistenti e/o addensati con discrete caratteristiche geotecniche.

Segue un terzo sismostrato a profondità variabile da circa 10,0 m a circa 15,0 m fino alla profondità di investigazione di circa 35,0 m caratterizzato da velocità comprese tra 1700 e 2700 m/s riferibile a depositi consistenti con buone caratteristiche geotecniche.

Per una maggiore comprensione di quanto detto, si riporta di seguito la sismosezione ottenuta dall'elaborazione tomografica delle tracce sismiche acquisite, oltre ai tempi di arrivo e alle dromocrone derivanti dal picking dei primi arrivi.

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

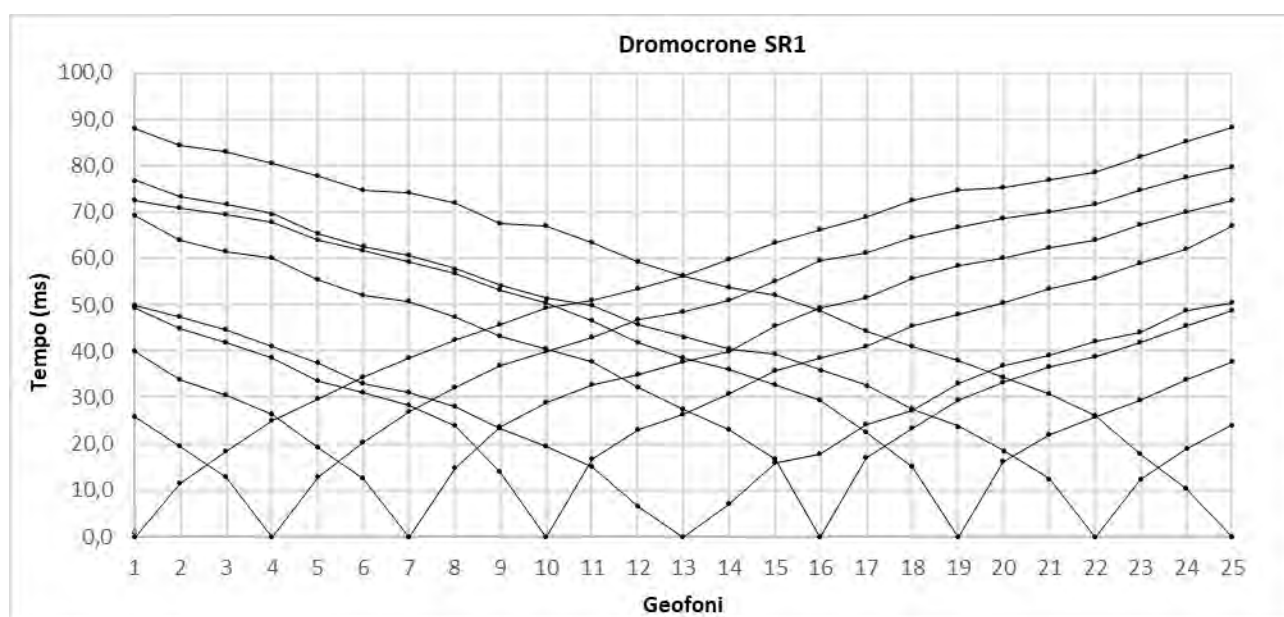


- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

Tempi di primo arrivo

Receiver Station	First Break (ms) - SR1 ONDE P								
	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9
1	0,00	25,76	40,04	49,32	49,93	69,21	72,63	76,78	87,89
2	11,35	19,53	33,94	44,92	47,36	63,97	70,80	73,44	84,35
3	18,43	12,82	30,52	41,87	44,68	61,40	69,46	71,68	83,01
4	24,90	0,00	26,49	38,45	40,89	59,94	67,75	69,70	80,44
5	29,79	12,82	19,29	33,69	37,48	55,30	63,97	65,43	77,76
6	34,42	20,39	12,57	31,01	32,96	52,00	61,77	62,62	74,71
7	38,45	26,98	0,00	28,44	31,01	50,66	59,33	60,67	74,22
8	42,48	32,10	14,77	23,80	28,08	47,36	56,76	57,74	71,90
9	45,78	36,99	23,56	14,04	23,44	43,21	53,22	54,20	67,63
10	49,19	39,80	28,81	0,00	19,53	40,53	50,29	51,51	66,90
11	50,90	42,85	32,72	16,60	15,02	37,60	46,51	49,93	63,35
12	53,47	46,75	35,03	23,07	6,59	32,23	41,87	45,78	59,20
13	56,15	48,46	37,84	26,49	0,00	27,47	38,45	43,21	56,27
14	59,69	50,90	39,92	30,76	7,20	23,07	36,01	40,53	53,83
15	63,35	55,18	45,41	35,77	15,87	16,85	32,84	39,43	52,12
16	66,16	59,45	49,44	38,45	17,82	0,00	29,30	36,01	48,71
17	68,85	61,16	51,51	41,14	24,05	17,09	22,58	32,72	44,31
18	72,39	64,45	55,54	45,41	27,34	23,32	15,14	27,59	41,14
19	74,71	66,77	58,47	47,97	32,91	29,30	0,00	23,80	38,09
20	75,32	68,60	59,94	50,29	36,96	33,33	16,11	18,56	34,30
21	76,90	69,95	62,26	53,47	39,01	36,50	21,97	12,45	30,88
22	78,61	71,78	63,97	55,79	42,06	38,70	25,76	0,00	26,12
23	81,91	74,83	67,26	58,96	43,97	41,87	29,42	12,33	17,70
24	85,21	77,39	69,95	62,13	48,85	45,41	33,94	19,04	10,50
25	88,26	79,59	72,63	67,02	50,42	48,83	37,60	24,17	0,00



4.2 Profilo sismico a rifrazione in onda P SR2

Il profilo sismico, denominato SR2, è stato eseguito all'interno del lotto in cui sarà realizzato il progetto in epigrafe, così come indicato nella planimetria allegata, con l'intento di ricostruire l'andamento sismostratigrafico del sottosuolo ed individuare lo spessore di ogni singolo sismostrato. Per la realizzazione del profilo sismico denominato SR2, sono stati impiegati n.°19 geofoni verticali, lo stendimento si è sviluppato con direzione da NE verso SW (cfr. Cap. 6 - Ubicazione delle indagini).

La **Sismosezione SR2, eseguita in onde P** (l. 90,0 m) all'interno del volume investigato, evidenzia la presenza di tre unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche misurate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

- Il **primo sismostrato**, quello più superficiale, ha uno spessore variabile da 3,70 a 6,20 metri, con velocità delle onde P compresa tra 400 e 1000 m/s, riferibile a terreni superficiali maggiormente areati, poco addensati/consistenti ascrivibili a terreno vegetale e a materiali detritici superficiali;
- Il **secondo sismostrato** presenta uno spessore variabile da 9,70 a 12,20 m, con velocità delle onde di compressione compresa tra 1000 - 1700 m/s e corrisponde a terreni mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche che tendono ad aumentare con la profondità;
- Segue un **terzo sismostrato**, a profondità variabile da 14,30 a 16,30 m dal p.c. fino alla profondità di investigazione di circa 22 m, caratterizzato da una velocità V_P dai 1700 a 2000 m/s, riferibile a depositi consistenti con buone caratteristiche geotecniche.

Anche dalla sismosezione ottenuta mediante inversione tomografica della prospezione sismica SR2 è possibile fare delle considerazioni in chiave litostratigrafica lungo tutto il profilo investigato. Analizzando il primo sismostrato, quello più superficiale, si nota che l'andamento delle linee di isovelocità risulta piuttosto irregolare ad indicare una certa variabilità sia verticale che laterale delle caratteristiche sismo-elastiche dei terreni. Le velocità di tale sismostrato sono relativamente basse (300-1000 m/s) ascrivibili alla presenza di terreno vegetale e terreni detritici superficiali poco consistenti/addensati (cromatismo blu/fucsia nella tomografia sismica).

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

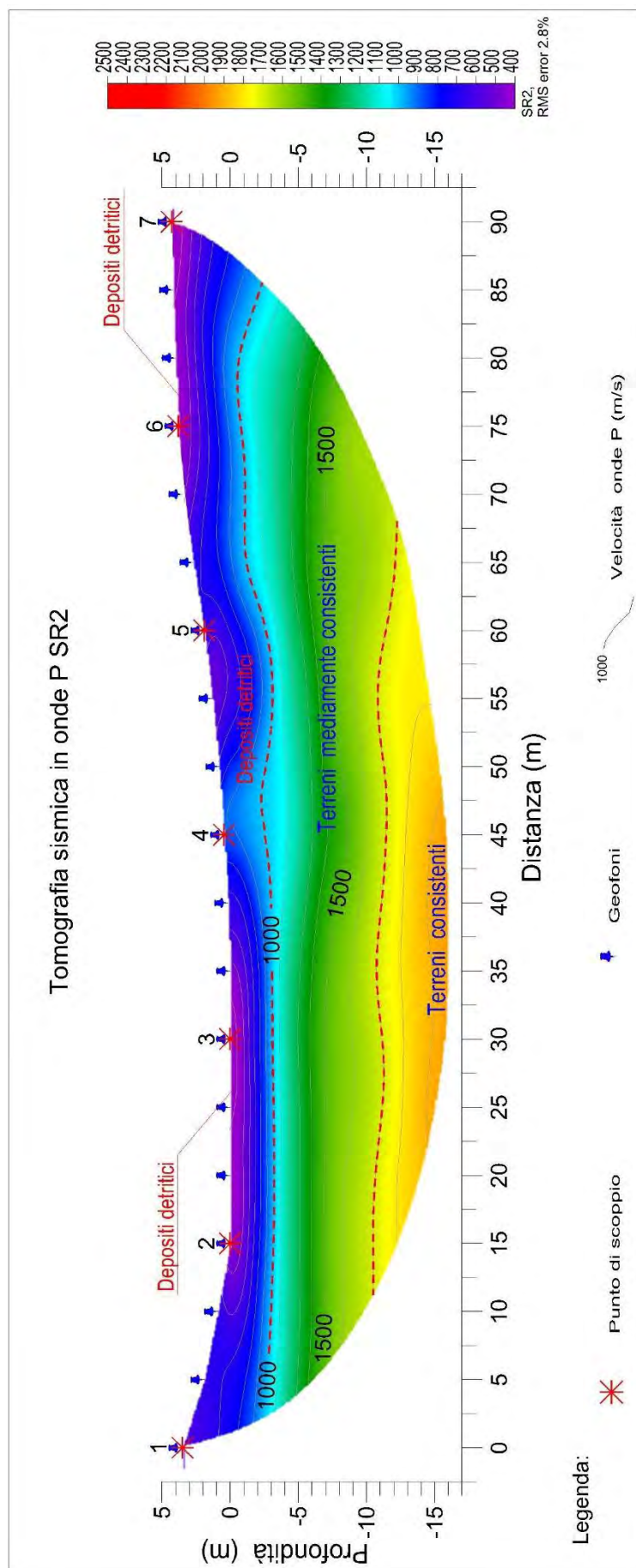
Più in profondità, nel secondo sismostrato, l'andamento delle linee di isovelocità, appare più regolare con linee di isovelocità più ravvicinate tra loro ad indicare un incremento del gradiente di velocità con la profondità. Le velocità di tale sismostrato sono comprese tra 1000 e 1700 m/s, indice quindi di depositi maggiormente consistenti e/o addensati con discrete caratteristiche geotecniche.

Segue un terzo sismostrato a profondità variabile da circa 10,0 m a circa 12,0 m fino alla profondità di investigazione di circa 22,0 m, caratterizzato da velocità comprese tra 1700 e 2000 m/s riferibile a depositi consistenti con buone caratteristiche geotecniche.

Per una maggiore comprensione di quanto detto, si riporta di seguito la sismosezione ottenuta dall'elaborazione tomografica delle tracce sismiche acquisite, oltre ai tempi di arrivo e alle dromocrone derivanti dal picking dei primi arrivi.

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

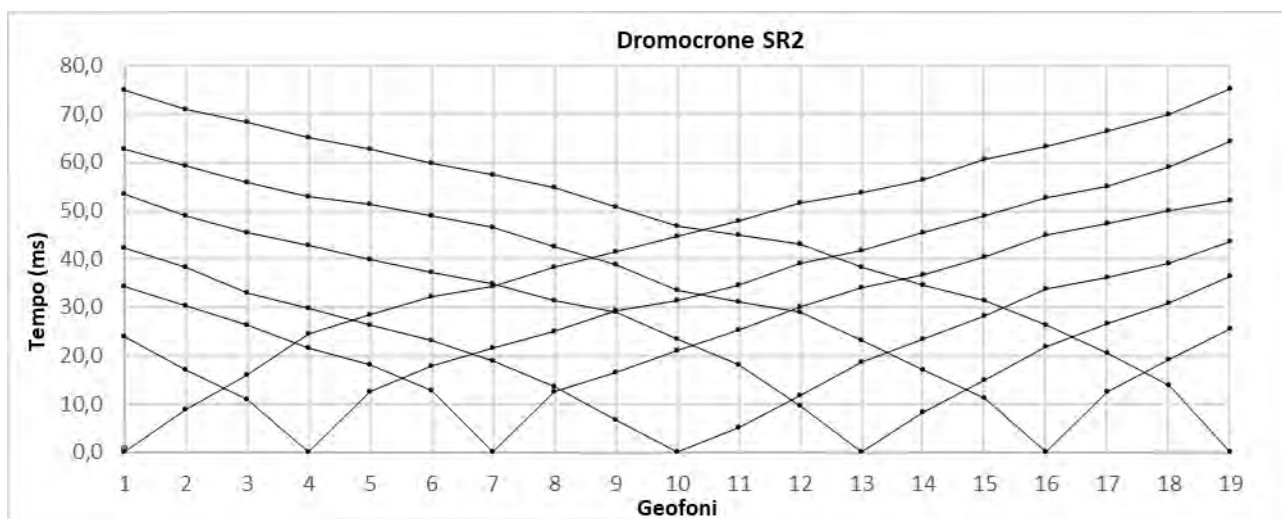


- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

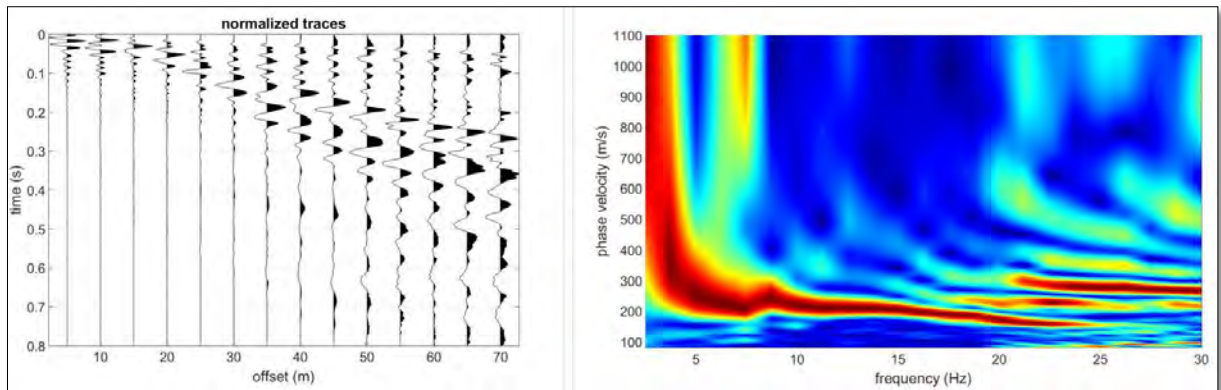
Tempi di primo arrivo

Receiver Station	First Break (ms) - SR2 ONDE P						
	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7
1	0,00	24,05	34,30	42,36	53,47	62,74	75,07
2	8,79	17,21	30,40	38,45	48,83	59,20	70,92
3	15,99	11,11	26,37	33,08	45,53	55,79	68,24
4	24,41	0,00	21,73	29,91	42,85	52,86	65,19
5	28,56	12,45	18,07	26,37	39,80	51,39	62,62
6	32,35	17,82	12,94	23,07	37,35	48,95	59,94
7	34,42	21,48	0,00	18,92	34,79	46,51	57,37
8	38,33	25,02	12,57	13,55	31,49	42,48	54,69
9	41,38	29,30	16,60	6,71	28,93	38,94	50,78
10	44,80	31,49	21,00	0,00	23,44	33,57	46,88
11	47,85	34,55	25,27	5,25	18,07	31,25	44,92
12	51,64	39,06	30,15	11,84	9,64	28,93	43,21
13	53,83	41,87	34,06	18,56	0,00	23,32	38,45
14	56,40	45,41	36,62	23,56	8,42	16,97	34,55
15	60,67	48,95	40,53	28,32	15,02	11,35	31,37
16	63,23	52,73	44,92	33,94	21,85	0,00	26,49
17	66,41	54,93	47,24	36,26	26,61	12,45	20,51
18	69,95	58,96	49,93	39,06	31,01	19,29	13,79
19	75,20	64,45	52,00	43,70	36,38	25,51	0,00

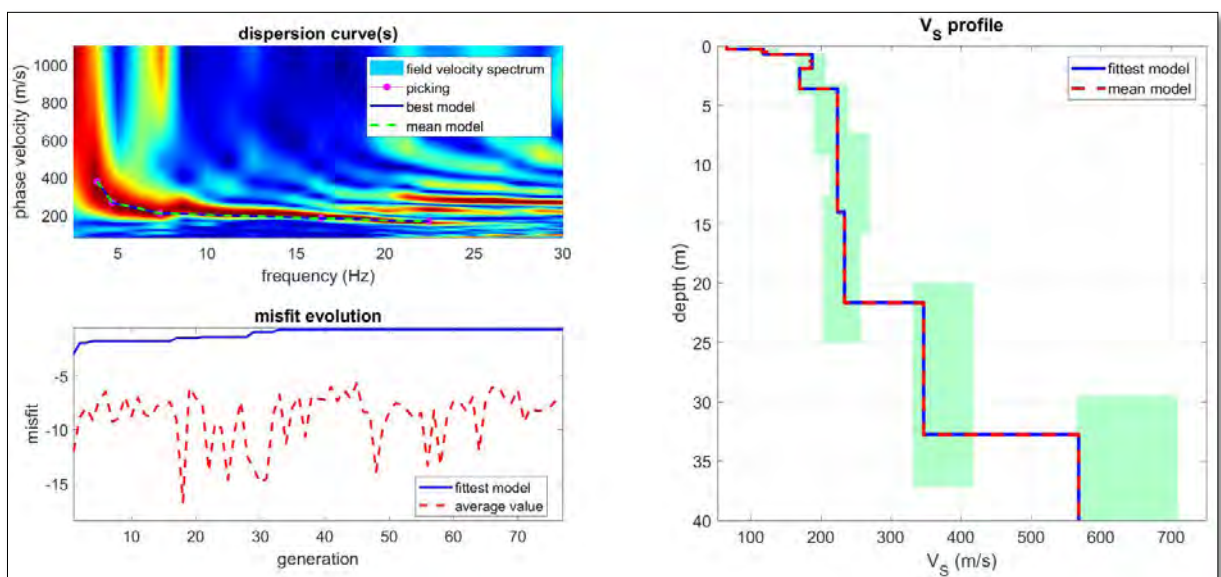


4.3 Prospezione MASW/Re.Mi.

La prospezione sismica denominata MASW e Re.Mi. è stata eseguita sullo stesso allineamento utilizzato per la prospezione sismica a rifrazione in onde P SR2. Di seguito le tracce sismiche acquisite in campagna e lo spettro di velocità ad esse corrispondente su cui è stato eseguito il *picking* del modo fondamentale:



Nelle figure sottostanti sono riportati i risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi di dati MASW. In alto a sinistra lo spettro osservato bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f) su cui sono sovrapposte le curve di dispersione piccate e le curve del modello medio individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale della velocità delle onde di taglio V_s identificato. In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (misfit evolution) ovvero delle varie combinazioni che l'algoritmo utilizzato dal software esegue per l'inversione delle curve di dispersione e che appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici (Dal Moro et al., 2007).

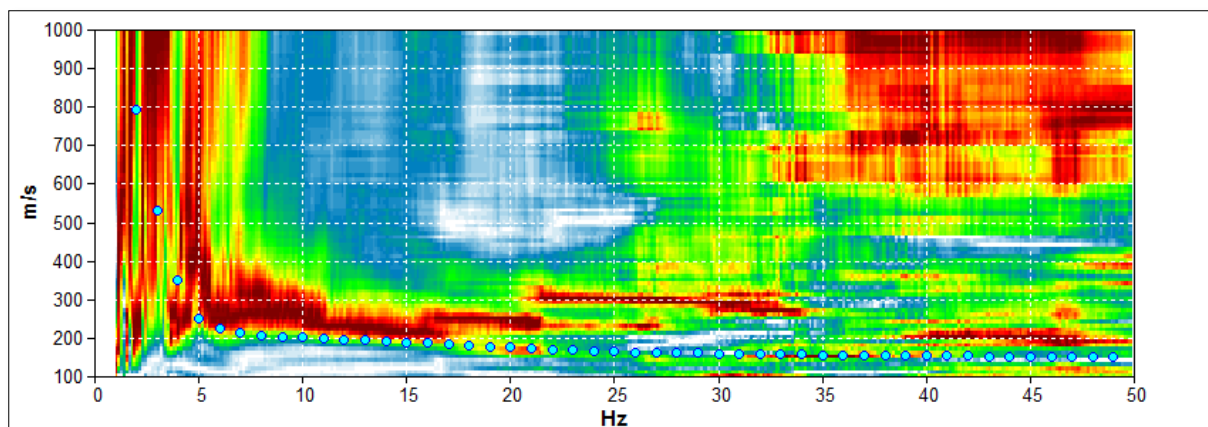


- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

Sullo stesso allineamento della prospezione sismica attiva MASW, come già detto sono stati acquisite registrazioni in passivo elaborate con tecnica Re.Mi.

Di seguito si riporta lo spettro di velocità corrispondente alla metodologia Re.Mi, la curva di dispersione ottenuta dall'inversione e il *picking* del modo fondamentale da cui si ricava il profilo di velocità delle onde S corrispondente:

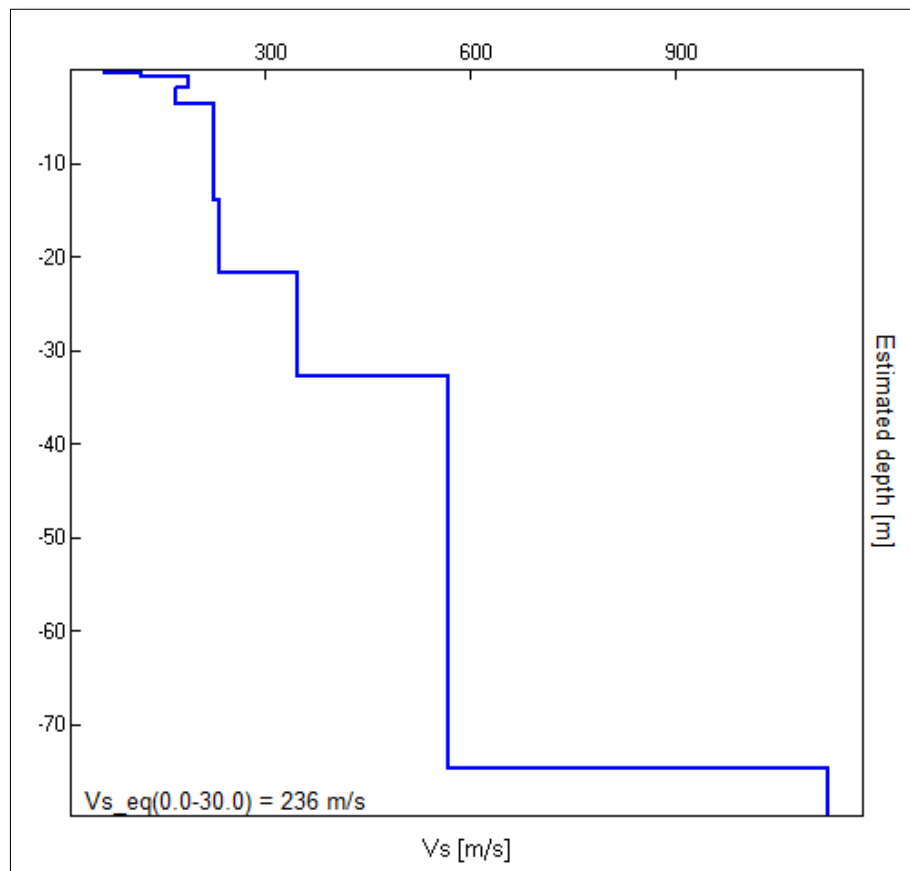


In tabella e in figura sottostante sono riportati i sismostrati e il profilo di velocità del modello medio individuato a cui corrisponde una $V_{s,eq}$ di **236 m/s** a partire dal p.c.

Spessore (m)	V_s (m/s)
0.28	66
0.42	118
1.18	188
1.74	170
4.80	224
5.60	224
7.60	234
11.10	347
42.00	568
semi-spazio	1124

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)



Sintetizzando il profilo di velocità ottenuto, il modello sismostratigrafico del sottosuolo è assimilabile a quattro unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche rilevate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

- Il **primo sismostrato** ha uno spessore di 3,60 m, con velocità delle onde S comprese tra 66 e 180 m/s riferibili, nel contesto litologico del profilo sismico investigato, a terreno vegetale e depositi detritici sciolti;
- Il **secondo sismostrato** presenta uno spessore di 29,10 m con velocità V_s compreso tra 224 e 347 m/s e corrisponde a depositi mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche;
- Il **terzo sismostrato** presenta uno spessore di 42,00 m con velocità V_s di 568 m/s e corrisponde a consistenti/addensati con buone caratteristiche geotecniche;
- Segue, a profondità maggiori di 75,00 m, un **quarto sismostrato** caratterizzato da velocità delle onde di taglio di 1124 m/s riferibile al bedrock sismico con ottime caratteristiche geotecniche.

A partire dai valori di velocità delle onde sismiche V_P (m/s) misurate con la sismica a rifrazione e dalla velocità delle onde S, V_S (m/s) misurate con la prospezione sismica MASW e Re.Mi.; adottando opportuni valori del peso di volume γ (g/cm³), rappresentativi dei litotipi presenti, è stato possibile inoltre stimare attraverso relazioni teoriche, i moduli dinamici del sottosuolo per ogni orizzonte sismico individuato.

- Rapporto V_P/V_S

Utile per fornire informazioni sullo stato di consolidazione e sulla presenza di fluidi nei mezzi porosi.

- Coefficiente di Poisson (μ)

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2}$$

- Modulo di taglio dinamico (G_0)

E' definito dalla seguente equazione:

$$G_0 = \gamma \cdot V_S^2$$

Dove γ = densità

Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua.

- Modulo di Young (E_d)

E' definito dalla seguente equazione:

$$E_d = [V_P^2 \cdot \gamma \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)] / (1-\mu)$$

Con μ = coeff. di Poisson

Rigidità o impedenza sismica

$$R_s = \gamma V_s$$

Tale modulo dipende dalla porosità e dalla pressione litostatica.

Modulo di incompressibilità dinamica (Bulk Modulus)

E' definito dalla seguente equazione:

$$K = \gamma [V_P^2 - 4/3 \cdot V_S^2]$$

Parametri fisici e dinamici medi del sottosuolo investigato										
Strato	Spessore	Vp m/s	Vs m/s	γ gr/cm ³	μ (-)	Vp /Vs (-)	E _d Kg/cm ²	R T/m ² *s	G ₀ Kg/cm ²	K Kg/cm ²
I°	3.60	650	162	1.8	0.47	4.0	1386	292	472	6975
II°	29.0	1800	273	1.9	0.49	6.6	4215	519	1416	59672
III°	42.0	3000	568	2.0	0.48	5.3	19118	1136	6452	171397
IV°	-	4000	1124	2.1	0.46	3.6	77318	2360	26531	300625

Vp= velocità onde P (m/s); Vs= velocità onda S (m/s); γ = densità (g/cm³); μ = coeff. di Poisson; E_d= Modulo di Young dinamico (Kg/cm²); R= rigidità sismica (T/m²*s); G₀=Modulo di taglio dinamico (Kg/cm²); K=Modulo di incompressibilità (Kg/cm²)

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW/Re.Mi.) ha consentito di determinare il profilo verticale della V_S (e dei moduli dinamici) e di conseguenza del parametro V_{S,eq}, pari alla V_{S30} (in quanto non è stato rinvenuto il bedrock entro i primi 30 m) risultato per il modello medio pari a **236 m/s** (considerando come riferimento il piano campagna).

Linea sismica	V _{S,eq} (m/sec)	Categoria di Suolo
MASW/Re.Mi.	236	"C"

Rispetto alle norme tecniche per le costruzioni (DM 17 gennaio 2018) il sito in esame rientra quindi nella categoria **C** ovvero:

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

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

5. RAPPORTO FOTOGRAFICO



Fasi di acquisizione della prospezione sismica a rifrazione SR1

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)



Fasi di acquisizione della prospezione sismica a rifrazione SR2 e MASW/Re.Mi.

- INDAGINI GEOFISICHE -

Lavori di ampliamento per la costruzione di aule speciali ed auditorium e manutenzione straordinaria finalizzati a garantire l'agibilità e il diritto allo studio del liceo umanistico/musicale/coreutico "Pitagora" di Montalbano Jonico (MT)

6. UBICAZIONE INDAGINI



LEGENDA: SR1 Coordinate (UTM WGS84 33N):	Prospezione sismica a rifrazione SR1 SR2 - MASW/Re.Mi.	MASW/Re.Mi. G1: 633413 m E 4460900 m N G2: 633521 m E 4460887 m N	Prospezione sismica MASW e Re.Mi. G25: 633523 m E 4460847 m N G19: 633476 m E 4460807 m N	Data: 26 Maggio 2023
--	---	--	--	--------------------------------