

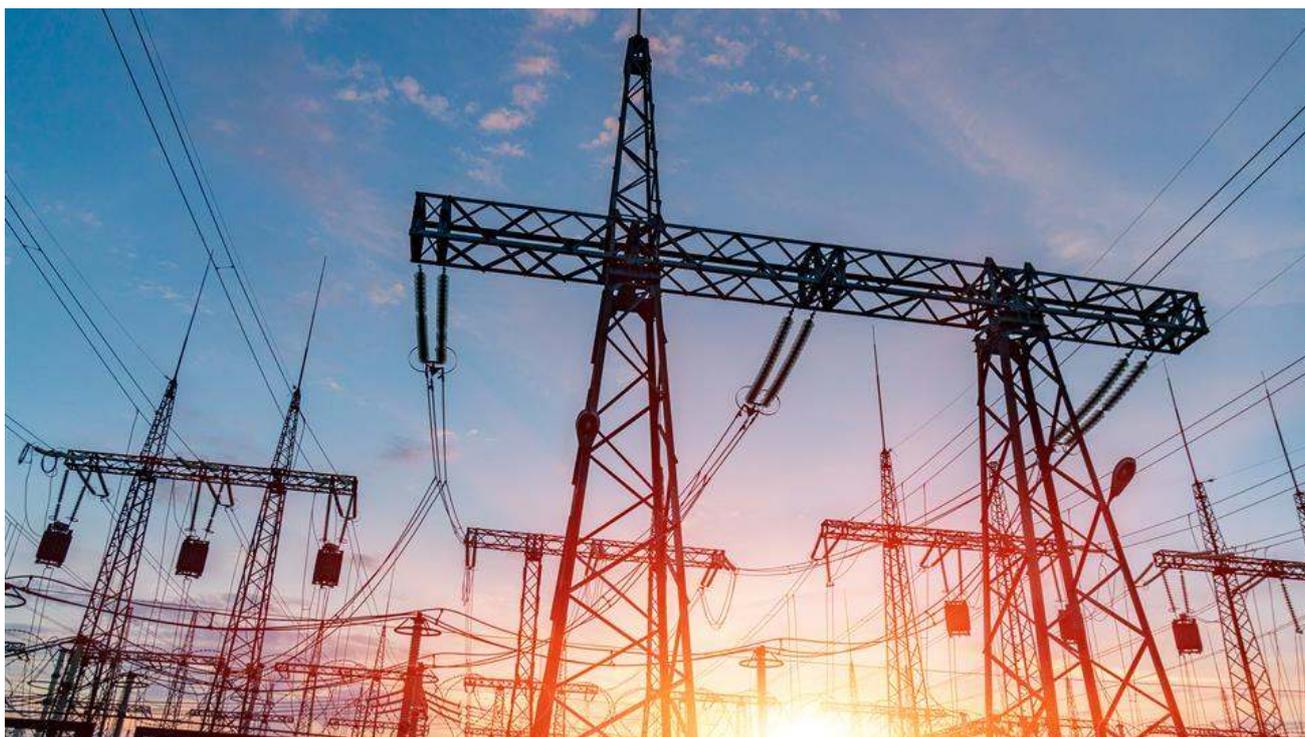
Geo Rinnovabile S.r.l.

Impianto di rete per la connessione alla RTN

Comune di Sassari (SS)

**Progetto Definitivo nuova Stazione RTN 380/150/36 kV
"Olmedo" e nuovi Raccordi Linea**

Allegato C.09 - Relazione Geofisica e Sismica preliminare



Professionista incaricato: Dott. Geol. Domenico Praticò Ordine dei Geologi Regione Sardegna n. 415
Geol. Mario Nonne – Ordine dei Geologi Regione Sardegna – Sez. A n. 424

Rev. 0

Agosto 2022

wood.

Indice

1	Introduzione	4
2	Normativa di riferimento	5
3	Inquadramento del sito	6
4	Prospezione sismica	7
4.1	Prospezione sismica a rifrazione	7
4.1.1	Stendimenti sismici a rifrazione	9
4.1.2	Valutazione escavabilità terreni	16
4.2	Prove MASW	17
4.2.1	MASW 1	18
4.2.2	MASW 2	22
5	Correlazioni stratigrafiche	27
5.1	Classificazione del sottosuolo (D.M. 17.01.2018)	28
5.1.1	Stendimento MASW 1	28
5.1.2	Stendimento MASW 2	29
6	Modellazione sismica	31
6.1	La sismicità in sardegna	31
6.2	Caratterizzazione sismogenetica	34
6.3	Modellazione sismica del sito	36
6.3.1	Pericolosità sismica di base	36
6.3.2	Risposta sismica locale	38

Appendici

Appendice 01 Report fotografico

Questo documento è di proprietà di Geo Rinnovabile S.r.l. e il detentore certifica che il documento è stato ricevuto legalmente. Ogni utilizzo, riproduzione o divulgazione del documento deve essere oggetto di specifica autorizzazione da parte di Geo Rinnovabile S.r.l.

1 Introduzione

Su incarico ricevuto in data 22/07/2022 dalla Società Geo Rinnovabile S.r.l. (Numero d'ordine GEO/SAS/ORD/2022/10), si redige la presente relazione geofisica e sismica per il progetto definitivo della nuova Stazione elettrica di trasformazione 380/150/36 kV della RTN denominata "Olmedo" e dei relativi raccordi linea per la connessione in entra – esce sulla linea RTN a 380 kV "Fiumesanto Carbo - Ittiri".

La realizzazione di questa infrastruttura si rende necessaria per via delle molteplici richieste di connessione pervenute a Terna nell'intorno della zona in cui è prevista la realizzazione dell'impianto agro-fotovoltaico della Società.

Durante il tavolo tecnico convocato da Terna in data 28 giugno 2022 con tutte le società titolari di soluzione di connessione alla nuova stazione RTN denominata "Olmedo", la Società Geo Rinnovabile S.r.l. è stata nominata - congiuntamente con la società Sigma Ariete S.r.l - come referente con Terna, e si è impegnata a sviluppare la progettazione delle opere di rete per la connessione (l'"Impianto di Rete"), così identificate:

1. Nuova Stazione elettrica di trasformazione 380/150/36 kV denominata "Olmedo" (di seguito "Stazione RTN"), ubicata nel Comune di Sassari, in località Saccheddu;
2. Due nuovi raccordi linea per il collegamento della nuova Stazione RTN "Olmedo" in entra-esce all'esistente linea a 380 kV della RTN "Fiumesanto Carbo - Ittiri". I raccordi linea a 380 kV si sviluppano per una lunghezza di circa 70 m ciascuno e sono localizzati nella stessa località della Stazione RTN. L'apertura della linea 380 kV "Fiumesanto Carbo – Ittiri" comporterà la dismissione di un tratto di elettrodotto e la rimozione del traliccio P-39 esistente.

Il presente studio è basato sia su una ricerca bibliografica che su indagini di campo preliminari ed ha comportato lo svolgimento delle seguenti attività:

- il sopralluogo dell'area in esame;
- l'analisi geologica, geomorfologica, idrologica ed idrogeologica dell'area d'interesse e delle zone limitrofe;
- lo studio del terreno interessato dalle opere in progetto;
- un'indagine geognostica di tipo diretta svolta a **Luglio e Agosto 2022**, comprendente l'esecuzione di n. 8 prove penetrometriche dinamiche continue medio leggere (di tipo diretto) ed una indagine sismica (di tipo indiretto), con la realizzazione di n. 2 stendimenti MASW e n. 2 tomografie elettriche;
- l'esame dei problemi geologico-tecnici connessi con le opere in progetto.

2 Normativa di riferimento

Di seguito si elencano le principali norme di riferimento seguite per la redazione della presente relazione:

- “DECRETO 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (18A00716) (GU Serie Generale n. 42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8);
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici “Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale”;
- Delib. G.R. 30 marzo 2004 n. 15/31 pubblicata nel B.U. Sardegna, 21 agosto 2004 n. 23 – disposizioni preliminari in attuazione dell'O.P.C.M. 20 marzo 2003, n. 3274 recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”;
- raccomandazioni sulle indagini A.G.I., 1977;
- Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico - Interventi sulla rete idrografica e sui versanti. Legge 18 maggio 1989, n. 183, art. 17, comma 6, ter D.L. 180/98 e successive modifiche ed integrazioni;
- Eurocodice 8 (1998) Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003).

3 Inquadramento del sito

L'area identificata per l'ubicazione della nuova Stazione RTN si trova nella parte occidentale del Comune di Sassari (SS), in località Saccheddu. Trattasi di un'area pianeggiante, con una quota variabile tra 75-80 m s.l.m. Le coordinate geografiche del baricentro della stazione sono le seguenti (coordinate UTM fuso 32T):

Latitudine: 4.507.258 N

Longitudine: 450.120 E

Rispetto alla linea RTN a 380 kV "Fiumesanto Carbo - Ittiri", l'area identificata si trova a sud-est della linea medesima, nelle immediate vicinanze, ad una distanza in linea d'aria di circa 50 m. La nuova stazione si troverebbe ad una distanza di circa 18 km dalla stazione RTN 380 kV "Fiumesanto Carbo" e a circa 24 km dalla Stazione RTN 380 kV "Ittiri".

Per il collegamento della nuova stazione alla linea 380 kV "Fiumesanto Carbo - Ittiri" sarà necessario realizzare due nuovi raccordi linea in AT, della lunghezza di circa 70 m ciascuno.

L'area è facilmente raggiungibile dalla viabilità esistente, trovandosi all'incrocio tra:

- la SP N. 65 "Strada Provinciale La Ginestra Sella Larga" che si sviluppa in direzione est-ovest, a sud del sito. E' una strada asfaltata in buone condizioni;
- la Strada vicinale "da Gianni Abbas a Zunchini" (anche denominata Strada vicinale Saccheddu) che si dirama dalla SP N. 65 innestandosi nella SP N. 18, e si sviluppa in direzione sud-ovest/nord-est, a ovest del sito identificato. Tale strada è in buone condizioni, realizzata in misto granulare stabilizzato.

L'accesso alla Stazione RTN "Olmedo" sarà pertanto possibile sia dalla Strada Vicinale Saccheddu, che dalla SP N. 65, attraverso la realizzazione di una nuova strada in pietrisco e misto stabilizzato, opportunamente compattata, perimetrale alla Stazione stessa.

Geograficamente il sito dell'impianto agro-fotovoltaico è inquadrabile nel F° 459 Sez.IV "LA CRUCCA" in scala 1:25.000 (IGM) e nella Carta Tecnica Regionale nella Sezione 459050 in scala 1:10.000.

La Stazione occuperà un'area di circa 66.000 m², avente una lunghezza di circa 343 m e una larghezza di circa 175 m nella sezione 380/36 kV, e circa 220 m nella sezione 150 kV. La Stazione sarà completamente recintata e l'accesso avverrà da un cancello carrabile e da un cancello pedonale.

4 Prospezione sismica

4.1 Prospezione sismica a rifrazione

L'esecuzione di indagini sismiche ha lo scopo di ottenere informazioni di tipo geotecnico sul comportamento fisico-meccanico dei corpi geologici investigati - attraverso la determinazione dei relativi parametri - ed informazioni di tipo geologico sui caratteri strutturali e stratigrafici del volume del sottosuolo indagato.

Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consta nel creare delle onde artificiali nel terreno e registrarle attraverso parametri di velocità. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità, che dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fratturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, la possibile presenza di vuoti ecc.

Le indagini sismiche sono utilizzate per scopi geotecnici, per ricerche minerarie e per dare un valore del grado di scavabilità del terreno; i risultati devono preferibilmente essere correlati con indagini di tipo diretto. La sismica a rifrazione tradizionale fornisce risultati leggibili e interpretabili quando le formazioni litologiche hanno caratteristiche elastiche crescenti con la profondità, mentre non dà indicazioni stratigrafiche quando con l'aumentare della profondità vi sono formazioni con caratteristiche elastiche inferiori (formazione fantasma). Questo limite dell'indagine viene superato con i modelli di inversione tomografica utilizzati nel presente lavoro.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde sismiche è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

1. Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
2. Ricostruzione delle domocrone e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;
3. Verifica della coerenza tra domocrone interpretate e calcolate;
4. Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo tomografico.

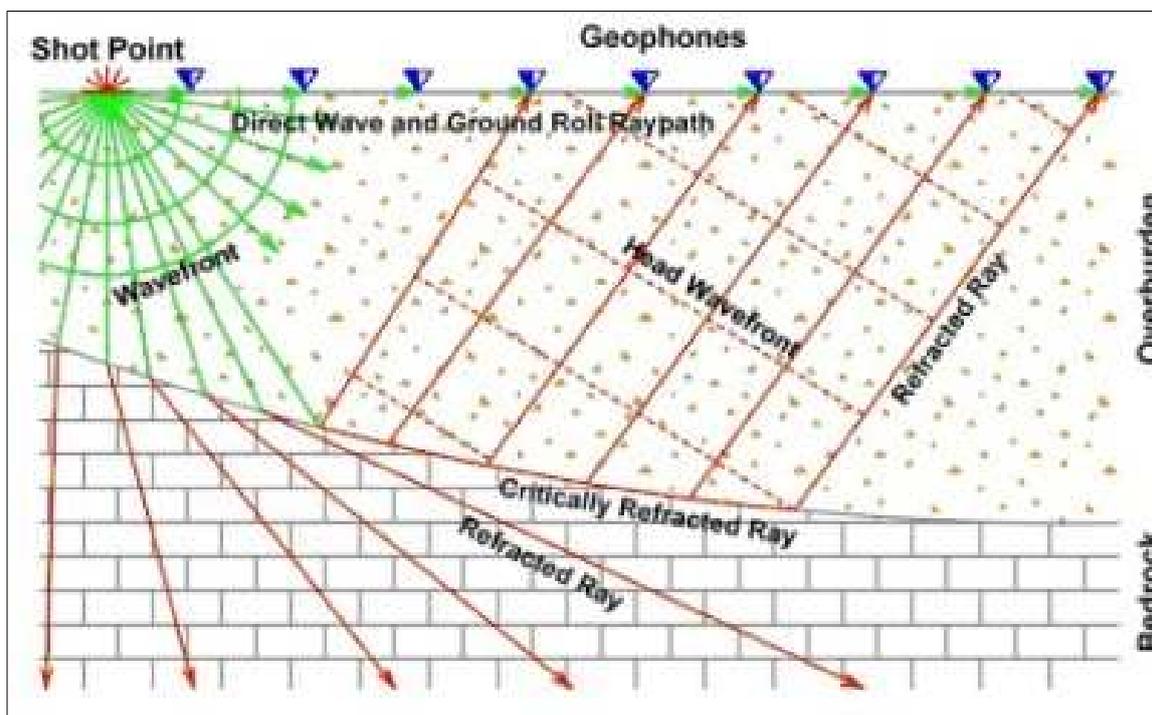


Figura 4.1 - Schema sismica a rifrazione

La strumentazione utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, 24 canali, range dinamico 144db e output dei dati in SEG-Y o SEG-2.

Tabella 4.1 - Caratteristiche tecniche strumentazione utilizzata

A/D conversion	24 bit high-speed sigma delta converters
Dynamic Range	144 dB (system) - Greater than 118 dB (measured at 2 msec)
Bandwidth	DC to 15 KHz - Analog filter flat response to 8000Hz - Digital filter bandwidth = 85% of Nyquist frequency
Common Mode Rejection	Greater than 100 dB
Crosstalk	Better than 125 dB
Noise Floor	0.2 microvolt RMS noise (2msec sample rate)
Trigger accuracy	+/- 1 microsecond at all sample rates
Maximum Input Signal	Standard (x 2 gain) 3.58 Volts peak to peak - (optional: (x 1 gain) 7.16 Volts peak to peak
Input Impedance	100 K Ohms
Preamplifier Gains	X2 (6dB) and x32 (30 dB) standard; software selectable (x1 (0 dB) and x16 (24 dB) available on special request)
Anti-alias Filters	85% of Nyquist frequency
Digital Filters	Low Cut – User Selectable frequency. Notch – 50 or 60 Hz standard; User Selectable. High Cut - User Selectable
Sample Interval	0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 millisecond
Sample Frequency	48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5 sample/second

L'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation).

L'energizzazione del terreno, per la generazione delle onde longitudinali, è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter) su piattello di battuta in alluminio.

Per la ricezione delle onde longitudinali (P), durante l'indagine di tomografia sismica, sono stati usati geofoni verticali a corto periodo (14 Hz).



Figura 4.2 - Sistema di ricezione e elaborazione – sistema di battuta onde P

Per l'elaborazione e l'interpretazione tomografica è stato utilizzato il programma "Rayfract" sviluppato dalla Intelligent Resources Inc. (Canada), che utilizza come modello di calcolo il WET tomography processing e VET tomography processing.

La prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura del tempo impiegato dalla perturbazione elastica indotta nel terreno, a percorrere la distanza tra sorgente e geofoni. La velocità di propagazione dell'onda longitudinale o trasversale rifratta dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla conformazione dei terreni attraversati. Ne risulta che la relazione velocità dell'onda e distanza sorgente – geofono (dromocrona) consente, applicando degli algoritmi, di risalire agli spessori degli strati del sottosuolo con caratteristiche elastiche differenti. Le procedure di inversione rientranti nella famiglia delle tomografie sono volte a fornire un'immagine dettagliata della distribuzione all'interno della terra di un parametro fisico riconducibile alle misure effettuate. Nel caso della tomografia sismica si otterrà un'immagine relativa alla velocità delle onde sismiche. L'esecuzione della prova tomografica richiede un numero minimo di battute spaziate per almeno un numero di 6 e nel presente ne sono state eseguite 9. La tomografia sismica consente di ottenere un'immagine dettagliata del sottosuolo superando in parte i limiti della sismica a rifrazione tradizionale. Quest'ultima tecnica, infatti, non consente di individuare forti variazioni laterali di velocità, risente in modo catastrofico delle inversioni di velocità e la presenza di gradini viene male interpretata. La tomografia sismica consente di superare questi problemi. Inoltre, si presta a individuare i sistemi di fratture nel substrato, a individuare la presenza di oggetti sepolti (cunicoli, fondazioni, vasche), a delimitare il volume dei corpi di frana o di discariche. Per l'elaborazione si è utilizzato il software Rayfract, in grado di elaborare una tomografia basata sul modello di calcolo WET (Wavepath eikonal travelttime) che consente di ottenere sezioni tomografiche ad alta risoluzione in terreni topograficamente irregolari e substrati con morfologia complessa caratterizzati da variazioni laterali di velocità. Il modello di calcolo consente un'ottimizzazione non lineare dei tempi di arrivo dei travel-time delle onde sismiche dirette e rifratte registrate.

Il processo di calcolo è basato sull'elaborazione e sviluppo delle seguenti fasi:

1. Ricostruzione del gradiente di velocità (stratigrafie di velocità sismica) attraverso la tecnica di inversione Delta-t-V, con la quale si ottengono dei profili 1D "profondità-velocità" dai dati di travel-time. La tecnica di inversione Delta-t-V permette di ricostruire con cadenza pari alla metà della cadenza dei geofoni (CMP = Common Mid Point) le successioni di velocità compatibili con l'andamento di tutte le possibili dromocrone nei punti intermedi tra punto di tiro e geofono. Dal modello ricostruito come successione di stratigrafie di velocità viene elaborato un modello a elementi finiti di piccolissime dimensioni che può già rappresentare un attendibile modello del sottosuolo. Tuttavia questo rappresenta una prima approssimazione alla soluzione.
2. Elaborazione dell'inversione tomografica, in maniera iterativa, del modello Delta-t-V mediante la tecnica 2D WET (Wavepath Eikonal Traveletime). La teoria in proposito basa i modelli tomografici sulla modellizzazione del percorso di un fascio di raggi per ogni primo arrivo, contrariamente a quanto previsto con la tomografia convenzionale basata sulla modellizzazione del percorso di un raggio sismico per ogni primo arrivo. In pratica si effettua il calcolo delle differenze dei tempi di arrivo dai vari punti di tiro ai vari geofoni, tra i valori sperimentali misurati nei sismogrammi ed i tempi calcolati sul modello di partenza. In base alle differenze riscontrate, per ciascun percorso delle onde sismiche, si apportano modifiche, in aumento o in diminuzione, delle velocità che caratterizzano i vari elementi che sono stati interessati dal passaggio del fronte d'onda considerato. Ad ogni iterazione, dopo avere apportato le modifiche alle velocità dei vari elementi, il nuovo modello viene sottoposto ad una operazione di smoothing che porta ad una migliore omogeneità dei valori di velocità entro aree di dimensioni maggiori. In genere sono sufficienti da 10 a 20 iterazioni per giungere ad un modello che porta a scarti medi tra i tempi (Traveltime) dei vari percorsi dell'ordine di qualche millisecondo (Schuster & Quintus-Bosz, 1999).

I risultati vengono graficamente rappresentati con una sezione in cui le diverse scale cromatiche indicano le diverse velocità delle onde V_p misurate, con soluzione di continuità, differentemente dalla rappresentazione con il metodo GRM, dove gli stacchi tra un sismostrato e l'altro sono bruschi e repentini.

4.1.1 Stendimenti sismici a rifrazione

La campagna indagini a previsto l'esecuzione di due stendimenti sismici a rifrazione da 24 geofoni con passo da cinque metri e sette punti di battuta tutte interne allo stendimento. Entrambe le indagini si sviluppano su dei lotti pianeggianti e sono stati posizionati su indicazione della committenza.

4.1.1.1 Tomografia sismica 1

Il primo stendimento tomografico sismico si sviluppa con una direttrice SW – NE. Per una migliore comprensione si riporta uno schema grafico dove in rosso sono indicati i punti di battuta e in grigio i geofoni.



Figura 4.3 – Schema dello stendimento tomografico

Tabella 4.2 – Coordinate dello stendimento tomografico

STENDIMENTO COORDINATE WGS		
Geofono 1	40.715034°N	8.408322°E
Geofono 24	40.715787°N	8.409280°E



Figura 4.4 - Localizzazione sismica N. 1

I dati ottenuti in campagna hanno permesso, attraverso l'elaborazione delle dromocrone e l'individuazione dei primi arrivi, l'elaborazione di un modello tomografico con l'andamento delle velocità delle onde P – longitudinali.

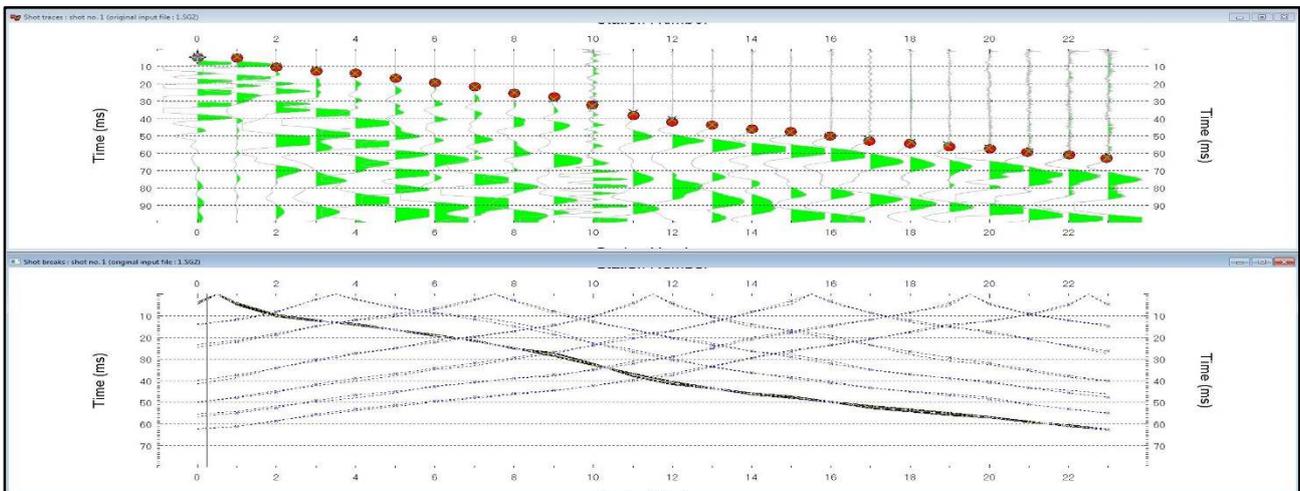


Figura 4.5 - Andamento delle velocità delle onde P

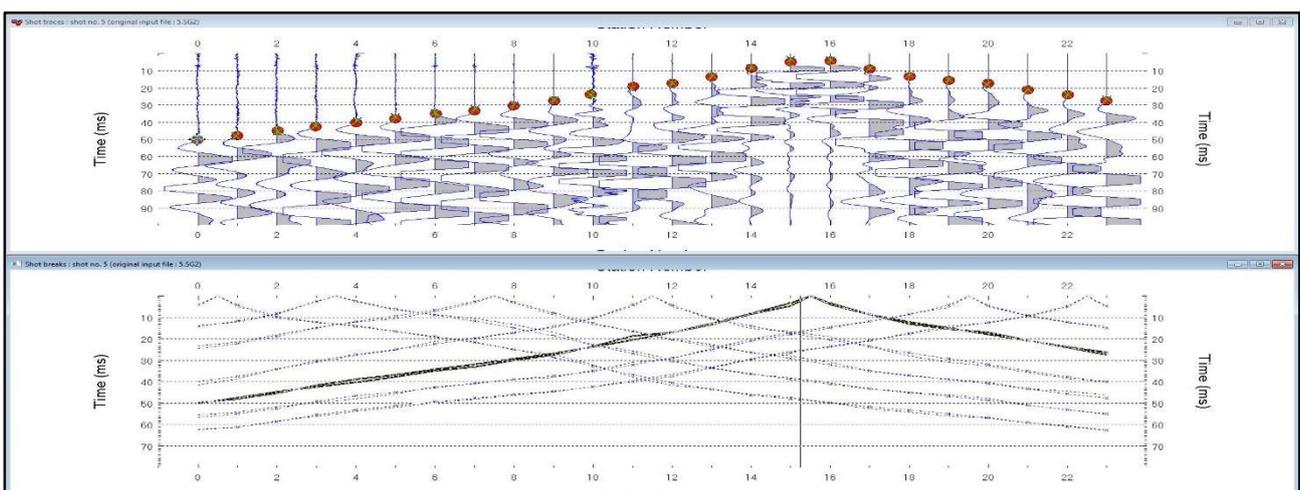


Figura 4.6 - Andamento delle velocità delle onde P

La sezione tomografica riportata di seguito evidenzia un graduale aumento della velocità con l'aumentare della profondità. Nel primo metro e mezzo di profondità si rilevano velocità sempre inferiori ai 600 m/sec associabili ad un terreno aerato ma addensato. Al di sotto di questo livello si ha un graduale aumento di velocità arrivando alla profondità massima di 8 metri con delle velocità massime di 1400 m/sec, che si possono associare a delle formazioni calcarenitiche spesso evidenti in affioramento in questo settore di territorio.

Al di sotto si hanno velocità crescenti associabili a formazioni lapidee con grado di fratturazione e alterazione decrescente con l'aumentare della profondità associabili alle formazioni calcaree e calcaree dolomitiche. Tra i 18 m e i 20 m si rileva un aumento delle caratteristiche elastiche che possono associarsi ad un cambiamento stratigrafico tra formazioni calcaree e/o calcaree dolomitiche.

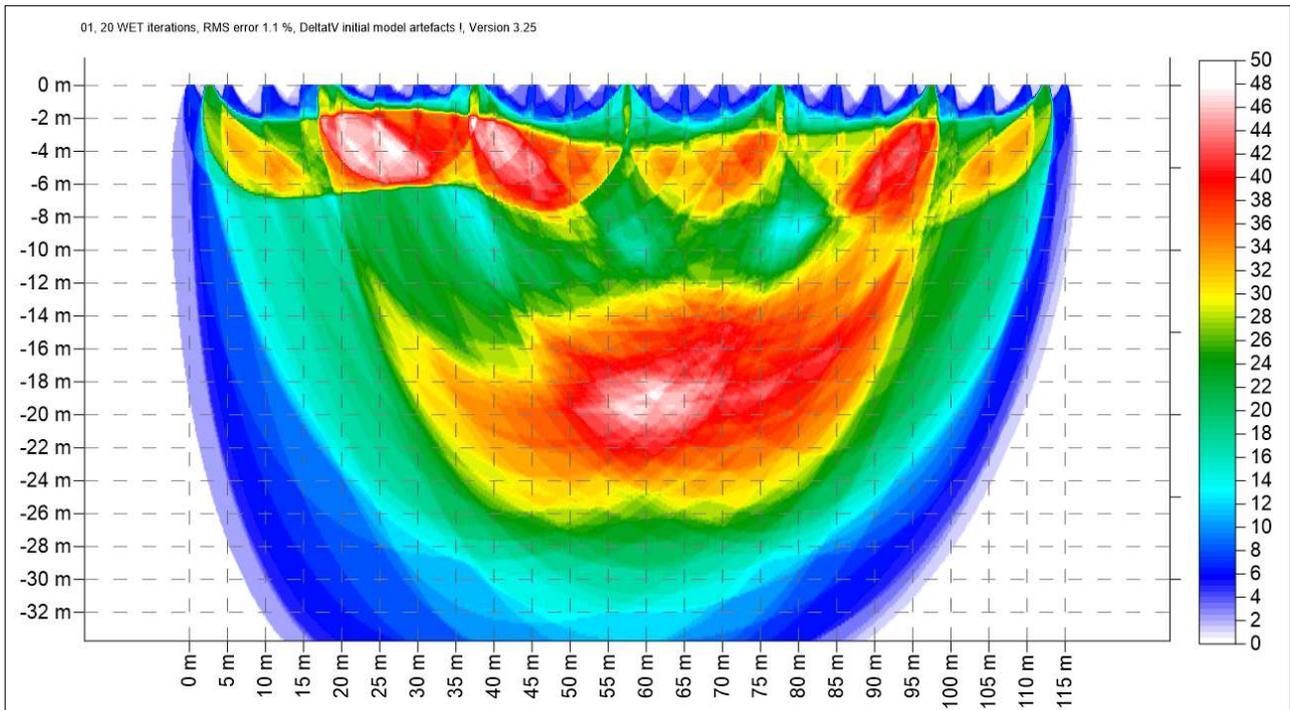


Figura 4.7 - Rappresentazione delle rifrazioni sismiche registrate

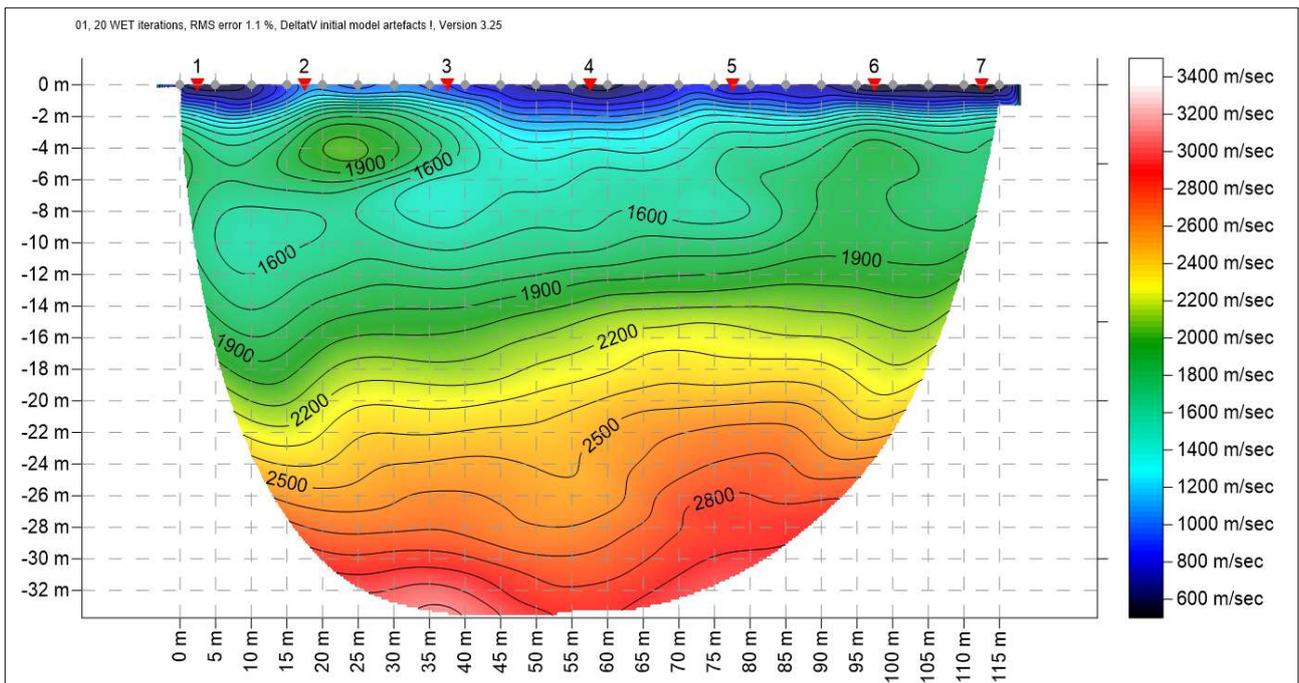


Figura 4.8 - Sezione tomografica

4.1.1.2 Tomografia sismica 2

Il secondo stendimento tomografico sismico si sviluppa con una direttrice S – N. Per una migliore comprensione si riporta uno schema grafico dove in rosso sono indicati i punti di battuta e in grigio i geofoni.

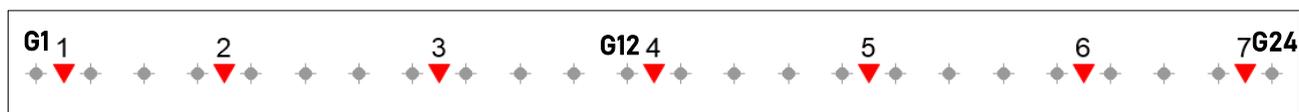


Figura 4.9 – Schema dello stendimento tomografico

Tabella 4.3 – Coordinate dello stendimento tomografico

STENDIMENTO COORDINATE WGS		
Geofono 1	40.713625°N	8.410370°E
Geofono 24	40.714670°N	8.410507°E

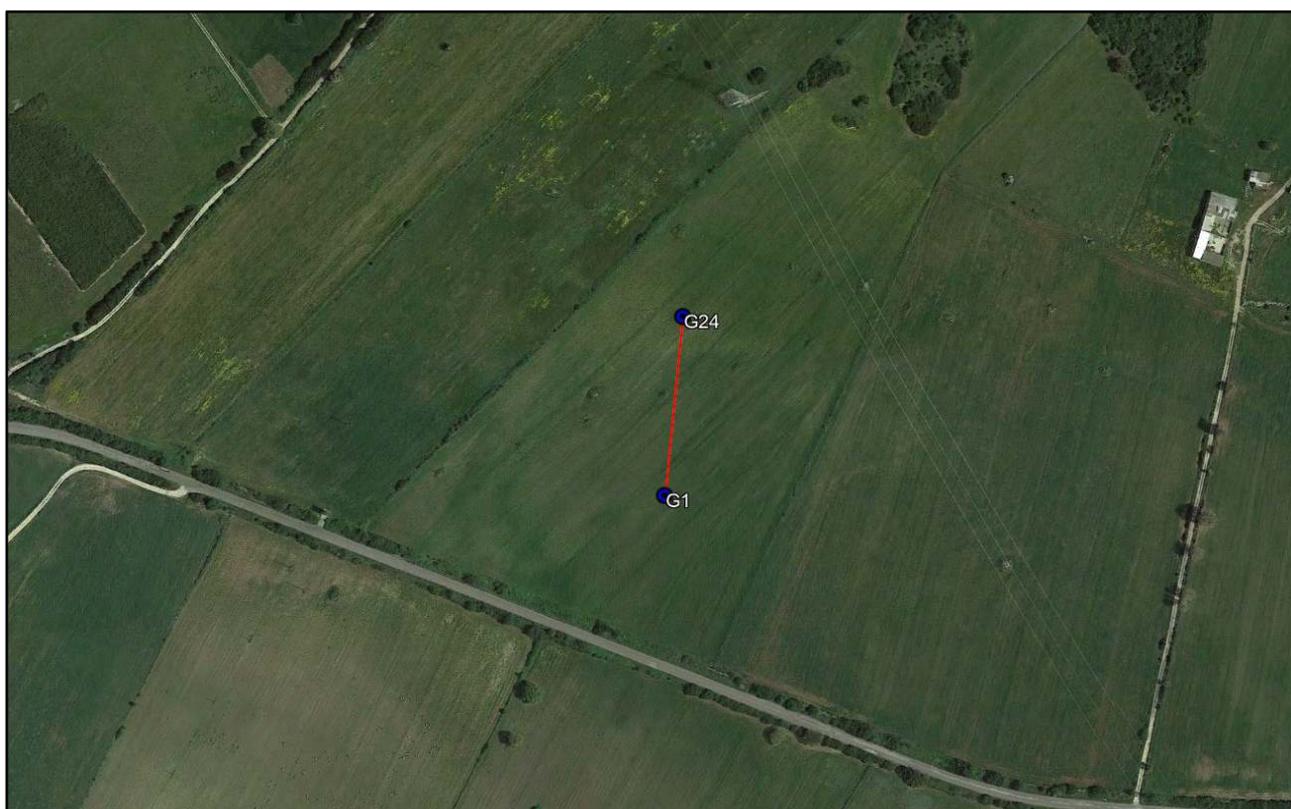


Figura 4.10 - Localizzazione sismica

I dati ottenuti in campagna hanno permesso, attraverso l'elaborazione delle dromocrone e l'individuazione dei primi arrivi, l'elaborazione di un modello tomografico con l'andamento delle velocità delle onde P – longitudinali.

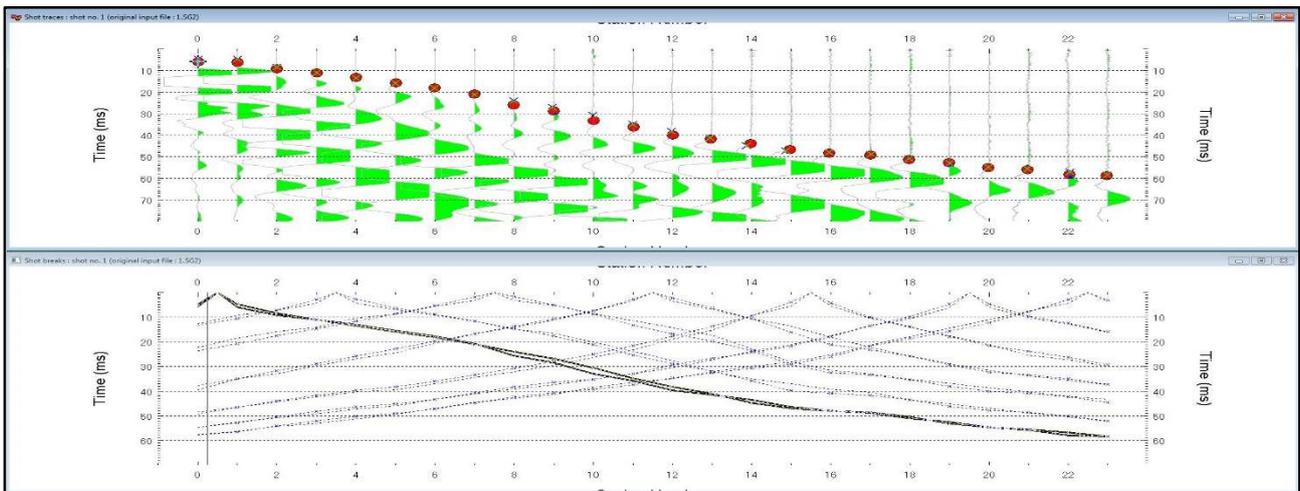


Figura 4.11 - Andamento delle velocità delle onde P

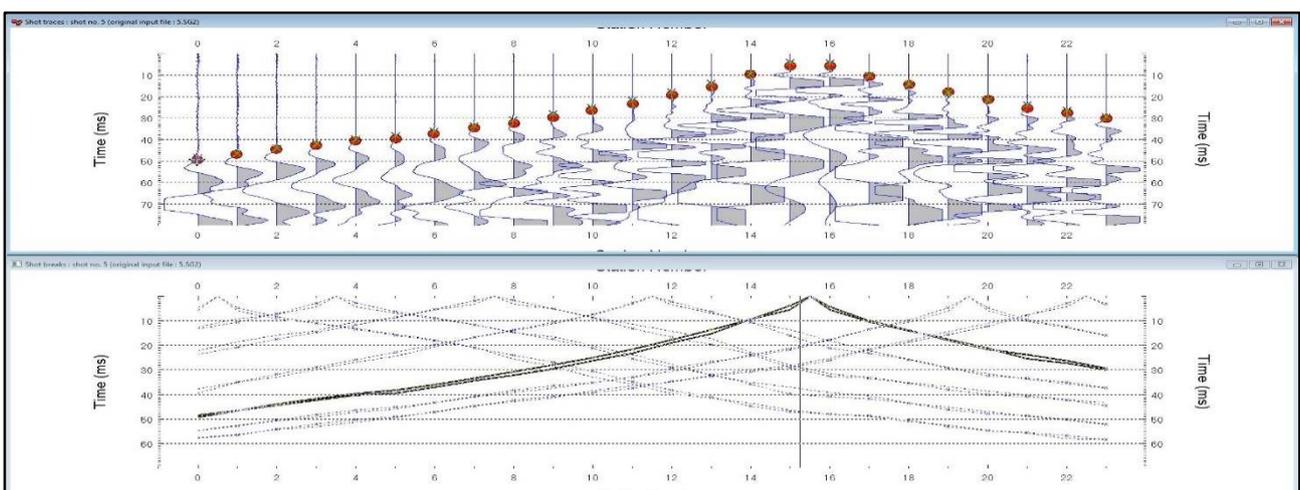


Figura 4.12 - Andamento delle velocità delle onde P

La sezione tomografica evidenzia un graduale aumento della velocità con l'aumentare della profondità. Nel primo metro e mezzo di profondità, con discontinuità, si rilevano velocità sempre inferiori ai 600 m/sec associabili ad un terreno aerato ma addensato. Al di sotto di questo livello si ha un graduale aumento di velocità arrivando alla profondità massima di 9 metri con delle velocità massime di 1400 m/sec che si possono associare a delle formazioni calcarenitiche spesso evidenti in affioramento in questo settore di territorio.

Al di sotto si hanno velocità crescenti associabili a formazioni lapidee con grado di fratturazione e alterazione decrescente con l'aumentare della profondità associabili alle formazioni calcaree e calcaree dolomitiche. Ai 15 m si rileva un aumento delle caratteristiche elastiche che si possono associare ad un cambiamento stratigrafico tra formazioni calcaree e/o calcaree dolomitiche.

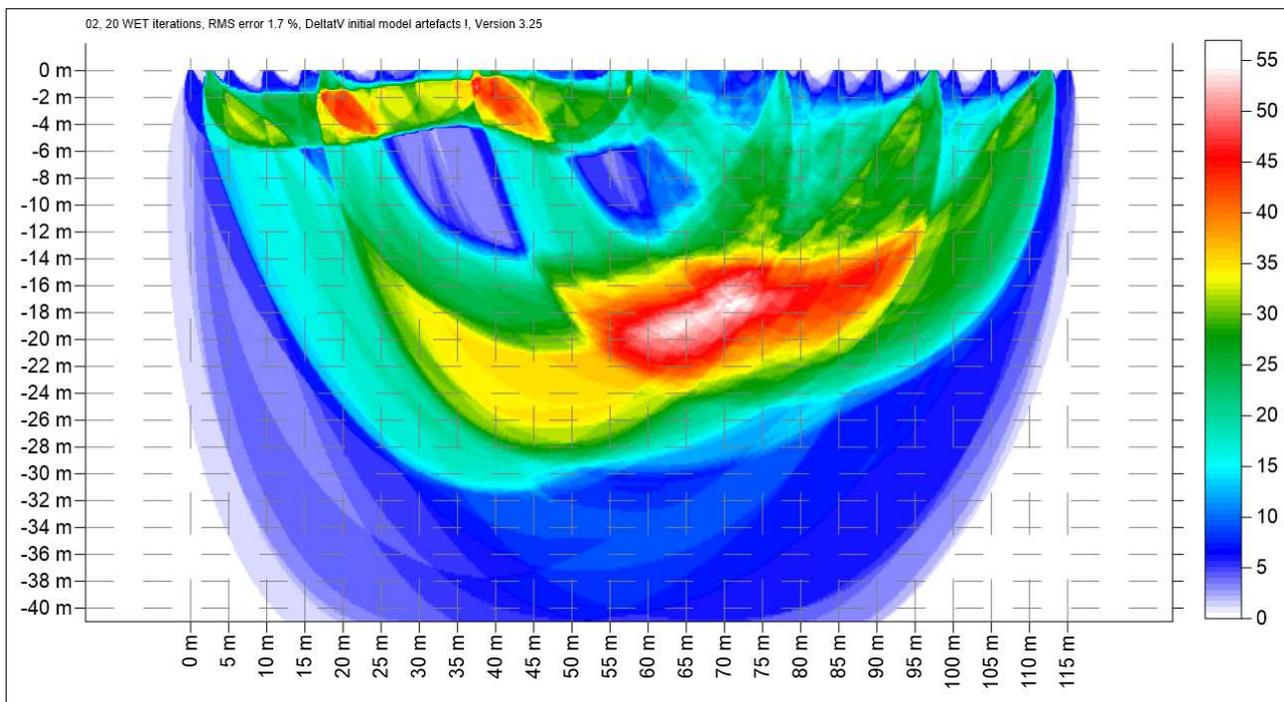


Figura 4.13 - Rappresentazione delle rifrazioni sismiche registrate

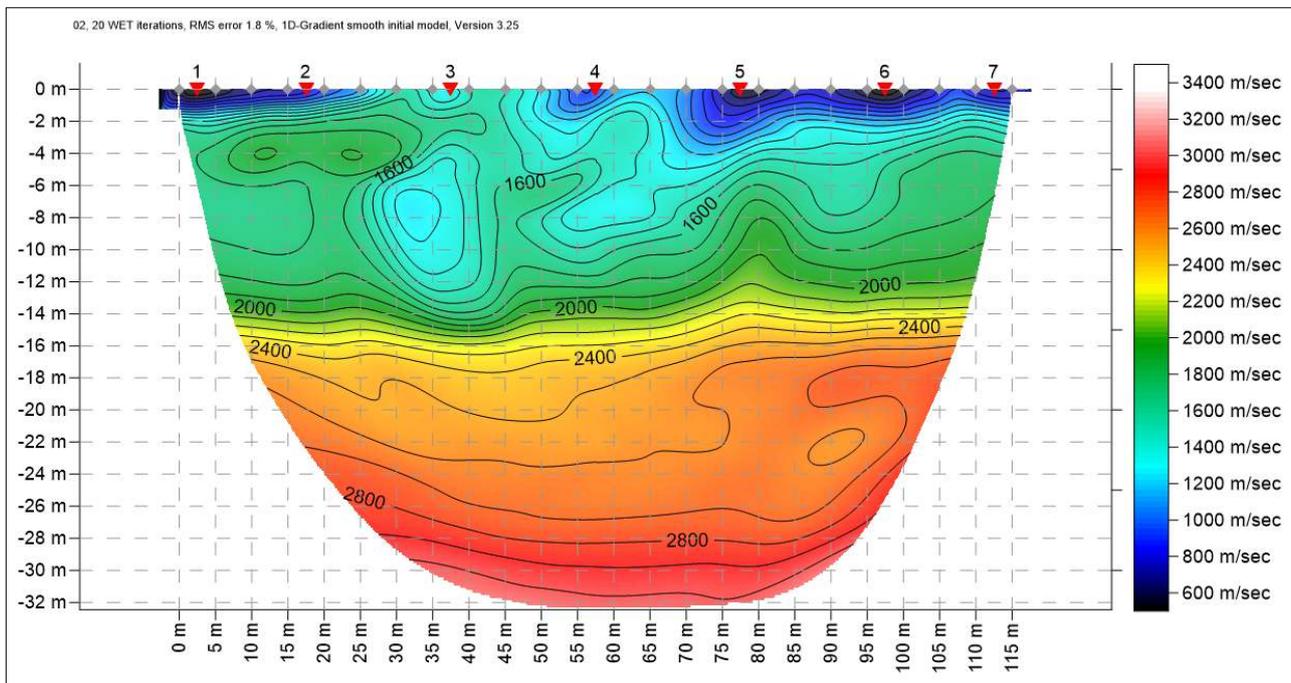


Figura 4.14 - Sezione tomografica

4.1.2 Valutazione escavabilità terreni

L'utilizzo di alcune tabelle, che correlano la velocità delle onde P e il grado di rippabilità e escavabilità delle formazioni, permettono la determinazione del grado di approfondimento per escavazione senza l'ausilio di esplosivo. Esiste, infatti, una significativa correlazione tra la velocità con cui le onde sismiche a compressione attraversano la roccia e l'efficienza di scavo delle macchine utilizzate. La velocità di queste onde sismiche è strettamente legata al grado di compattezza, di alterazione e di fratturazione dei materiali attraversati.

La prima tabella evidenzia la possibile escavabilità dei terreni con l'utilizzo di un escavatore con pala a cucchiaio, indipendentemente dalla litologia, per quei sismo-strati che hanno velocità massime di 900 m/sec. Al di sopra di questa velocità e per valori massimi di 1.400 m/sec si deve far utilizzo di martelloni pneumatici.

La seconda tabella considera la rippabilità dei terreni (associati per similarità a sabbie densissime) con una macchina operatrice D9 della Caterpillar, che risulta possibile per valori massimi di velocità dell'onda sismica longitudinale V_p pari a 2.000 m/sec, mentre si esegue con estrema difficoltà per valori compresi tra i 2.000 m/sec e i 2.500 m/sec.

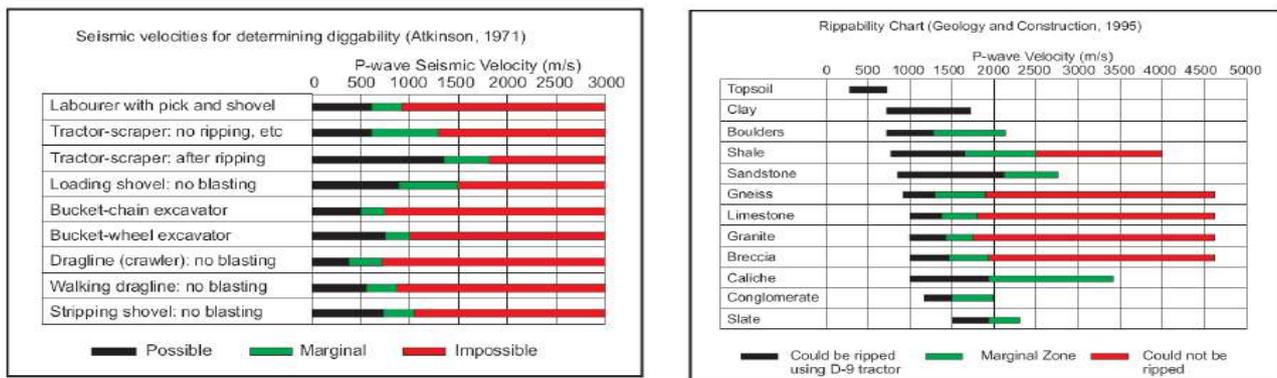


Figura 4.15 - Tabelle di escavabilità e rippabilità

La figura sotto riportata mostra un diagramma per determinare l'efficienza di scavo (volume scavato in $m^3/20 \text{ min}$) in relazione alla velocità delle onde di compressione (Shimoto et alii, 1970, da OYO Corporation 1978). La comparazione mostra che l'efficienza di scavo di una pala o del ripper diminuisce all'aumentare della velocità delle onde di compressione.

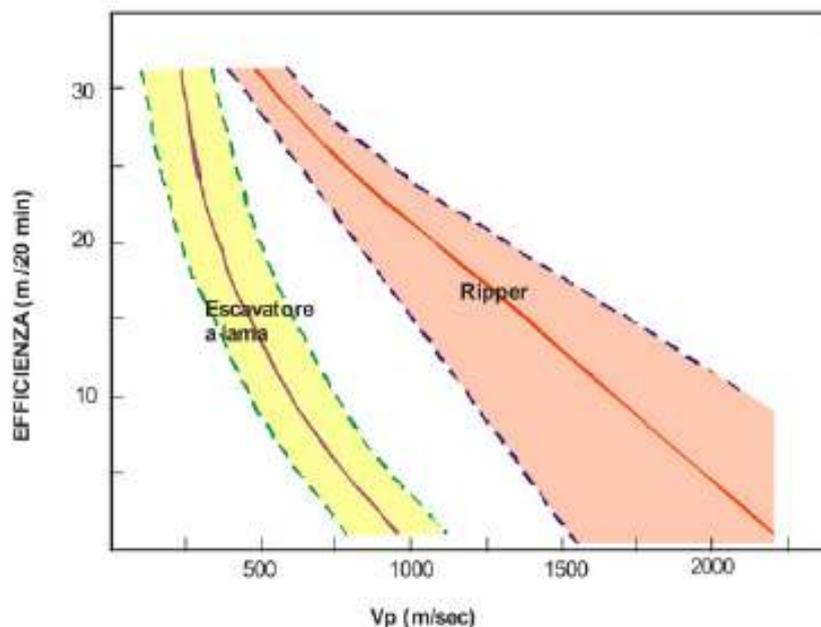


Figura 4.16 - Grafico di scavabilità e rippabilità

Altri studi più cautelativi hanno messo in relazione la velocità delle onde longitudinali nel terreno con la loro escavabilità.

<i>Velocity (m/s)</i>	<i>Rippability</i>
<i>< 1050</i>	<i>Easily Ripped</i>
<i>1050 – 1500</i>	<i>Moderately Difficult</i>
<i>1500 – 2000</i>	<i>Difficult Ripping / Light Blasting</i>
<i>> 2000</i>	<i>Blasting Required</i>

Table 1. Standard Caltrans Rippability Chart

Figura 4.17 – Escavabilità dei terreni in funzione della velocità delle onde longitudinali

I dati evidenziati dalle correlazioni sopra riportate e le velocità delle onde di compressione registrate nei profili tomografici evidenziano come i terreni siano escavabili con una buona efficienza sino alla profondità massima di 2,0 metri.

4.2 Prove MASW

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio Vs sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato. La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze; con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una determinata profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, che rappresenta la componente principale delle onde superficiali. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione ed è determinata dalle proprietà elastiche dei corpi attraversati.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (Vs), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per diversi studi geotecnici.

L'intero processo è composto da tre fasi consecutive:

- acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

Il range di frequenza utilizzato si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 60Hz, fornendo informazioni sino alla profondità massima di penetrazione, determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e la più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza solitamente con uno stendimento sismico costituito da 12/24 allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della

stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S. L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

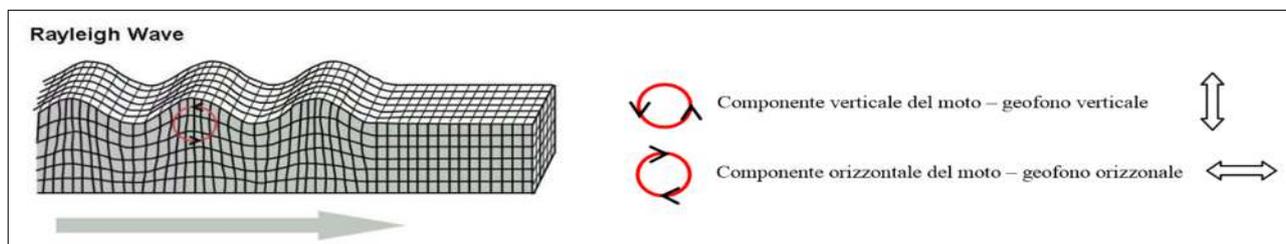


Figura 4.18 – Rappresentazione onde superficiali

4.2.1 MASW 1

L'analisi è stata eseguita con stendimento in direzione S - N adottando la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 4,5 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2,0 m per complessivi 46 m di stendimento;
- Offset di battuta: disposta a 2 e 6 metri esternamente dal geofono 1.

Tabella 4.4 – Coordinate dello stendimento MASW

STENDIMENTO MASW COORDINATE WGS		
Geofono 1	40.713918°N	8.409236°E
Geofono 24	40.714331°N	8.409252°E

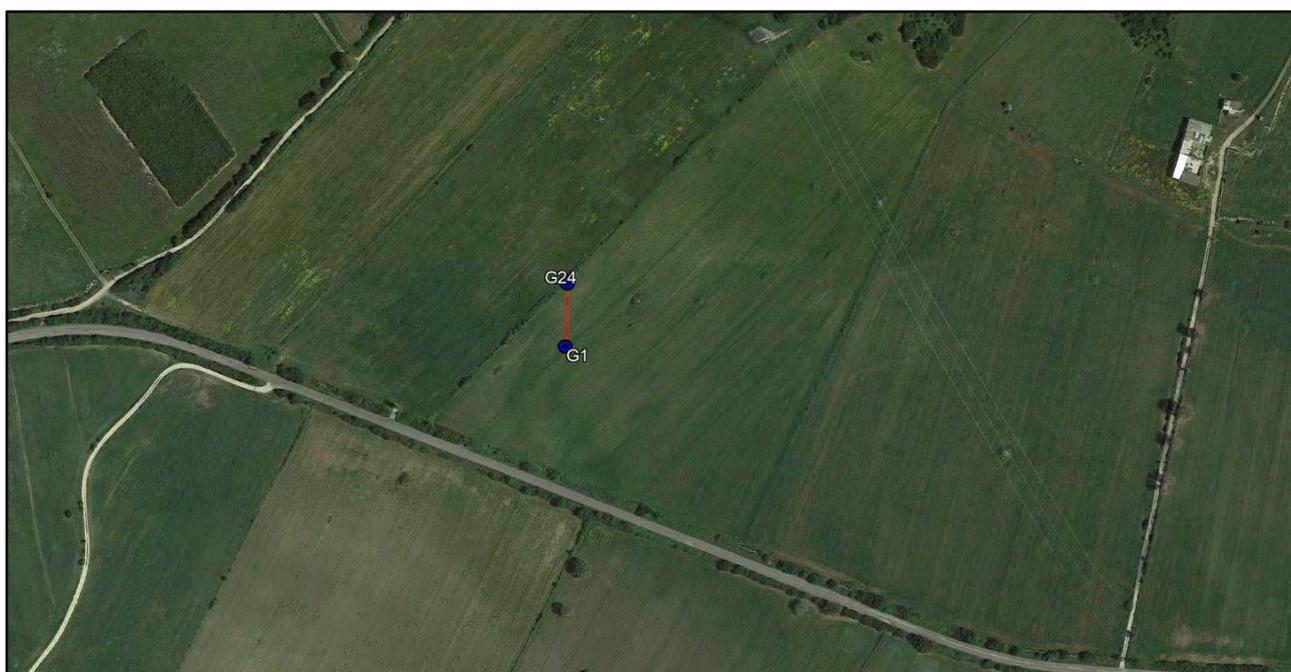


Figura 4.19 – Localizzazione MASW

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Tempo di acquisizione: 1 s;
- Frequenza di campionamento: 1000 Hz;
- Periodo di campionamento: 1.0 ms.

I dati acquisiti sono stati elaborati attraverso le seguenti fasi:

- 1) Calcolo dello spettro di velocità;
- 2) Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
- 3) Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo;
- 4) Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

L'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti è stata effettuata utilizzando un modello semplificato composto da 8 sismostrati con il raggiungimento del substrato sismico a 9,2 metri dal p.c. al di sotto dei primi 4 sismostrati.

Tabella 4.5 – Vs equivalenti dello stendimento MASW 1

Strati	Profondità (m)	Spessore strato (m)	Vs (m/sec)
A	1,7	1,7	288
B	3,8	2,1	463
C	6,3	2,5	668
D	9,2	2,9	731
E	12,5	3,3	867
F	16,2	3,7	977
G	20,4	4,2	1028
H	-	-	1018

Nel calcolo della "Velocità equivalente" V_{seq} si tiene conto di tutti gli strati rilevati al di sopra del basamento sismico con velocità minima di 800 m/sec. La V_{seq} rappresenta, dunque, la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s(strato)}}}$$

Dove:

- N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h_{(strato)}$ e dalla velocità delle onde S $V_{s(strato)}$;
- H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Il parametro V_{seq} consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018.

A	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.
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.
C	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.
D	Depositi 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.
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.

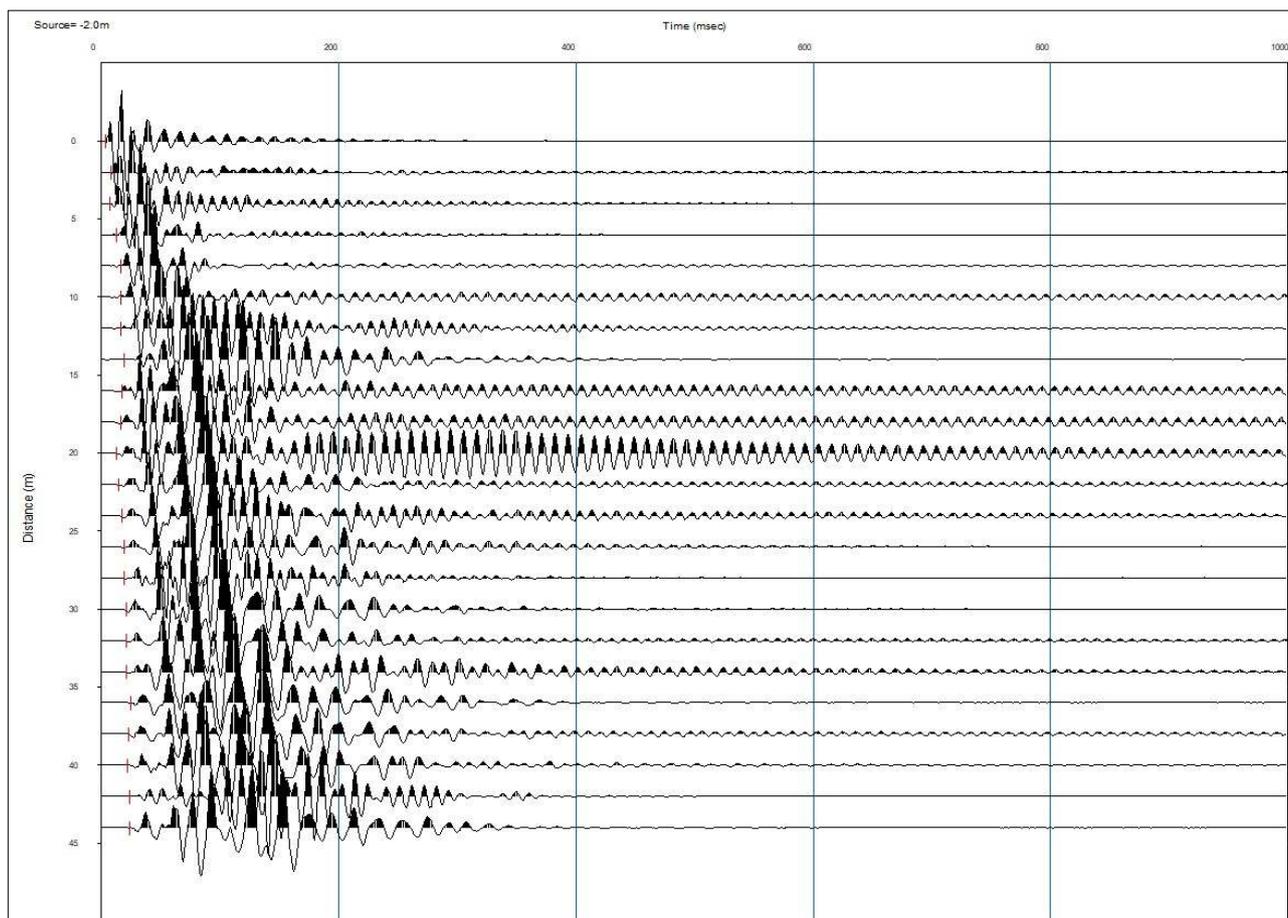


Figura 4.20 – Sismogramma in acquisizione

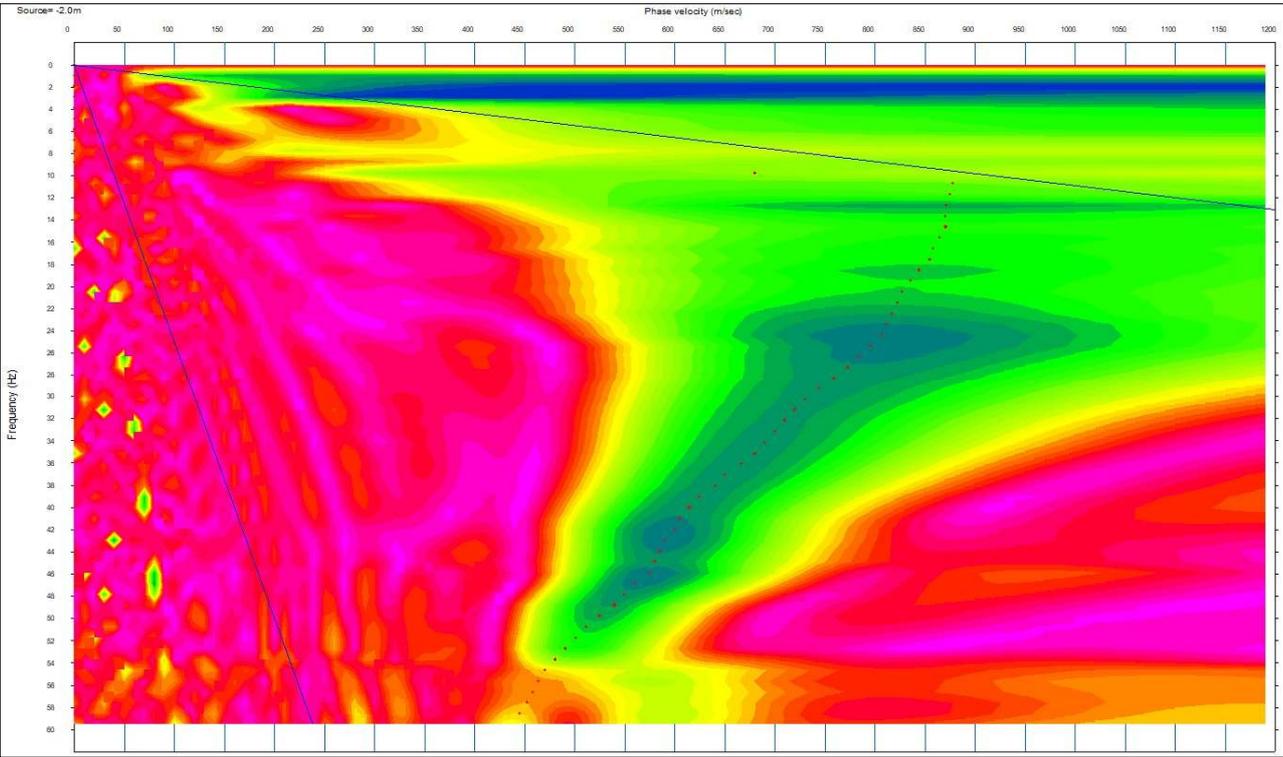


Figura 4.21 – Curva di dispersione

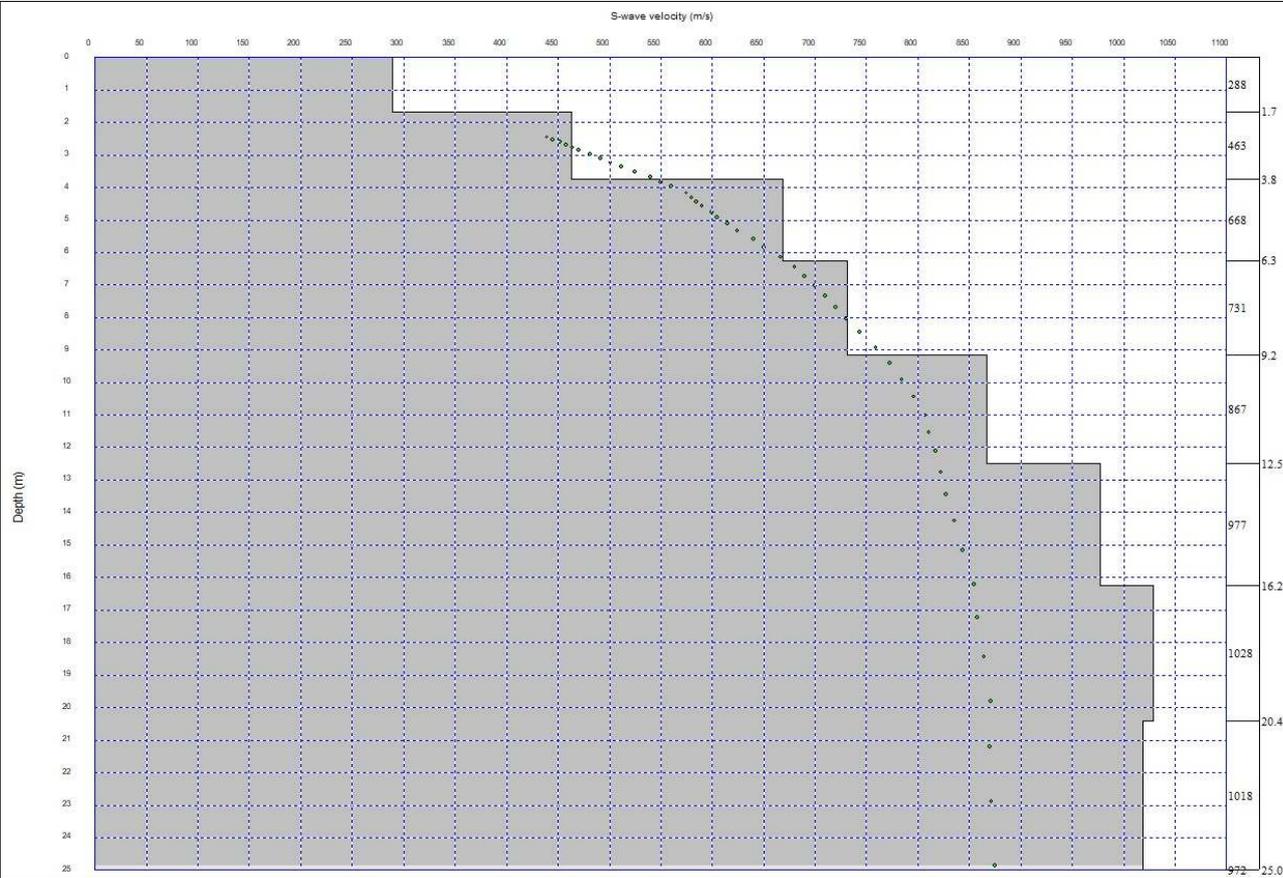


Figura 4.22 – Modello stratigrafico delle Vs

Sulla base della stratigrafia ottenuta, dal piano campagna, la Vseq (NTC 2018) risultano pari a 506,94 m/s.

Tali caratteristiche classificano il terreno di fondazione (NTC 2018) alla **categoria B**.

4.2.2 MASW 2

L'analisi è stata eseguita con direzione S - N adottando la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 4,5 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2,0 m per complessivi 46 m di stendimento;
- Offset di battuta: disposta a 2 e 6 metri esternamente dal geofono 1.

Tabella 4.6 – Coordinate dello stendimento MASW

STENDIMENTO MASW COORDINATE WGS		
Geofono 1	40.715095°N	8.410543°E
Geofono 24	40.715537°N	8.410497°E

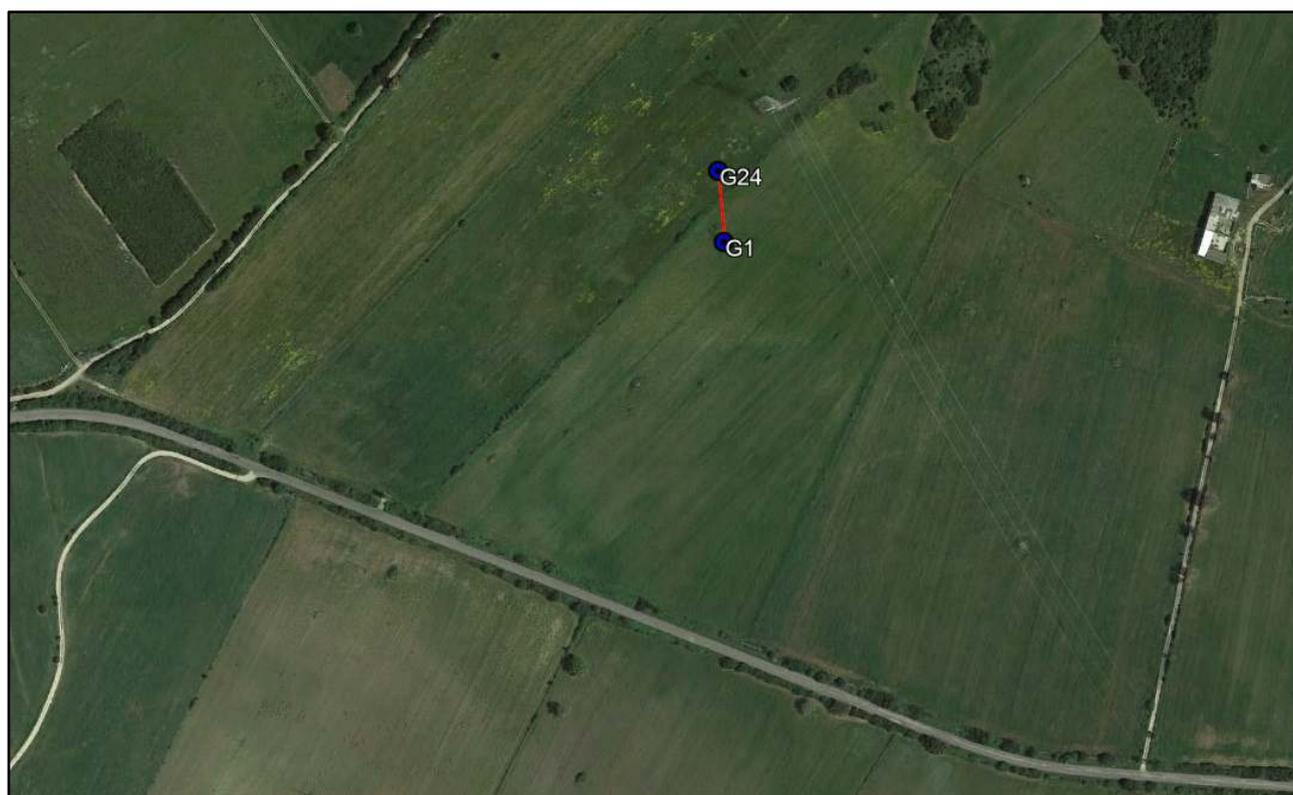


Figura 4.23 – Localizzazione MASW

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Tempo di acquisizione: 1 s;
- Frequenza di campionamento: 1000 Hz;

- Periodo di campionamento: 1.0 ms.

I dati acquisiti sono stati elaborati attraverso le seguenti fasi:

- 1) Calcolo dello spettro di velocità;
- 2) Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
- 3) Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo;
- 4) Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

L'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti è stata effettuata utilizzando un modello semplificato composto da 9 sismostrati senza il raggiungimento del substrato sismico entro i 30 metri dal p.c.

Tabella 4.7 – Vs equivalenti dello stendimento MASW 1

Strati	Profondità (m)	Spessore strato (m)	Vs (m/sec)
A	1,7	1,7	218
B	3,8	2,1	222
C	6,3	2,5	362
D	9,2	2,9	412
E	12,5	3,3	437
F	16,2	3,7	431
G	20,4	4,2	473
H	25	4,6	515
I	-	5,0	723

Nel calcolo della "Velocità equivalente" V_{seq} si tiene conto di tutti gli strati rilevati al di sopra del basamento sismico con velocità minima di 800 m/sec. La V_{seq} rappresenta, dunque, la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s(strato)}}}$$

Dove:

- N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h_{(strato)}$ e dalla velocità delle onde S $V_{s(strato)}$;
- H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Il parametro V_{seq} consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018.

Se si raggiungono spessori superiori ai trenta metri per normativa le V_{seq} corrispondono alle Vs30.

A	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.
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.
C	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.
D	Depositi 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.
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.

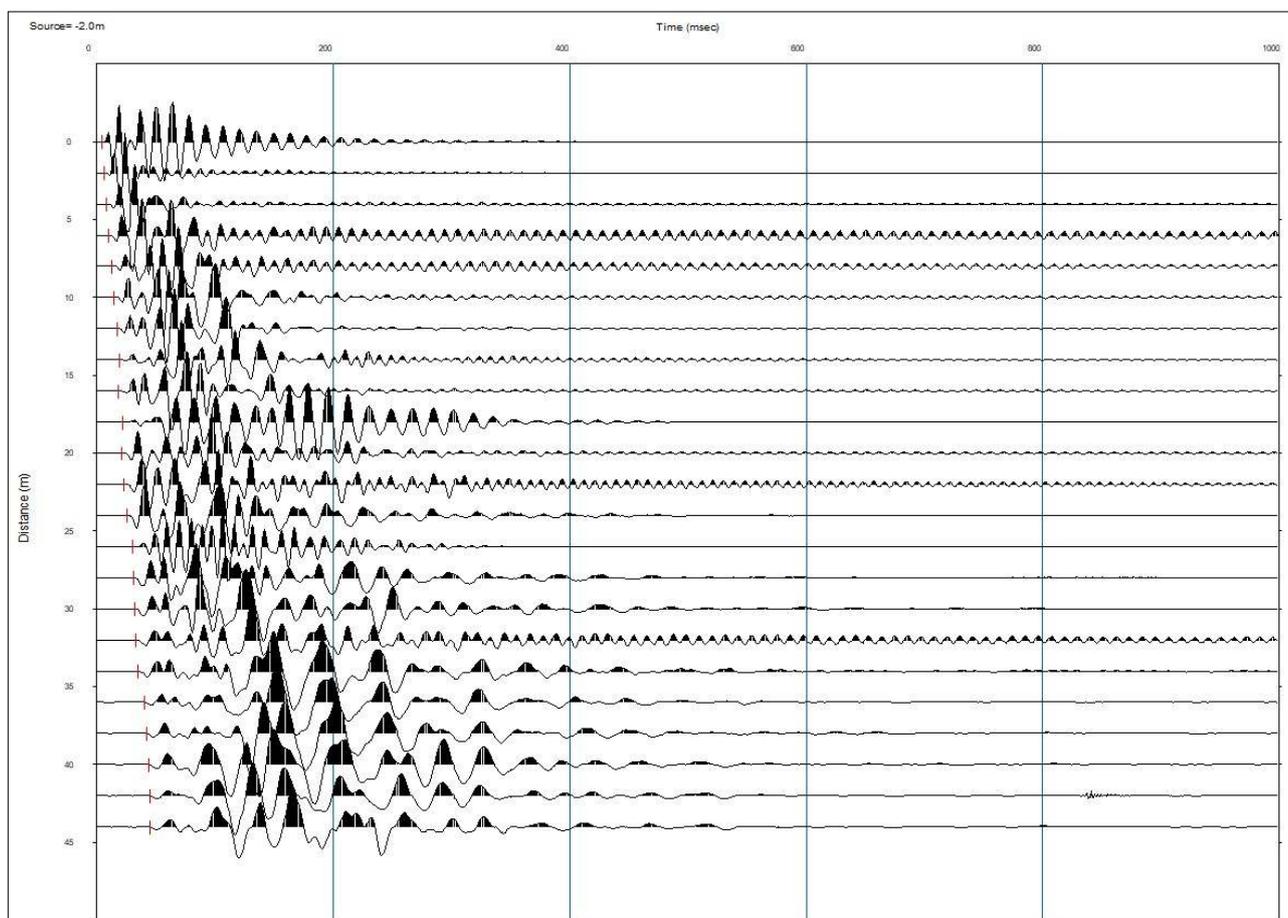


Figura 4.24 – Sismogramma in acquisizione

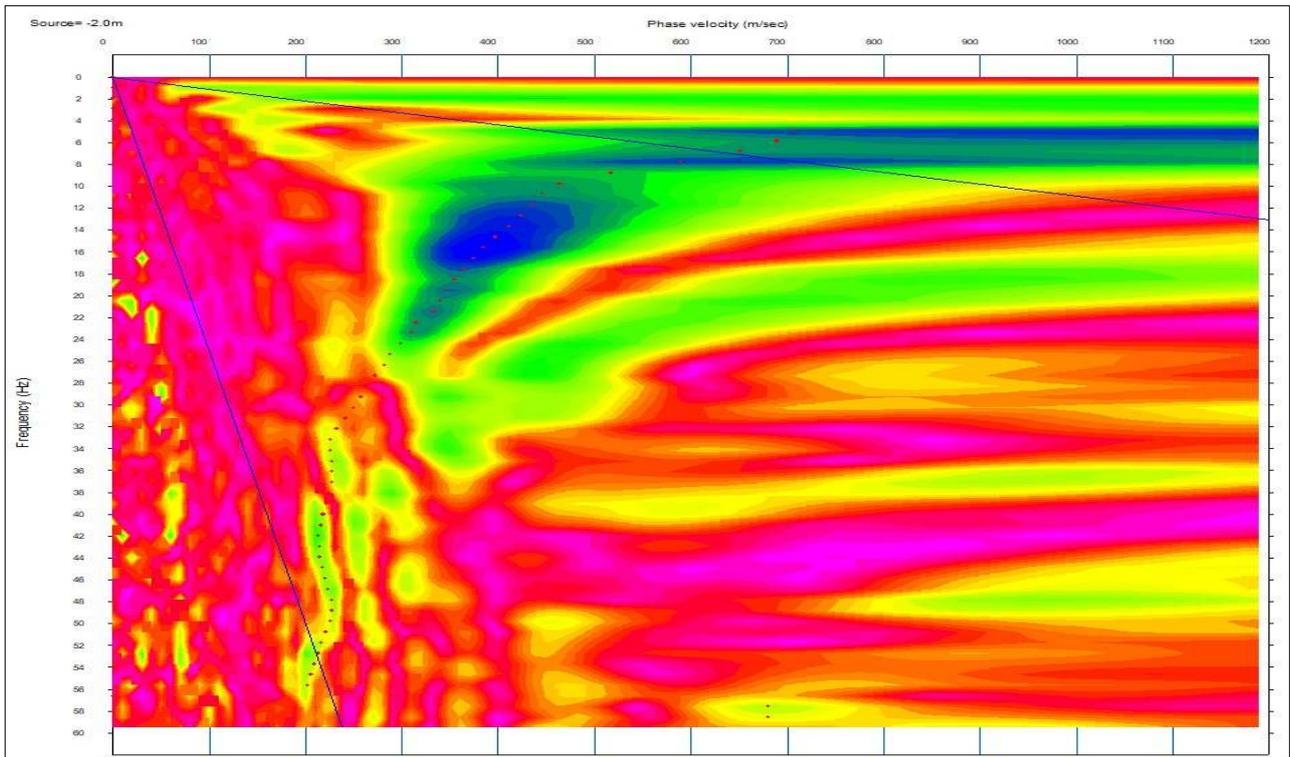


Figura 4.25 – Curva di dispersione

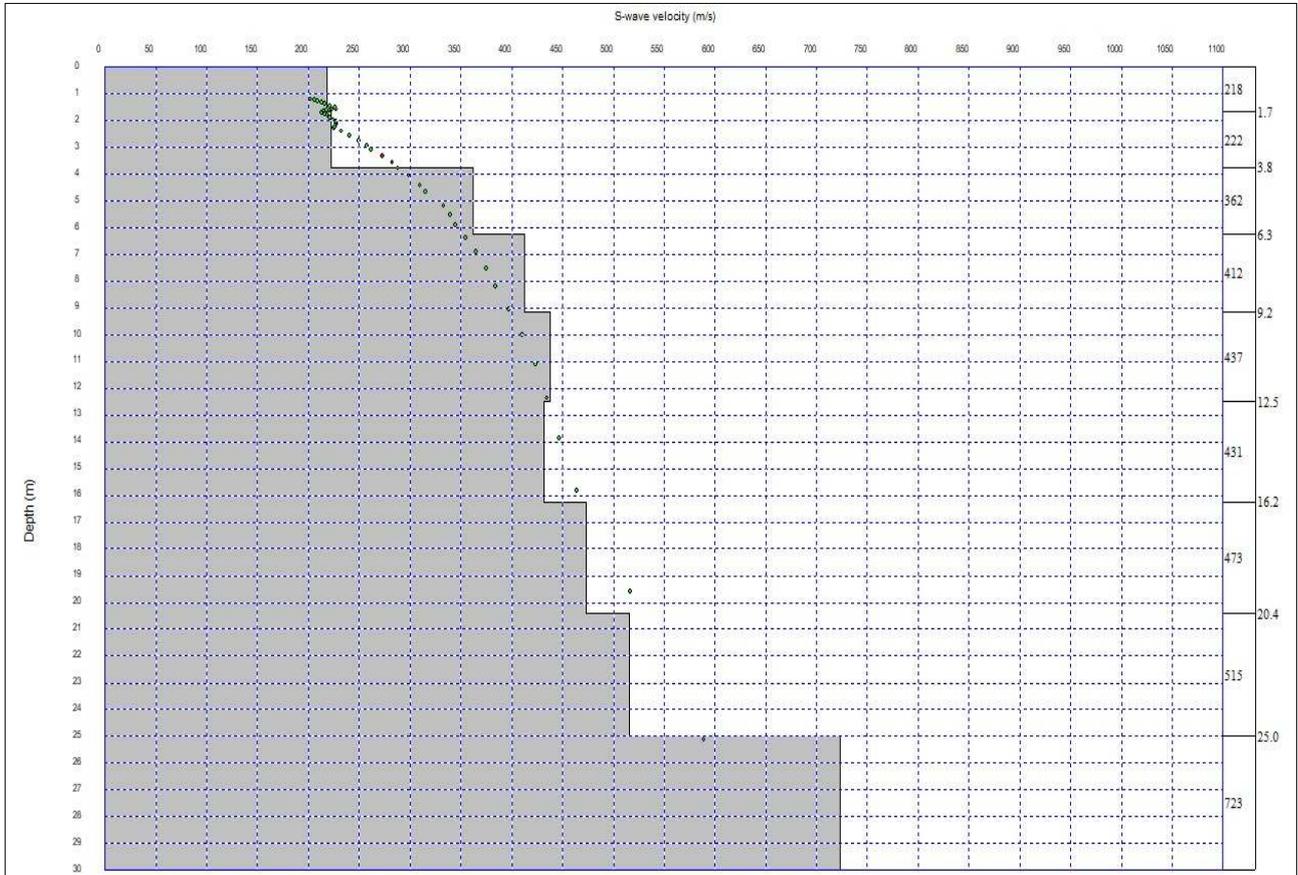


Figura 4.26 – Modello stratigrafico delle Vs

Sulla base della stratigrafia ottenuta, dal piano campagna, la V_{seq} (NTC 2018) risultano pari a 416,29 m/s.

Tali caratteristiche classificano il terreno di fondazione (NTC 2018) alla **categoria B**.

5 Correlazioni stratigrafiche

Le indagini eseguite sul contesto geologico della Nurra nel Sassarese caratterizzato da formazioni sedimentarie carbonatiche, evidenziano una condizione geologica stratificata con formazioni a caratteristiche elastiche crescenti con l'aumentare della profondità. Il modello dedotto da indagini indirette deve essere contestualizzato e confermato con rilievi ed indagini dirette.

Si evidenzia in linea di massima la presenza di quattro sismostrati e in particolare:

- un sismostrato che si sviluppa nel settore superficiale dello stendimento per spessori massimi di 1,8 metri e con velocità inferiori ai 600 m/sec, associabile a materiale colluviale addensato;
- un sismostrato con velocità delle onde P comprese tra 600 m/sec e 1400 m/sec a cui si possono associare formazioni calcarenitiche;
- un sismostrato con velocità delle onde P comprese tra 1400 m/sec e 2200 m/sec a cui si possono associare le formazioni calcaree e calcarenitiche compatte;
- l'ultimo sismostrato al di sotto dei 14 metri con velocità delle onde P superiori ai 2200 m/sec associabile a formazioni calcaree e calcaree dolomitiche compatte.

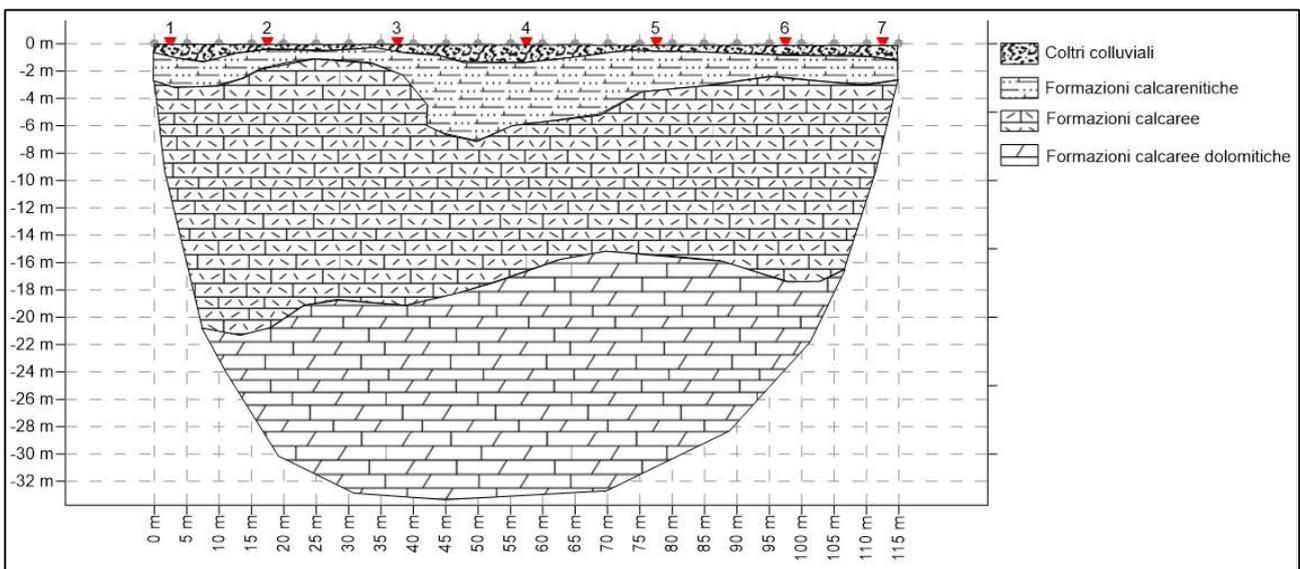


Figura 5.1 – Modello stratigrafico su interpretazione della tomografia sismica

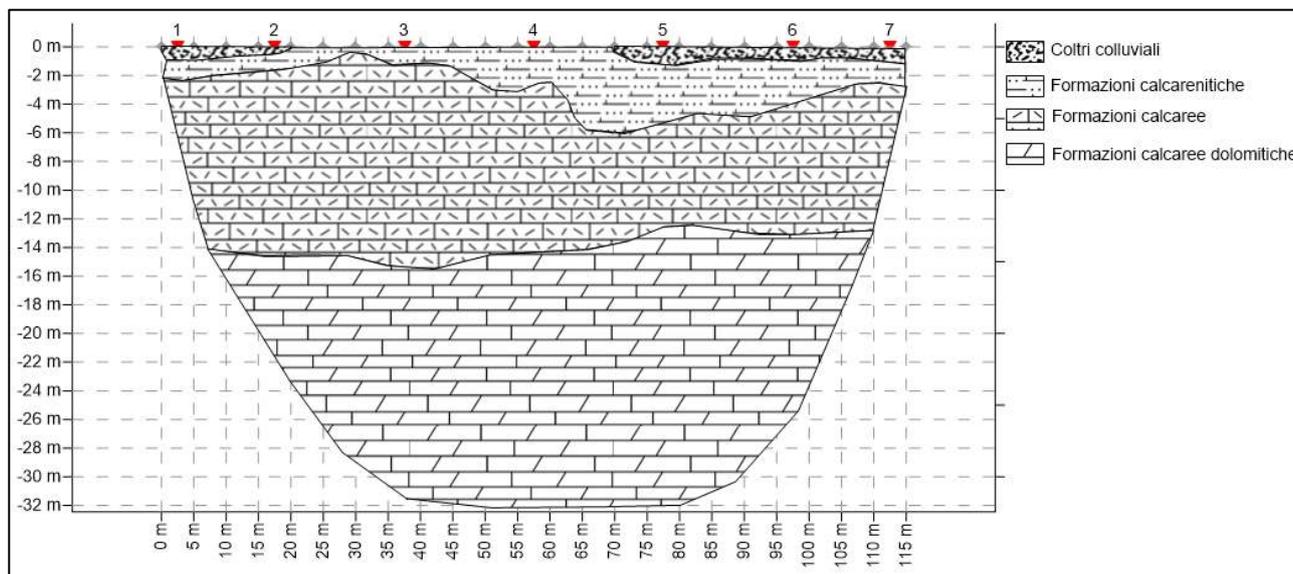


Figura 5.2 – Modello stratigrafico su interpretazione della tomografia sismica 2

Questo schema stratigrafico risulta pienamente concordante con i risultati ottenuti dalle MASW.

5.1 Classificazione del sottosuolo (D.M. 17.01.2018)

5.1.1 Stendimento MASW 1

Località	Sassari – Loc. Saccheddu
Nome Prova	MASW1
Metodo indagine	MASW/ZF forza verticale
Strumentazione	Sismografo DAQLink III (Seismic Source USA), 24 canali, 24 bits
Geometria stendimento	24 geofoni interasse 2,0 m - sorgente esterna a 2,0 m da G1

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, V_{Seq} (in m/s), definita dall'espressione:

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

Sulla base del valore calcolato di V_s vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine 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.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine 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.
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.

I dati evidenziano che il tratto in progetto risulta rispondere alle caratteristiche di suolo di tipo B con V_{Seq} pari a 506,94 m/s.

5.1.2 Stendimento MASW 2

Località	Sassari – Loc. Saccheddu
Nome Prova	MASW2
Metodo indagine	MASW/ZF forza verticale
Strumentazione	Sismografo DAQLink III (Seismic Source USA), 24 canali, 24 bits
Geometria stendimento	24 geofoni interasse 2,0 m - sorgente esterna a 2,0 m da G1

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, V_{Seq} (in m/s), definita dall'espressione:

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

Sulla base del valore calcolato di V_s vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine 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.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine 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.
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.

I dati evidenziano che il tratto in progetto risulta rispondere alle caratteristiche di suolo di tipo B con VSeq pari a 416,29 m/s.

6 Modellazione sismica

6.1 La sismicità in sardegna

Attualmente la sismicità di una certa porzione di territorio italiano viene definita sulla base di determinati coefficienti organizzati e definiti sulla base della distribuzione geografica dei terremoti, frequenza, intensità, energia, natura, e la loro correlazione con gli elementi geologici. L'acquisizione e l'elaborazione di tutti questi fattori rimane assai difficile e complessa, quindi l'elemento principale su cui ci si basa per definire la sismicità di un territorio è l'attitudine di una regione ad essere soggetta ai terremoti in relazione agli effetti prodotti dalle scosse.

Una ricostruzione su base storica della sismicità di una regione come la Sardegna presenta dei limiti tangibili, dove gli eventi tettonici si sono susseguiti su scale di tempo sicuramente molto più dilatate rispetto ad altre zone d'Italia.

La scarsità di fonti documentarie, legate essenzialmente all'uso della scrittura non testimoniata dai popoli nuragici, ha pertanto non lasciato traccia di eventuali eventi anche disastrosi. La sismologia storica in Sardegna si scontra quindi con difficoltà notevoli. La cartografia prodotta dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT), uno dei Gruppi Nazionali di ricerca scientifica di cui si avvale il Servizio Nazionale della Protezione Civile, in una carta prodotta nel 1996, sulla base degli eventi, sismici descritti nei cataloghi nazionali, indica parte della Sardegna settentrionale come soggetta a scosse del V grado M.C.S. con tempi di ritorno $T=475$ anni.

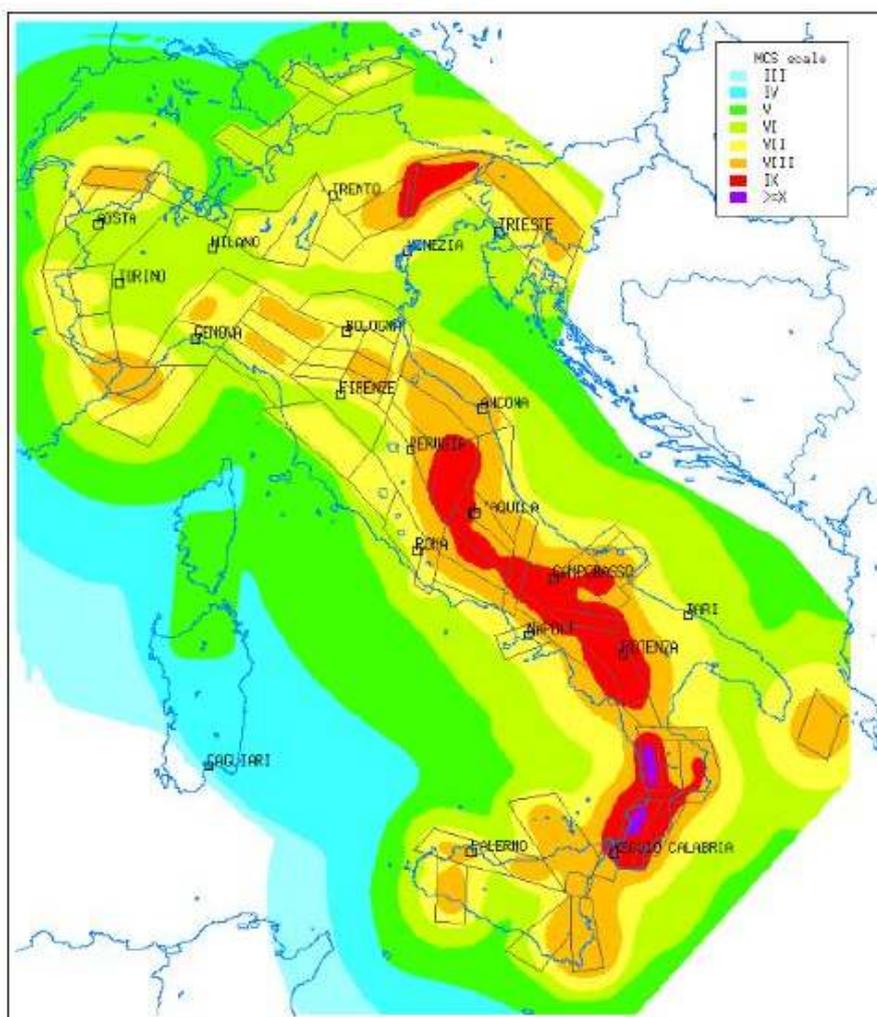


Figura 6.1 - Carta della macrosismicità in Italia (GNDT, 1996)

Anche la carta della “Massima intensità macrosismica risentita in Italia” del 1995 viene indicata parte della Gallura settentrionale come soggetta ad eventi sismici passati del VI grado M.C.S.

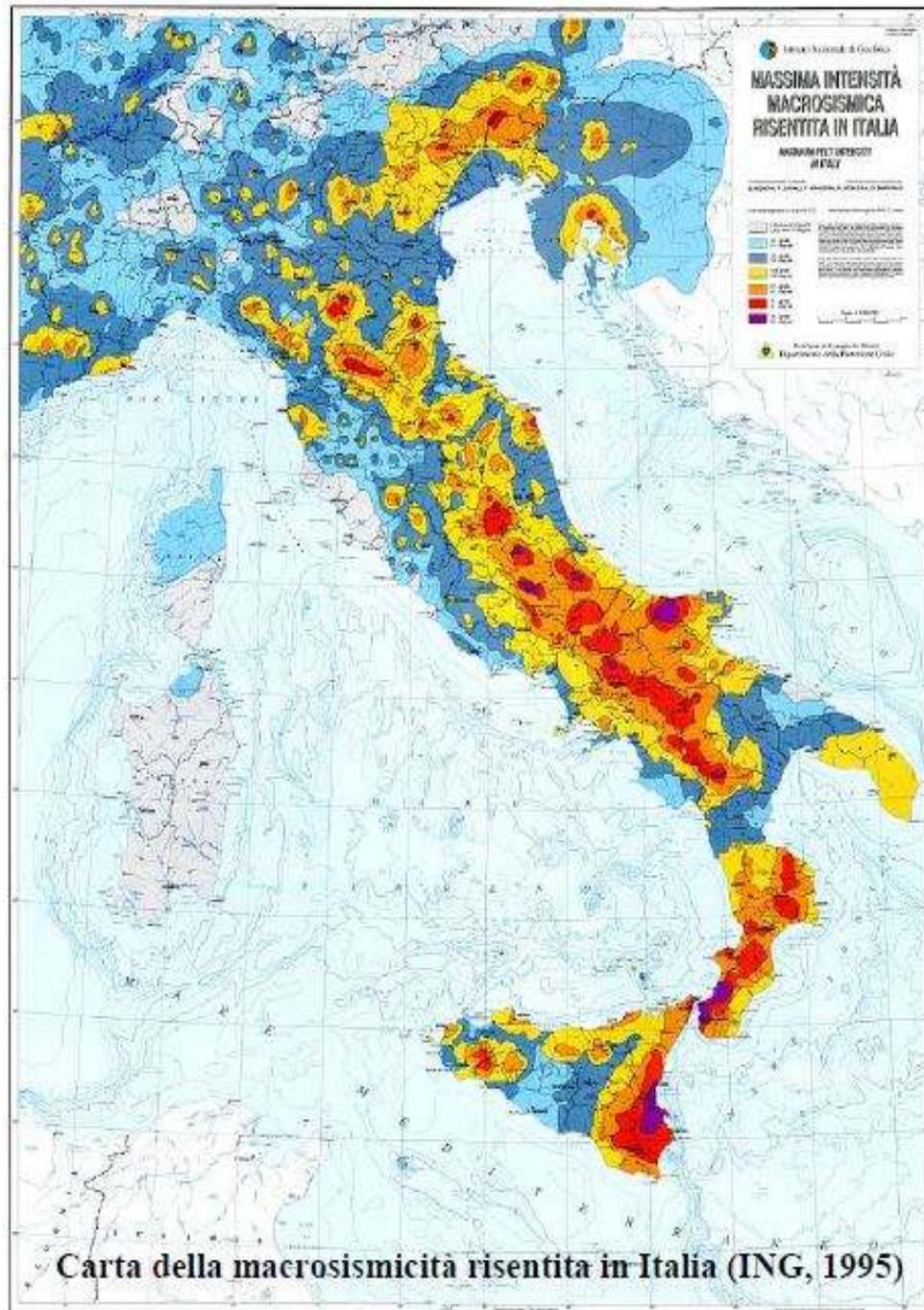


Figura 6.2 - Carta della macrosismicità in Italia (INGV,, 1995)

Gli studi basati sulla sismicità storica della Sardegna, per quanto parziali e incompleti, individuano quantomeno nell'Isola settori soggetti a possibili eventi tellurici di una certa consistenza, ma in tempi più recenti sia con l'emanazione dell'O.P.C.M. 3274, e ora con il D.M. 14 gennaio 2008 la Sardegna viene nella sua totalità classificata in zona 4, pur non essendo stato effettuato uno studio specifico sul picco di accelerazione PGA atteso. Nella figura seguente si riportano gli epicentri degli eventi sismici registrati dagli anni 70 ad oggi entro un raggio di 300 km dal centro Sardegna.

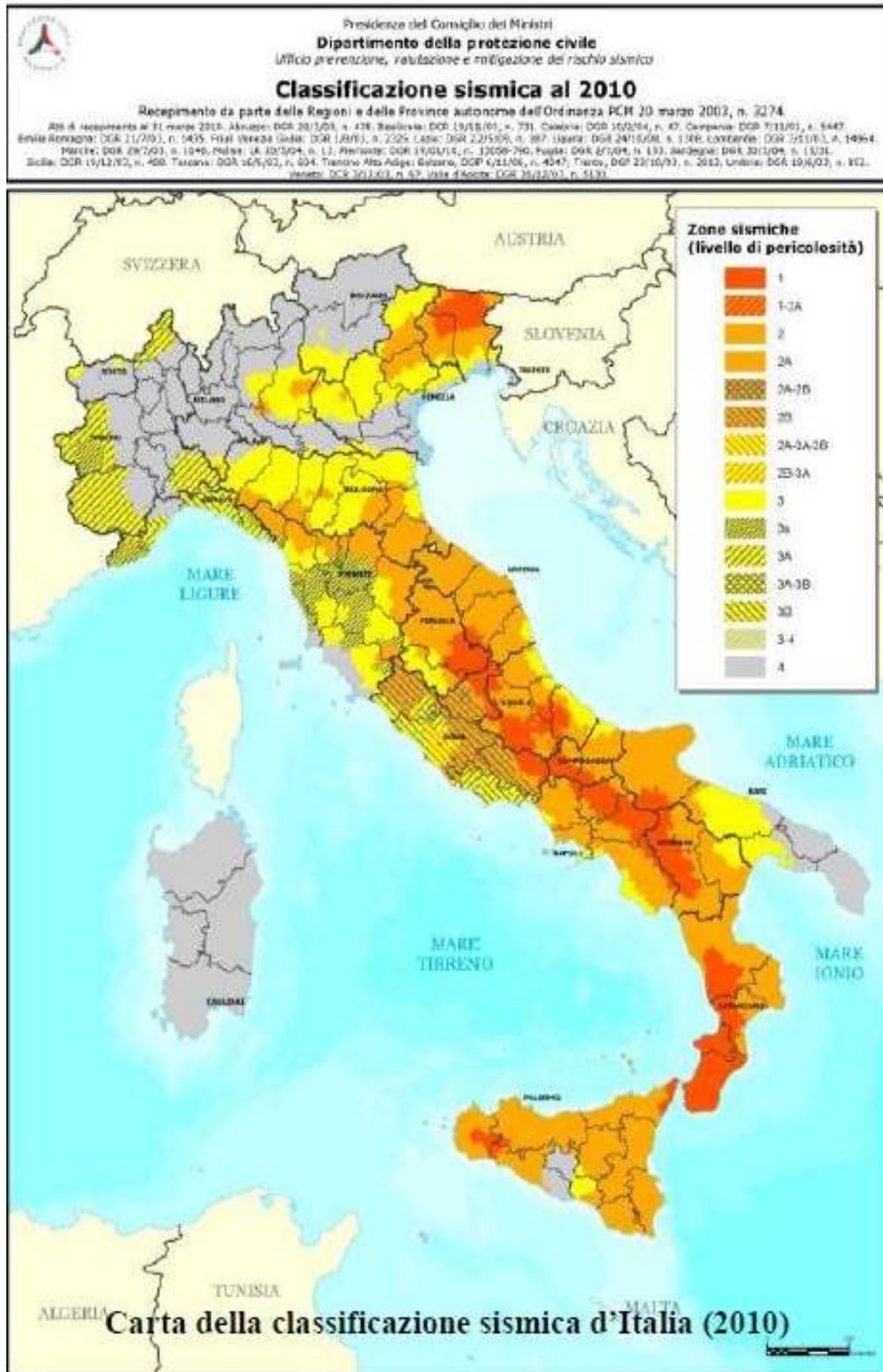


Figura 6.3 - Carta della classificazione sismica in Italia (2010)

Di seguito si riportano gli eventi documentati dal 1970 ad oggi.

1977 – il 18 settembre del 1977, alle 11.45 viene percepita una scossa di terremoto classificata del 7° grado della scala Mercalli nella Sardegna meridionale, in particolare a Cagliari, ma la scossa viene ben percepita anche ad Oristano. Le cronache riferiscono che la scossa crea panico tra la popolazione, molte persone si riversano nelle strade e cinque malati di cuore finiscono all'ospedale per crisi cardiaca, i centralini dei vigili del fuoco e delle forze dell'ordine vengono intasati. L'epicentro viene individuato al largo dell'Isola di Sant'Antioco ed è legato all'attività di un vulcano sottomarino che si trova a 3000 metri di profondità, battezzato con il nome "Quirino".

2000 – il 26 Aprile 2000 alle 15.30 vengono percepite delle scosse sismiche nella Sardegna nord occidentale. Si tratta di due scosse in mare aperto con epicentro al largo di Posada, 20 miglia a est, di magnitudo 4.0 e 4.5.

2004 – tra il 12 e il 18 dicembre 2004, una sequenza sismica di moderata energia (con massima magnitudo pari a 4.5) ha interessato un'area posta al largo della costa nord-orientale sarda, di fronte ai comuni di Siniscola, San Teodoro e Olbia.

2006 – il 23 marzo 2006 alle 23,45 una scossa di terremoto è stata registrata a Cagliari e nei centri sud-occidentali dell'Isola, avvertita nella notte a Cagliari e nei centri limitrofi. La Rete Sismica Nazionale, INGV, ha registrato un sisma di magnitudo 3,4 sulla scala Richter. L'epicentro è stato localizzato al largo di Capo Spartivento. I comuni interessati sono stati Pula, Villa San Pietro, Domus de Maria, Sarroch, Teulada, Capoterra, Santadi, Sant'Anna Arresi, Piscinas, Nuxis, Cagliari, Masainas, Villaperuccio, Giba, Elmas, Quartu S.Elena, Quartucciu, Selargius, Narcao, Assemini.

2009 – il 5 febbraio 2009 è stata avvertita una scossa sismica dalla popolazione sulla costa nord occidentale della Sardegna. L'epicentro è stato localizzato nel Mar Tirreno centrale, circa a 50 km ad Ovest rispetto al comune di Olbia. Dalle verifiche effettuate dalla Sala Situazione Italia del Dipartimento della Protezione Civile non risultano danni a persone o cose. Secondo i rilievi l'evento sismico è stato registrato alle ore 16.02, con una magnitudo di 4.3 e si colloca ad una profondità di circa 30 km.

2010 – il 10 novembre 2010 è stata avvertita una scossa di terremoto di magnitudo 4.1 nelle città di Sassari e Porto Torres intorno alle 19. L'epicentro è stato localizzato a circa 200 chilometri dalla costa, fra Porto Torres e la Francia occidentale. La scossa è stata segnalata dal "Bureau central sismologique francais" ma non dall'Istituto nazionale di geofisica, essendo avvenuta in acque territoriali francesi. Secondo l'istituto il sisma si è verificato alle 19.23 al largo in mare a sud est di Tolone. L'onda sismica ha poi raggiunto anche la costa nord della Sardegna, facendosi sentire in particolare a Sassari e Porto Torres dove, a parte l'allarme della popolazione, non ha avuto nessuna ripercussione su persone o cose.

2011 - alle 19,21 del 7 luglio del 2011, a 100 chilometri a ovest di Ajaccio si era verificato un terremoto di magnitudo 5,3 che è stato avvertito anche nella Sardegna settentrionale. Non sono stati segnalati problemi alle persone o alle cose.

2012 – Un terremoto di magnitudo 4,6 è stato registrato alle ore 04,37 italiane del 4 marzo 2012, in mare, al largo della costa occidentale della Corsica a 88 chilometri al largo di Ajaccio. Il terremoto è stato rilevato a una profondità di due chilometri ed è stato avvertito distintamente anche in Sardegna. Le verifiche effettuate dalla sala situazione Italia del Dipartimento della Protezione civile hanno confermato che non ci sono stati danni. La scossa è stata avvertita anche in Corsica e a Marsiglia e nel sud della Francia.

6.2 Caratterizzazione sismogenetica

La caratterizzazione sismogenetica dell'area in studio è stata elaborata considerando la recente Zonazione Sismogenetica, denominata ZS9, prodotta dall'INGV (Meletti C. e Valensise G., 2004). Questa zonazione è considerata, nella recente letteratura scientifica, il lavoro più completo e aggiornato a livello nazionale. Dall'analisi dei risultati riportati nella ZS9 si può evidenziare che la regione interessata dai tracciati in progetto non è caratterizzata da nessuna area sorgente di particolare rilievo.



Figura 6.4 - Zonazione Sismogenetica, denominata ZS9, prodotta dall'INGV

6.3 Modellazione sismica del sito

A seguito della pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale n° 42 del 20.2.2018 del D.M. 17 gennaio 2018 recante “*Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*” (NTC – 2018), che ha sostituito il D.M. 14 gennaio 2008 (NTC – 2008), si progetta solamente con il metodo degli stati limite (§ 2.6 NTC – 2018). Il ricorso alla modellazione sismica, intesa come Risposta Sismica Locale (RSL), è quindi sempre prevista ed inderogabile (ad eccezione delle sole opere di tipo 1 – costruzioni temporanee e provvisorie o in fase di costruzione quando il progetto preveda che tale condizione permanga per meno di 2 anni – per cui le verifiche sismiche si possono omettere).

Nella RSL (§ 3.2.2. NTC – 2018), per quanto riguarda l’approccio semplificato, la classificazione del sottosuolo si effettua contestualmente in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della “generica” velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (m/s) (in luogo della “precedente” $V_{S,30}$), definita dall’espressione:

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

dove H è ora la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s; per depositi, tuttavia, con profondità H del substrato superiore a 30 m, la $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$ ottenuto ponendo H=30 m nell’espressione generale.

6.3.1 Pericolosità sismica di base

La “pericolosità sismica di base” costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche da applicare alle costruzioni e alle strutture connesse con il funzionamento di opere.

Le *azioni sismiche di progetto* in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche *morfologiche* e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale (RSL).

La pericolosità sismica è definita in termini di:

- **ag** accelerazione orizzontale massima attesa al bedrock con superficie topografica orizzontale (espressa in g/10);
- **Fo** valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- **Tc*** periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (espresso in s).

Da un punto di vista normativo, pertanto, la pericolosità sismica di un sito dipende dalla posizione dell’opera rispetto ai nodi del reticolo di riferimento. Allo stato attuale infatti, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita su un reticolo di riferimento e per diversi intervalli di riferimento (periodo di ritorno). Il reticolo di riferimento delle NTC 2018, suddivide l’intero territorio italiano in maglie elementari di circa 10 Km per 10 Km, per un totale di 10751 nodi, definiti in termini di coordinate geografiche. Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (Tr) considerati dalla pericolosità sismica, sono forniti i tre parametri ag , F_0 e Tc per la definizione dell’azione sismica di progetto ricavati riferendosi ai valori corrispondenti al 50-esimo percentile.

Le accelerazioni orizzontali massime attese al bedrock (ag) non sono più valutate genericamente sulla base dell’appartenenza del comune in cui realizzare l’opera ad una zona sismica, ma sono calcolate in funzione dell’effettiva posizione geografica del sito ove sarà realizzata l’opera. Per un qualunque punto del territorio, non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse per la definizione dell’azione sismica di progetto (ag , F_0 , Tc^*) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Le NTC 2018 definiscono l’azione sismica considerando un periodo di ritorno (Tr) che è funzione della probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (PVr) nel periodo di riferimento dell’opera (Vr). La probabilità che, in un fissato lasso di tempo (“periodo di riferimento” VR espresso in anni), in un determinato sito si verifichi un evento sismico

di entità almeno pari ad un valore prefissato, è denominata “Probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento” PVR .

Il periodo di riferimento dell’opera (Vr) si ottiene dal prodotto tra la Vita Nominale (Vn), intesa come il numero di anni nel quale l’opera è utilizzata allo scopo a cui è stata destinata, e il Coefficiente d’uso (Cu), funzione della Classe d’uso della costruzione.

- Vita Nominale (VN) di 100 anni;
- Classe d’uso IV, Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità; corrispondente ad un Coefficiente d’uso (Cu) pari a 2,0;

da cui si ottiene un periodo di riferimento per l’opera Vr pari a 200 anni.

Le probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (Pvr) nel periodo di riferimento dell’opera (Vr) sono funzione dell’importanza dell’opera e dello stato limite considerato.

Data l’importanza dell’opera ed in accordo al paragrafo 7.1 delle NTC 2018, sono stati considerati due stati limite.

Tabella 6.1 - Probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale al bedrock in funzione dello stato limite considerato (Tabella 3.2.1 delle NTC 2018). In rosso sono evidenziati gli stati limite considerati.

Stati Limite	P _{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V _R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Da tali assunzioni sono stati calcolati i valori dei periodi di ritorno (Tr) per i due stati limite considerati mediante la formula:

$$T_r = \frac{|V_r|}{\ln(1 - P_{V_r})}$$

da cui si ottengono i seguenti periodi di ritorno (TR):

- TR pari a 201 anni, per lo Stato Limite di Danno (**SLD**);
- TR pari a 1898 anni, per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (**SLV**).

Calcolati i periodi di ritorno per i due stati limite sono stati definiti, in accordo alle NTC 2018, i valori di accelerazione orizzontale massima (ag) attesi al bedrock con superficie topografica orizzontale validi per il territorio interessato dal progetto.

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento:	81	%
Tr:	120	[anni]
ag:	0,033	g
Fo:	2,756	
Tc*:	0,310	[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	201	[anni]
ag:	0,039	g
Fo:	2,820	
Tc*:	0,322	[s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	1898	[anni]
ag:	0,070	g
Fo:	3,058	
Tc*:	0,393	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	2475	[anni]
ag:	0,075	g
Fo:	3,090	
Tc*:	0,401	[s]

Quindi i valori di accelerazione orizzontale massima attesi al bedrock (Ag) con superficie topografica orizzontale definiti per l'analisi dell'azione sismica nell'area in progetto risulta essere quelli indicati nella tabella successiva.

Tabella 6.2 – Valori di accelerazione orizzontale massima, attesi al bedrock

STATO LIMITE	Ag (g)
SLD (Tr 201 anni)	0,039
SLV (Tr 1898 anni)	0,070

6.3.2 Risposta sismica locale

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale (RSL) si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. *In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs.* I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità Vs per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo*, di cui al § 6.2.2.

Le norme di riferimento (NTC 2018) definiscono la risposta sismica locale (S) di un sito attraverso la stima di due parametri:

- Categoria di Sottosuolo;
- Condizione Topografica.

6.3.2.1 *Categorie di suolo di fondazione*

Il sottosuolo nelle NTC 2018 è suddiviso in cinque classi di riferimento, in funzione della natura e di specifici parametri di comportamento meccanico dei terreni. I diversi tipi di sottosuolo inducono modifiche sul segnale sismico con variazioni dell'accelerazione di picco e del contenuto in frequenza.

La categoria di sottosuolo per l'area di interesse è stata desunta con specifiche prove MASW. Le analisi condotte hanno indicato un valore di Vseq (NTC 2018) compreso tra **426.10 e 506.94 m/s**.

Tabella 6.3 - Risultati analisi geofisica campagna d'indagini anno 2022

N. indagine	Categoria sismica	Vseq (NTC 2018)
MASW 1	B	506.94
MASW 2	B	416.29

Tali caratteristiche permettono di classificare i siti (NTC 2018) secondo la seguente tabella:

Tabella 6.4 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato (Tab. 3.2.II NTC 2018)

A	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.
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.
C	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.
D	Depositi 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.
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 le componenti orizzontali del moto e per le categorie di sottosuolo di fondazione definite nel § 3.2.2, la forma spettrale su sottosuolo di categoria **A** è modificata attraverso il coefficiente stratigrafico SS, il coefficiente topografico ST e il coefficiente CC che modifica il valore del periodo Tc.

6.3.2.2 *Amplificazione stratigrafica*

Definita la categoria del sottosuolo è possibile calcolare i coefficienti:

Ss coefficiente di amplificazione stratigrafica necessario per calcolare l'accelerazione di picco al suolo ags (o PGA);

CC coefficiente in funzione della categoria di sottosuolo necessario per il calcolo del periodo T_c e quindi la velocità orizzontale massima attesa al suolo V_g (o PGV).

Per sottosuolo di categoria **A** i coefficienti SS e CC valgono 1.

Tabella 6.5 - Definizione dei parametri sismici SS e CC in accordo alla Tabella 3.2.IV, NTC 2018

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

Per le categorie di sottosuolo **B, C, D** ed **E** i coefficienti SS e CC possono essere calcolati, in funzione dei valori di F_0 e T_c^* relativi al sottosuolo di categoria A, mediante le espressioni fornite nella Tab. 3.2.IV, nelle quali $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità e T_c^* è espresso in secondi.

6.3.2.3 Amplificazione topografica

La classificazione del territorio in categorie avviene semplificando le caratteristiche della superficie topografica (pendenza media e morfologia) e considerando l'ubicazione del sito (base, sommità, ecc), rispetto a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali (creste o dorsali allungate), con altezze maggiori di 30 metri.

Le NTC 2018 assegnano a ciascuna Categoria Topografica un Coefficiente di amplificazione topografica (ST). Questo coefficiente, insieme al coefficiente di amplificazione stratigrafica (SS), precedentemente descritto, è necessario per il calcolo del valore di accelerazione orizzontale massima attesa al suolo (PGA).

La superficie topografica da considerare varierà in funzione del settore preso in considerazione sulla base della tabella di riferimento seguente.

Tabella 6.6 - Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica ST (Tab. 3.2.V delle NTC 2018)

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica	ST
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1.0
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1.2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1.4

Sulla base della cartografia delle pendenze, tutte e due i siti indagati ricadono in una classe di pendenza in categoria T1.

Il coefficiente di amplificazione topografica ST e il coefficiente di amplificazione stratigrafica SS sono necessari per il calcolo del valore di accelerazione orizzontale massima attesa al suolo (PGA). La stima dell'accelerazione di picco in superficie a_{gs}

(PGA) per il sito in esame si ottiene dal prodotto tra il fattore di risposta sismica locale (S) e l'accelerazione orizzontale massima attesa al suolo rigido a_g :

$$A_{gs} = a_g * S$$

Il coefficiente S, che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche è calcolato mediante la relazione:

$$S = S_s * S_t$$

in cui S_s è il coefficiente di amplificazione stratigrafica ed S_t è il coefficiente di amplificazione topografica. Nella tabella che segue sono riportati i valori di accelerazione orizzontale massima attesi al suolo a_{gs}

Per l'area di sedime della Stazione RTN ricadente in categoria **di sottosuolo B:**

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii e fondazioni

SLO:

Ss:	1,200
Cc:	1,390
St:	1,000
Kh:	0,008
Kv:	0,004
Amax:	0,392
Beta:	0,200

SLD:

Ss:	1,200
Cc:	1,380
St:	1,000
Kh:	0,009
Kv:	0,005
Amax:	0,462
Beta:	0,200

SLV:

Ss:	1,200
Cc:	1,330
St:	1,000
Kh:	0,017
Kv:	0,008
Amax:	0,827
Beta:	0,200

SLC:

Ss:	1,200
-----	-------

Cc: 1,320
St: 1,000
Kh: 0,018
Kv: 0,009
Amax: 0,879
Beta: 0,200

Sassari, Agosto 2022

I professionisti

Dott. Geol. Domenico Praticò

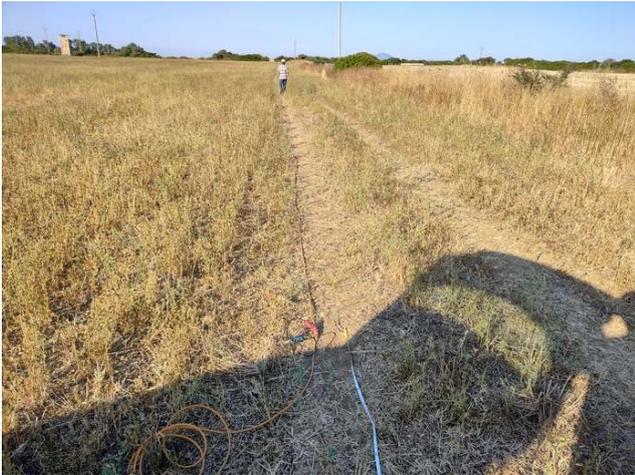


Dott. Geologo Mario Nonne



Appendice 01

Report fotografico



Tomografia 1



Tomografia 2



MASW 1



MASW 2



Inquadramento indagini geofisiche