

PROGETTO, C.S.P.:

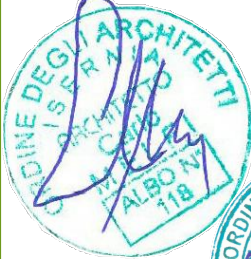
CAPOGRUPPO:



Sede legale: 00192 Roma - via Paolo Emilio, 34  
Uffici: 86170 Isernia (IS) - via Libero Testa, 15/A  
Uffici: 60026 Numana (AN) - via Loreto, 15  
tel +390865411942 - fax +390865234579  
spm@melfiprogetti.it - spm@pec.it  
www.melfiprogetti.it



dott.arch. Carlo Melfi dott.ing. Roberto Melfi



MANDANTI:

geom. Marco Giovanchelli

dott.geol. Andrea Venosini



REGIONE TOSCANA



COMUNE DI CANTAGALLO

(Provincia di Prato)

## OPERE DI BONIFICA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO SU VERSANTE SOGGETTO A FRANA IN LOCALITA' "CASE DI SOTTO - MIGLIANA"

PROGETTO ESECUTIVO

Redatto ai sensi del D.Lgs. n°50 del 18.04.16 e s.m.i.

ALLEGATO:

**STUDIO GEOLOGICO:  
Quaderno indagini indirette  
dedicate - M.a.s.w. 2022**

CODICE ELABORATO:

**C.01  
Allegato.2F**

--

R.U.P.  
dott.arch. Nicola SERINI

A TERMINI DI LEGGE QUESTO PROGETTO E' DI PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA S.P.M. S.R.L. ED E' VIETATO RIPRODURLO O COMUNICARNE A TERZI IL CONTENUTO SENZA PREVENTIVA AUTORIZZAZIONE

C.U.P. F84J18000890009

DATA MAGGIO 2022

INDICE MODIFICHE							
2							
1							
0	1^ EMISSIONE	DATA 05.22	SIGLA 406-408-413	DATA 05.22	SIGLA 404-415	DATA 05.22	SIGLA 417
N°	MODIFICHE	ELABORATO		CONTROLLATO		APPROVATO	



# Indice

1. Premessa.....	2
2. M. a. s. w. 1 .....	10
2.1. Risultati M. A. S. W. ....	11
2.2. Definizione della categoria di sottosuolo.....	16
3. M. a. s. w. 2.....	18
3.1. Risultati M. A. S. W. ....	18
3.2. Definizione della categoria di sottosuolo.....	24

**N. B. Ai sensi della normativa vigente (L. n. 633 del 22.04.1941 “Protezione del diritto d'autore e di altri diritti connessi al suo esercizio” – art. 99 e ss. mm. ii. e R. D. n. 262 del 16.03.1942 “Codice civile” e ss. mm. ii.) il presente elaborato non potrà essere riprodotto né ceduto a terzi, né tanto meno utilizzato per scopi diversi da quello di destinazione. Il relatore ne detiene la proprietà e tutte le autorizzazioni per l’utilizzo.**

## 1. Premessa

Su incarico ricevuto dal Comune di *Cantagallo* è stato redatto uno studio atto ad accertare le caratteristiche sismiche del sottosuolo, per i lavori di “Opere di bonifica per la mitigazione del rischio su versante soggetto a frana in località Case di Sotto - Migliana”, nel territorio comunale di *Cantagallo*.

In relazione all’ O. P. C. M. n. 3519 del 28 Aprile 2006 All. 1b (Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale<sup>1</sup>), sono individuate quattro zone, caratterizzate da quattro valori diversi di accelerazione ( $a_g$ ) orizzontale massima convenzionale su suolo di tipo A, ai quali ancorare lo spettro di risposta elastico. Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo  $a_g$  con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da  $V_{s30} > 800$  m/s (cfr. Fig. 1 e Fig. 2).

L’area in esame è inserita in zona dichiarata sismica di categoria 2<sup>2</sup>, codice ISTAT 69009 per un valore di accelerazione di picco orizzontale del suolo compreso tra  $0.150 < a_g \leq 0.175$  g.

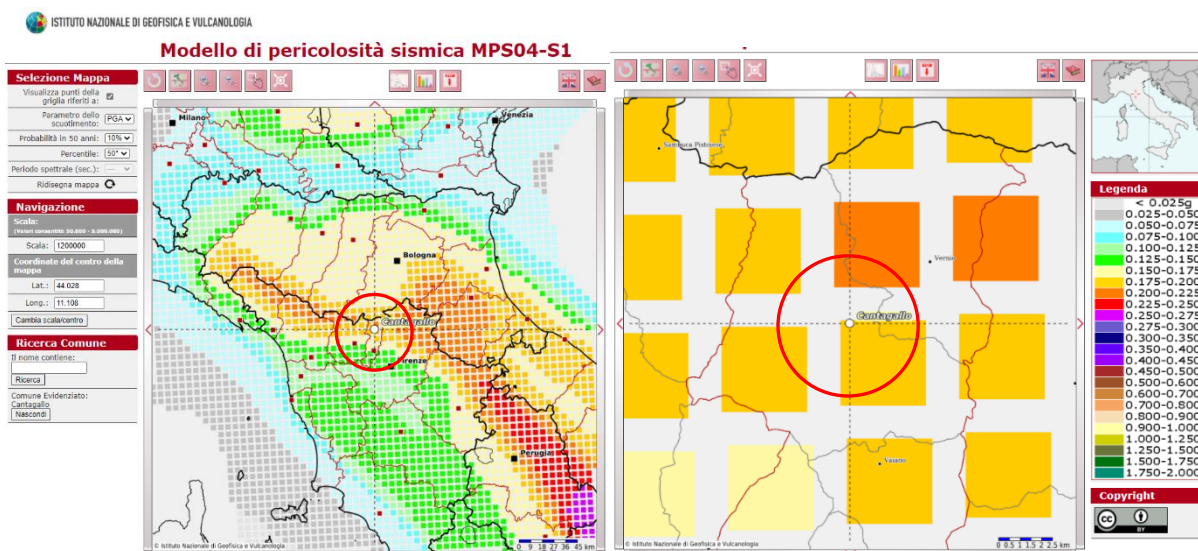


Fig. 1 O. P. C. M. n. 3519 del 28 Aprile 2006 Mappa della pericolosità sismica ed All. 1b.

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Valori di pericolosità sismica del territorio nazionale. [http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa\\_ps\\_apr04/lazio.html](http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/lazio.html).

<sup>2</sup> Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile. <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/attivita/classificazione-sismica>.

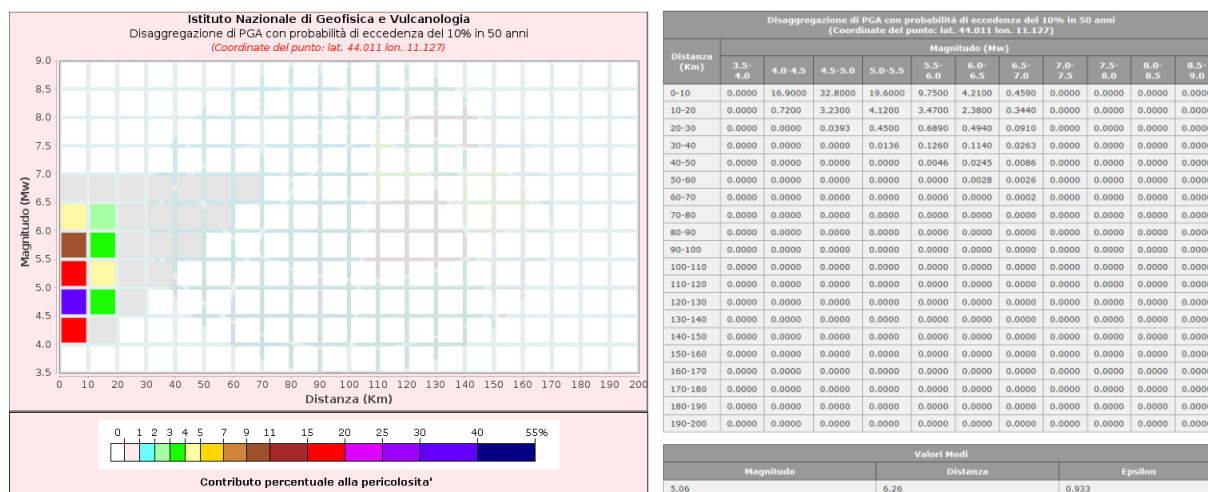


Fig. 2 Grafico di disaggregazione e media dei valori magnitudo-distanza.

Come si può dedurre dal grafico di disaggregazione per l'area oggetto di studio, si ha un range di magnitudo minimo-massimo tra 4.0 e 7.5 ed una distanza relativa tra 00.00 e 60.00 Km.

### Ricostruzione della sismicità dei luoghi

I terremoti che possono generarsi in questi luoghi sono di origine tettonica, dovuti al rilascio elastico di energia accumulata nei processi di movimenti relativi delle varie placche (cfr. Fig. 3 e Fig. 4).

#### Cantagallo



PlaceID IT\_44775  
 Coordinate (lat, lon) 44.022, 11.081  
 Comune (ISTAT 2015) Cantagallo  
 Provincia Prato  
 Regione Toscana  
 Numero di eventi riportati 3

Effetti	In occasione del terremoto del						NMDP	Io	Mw	
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale			
NF	1903	07	27	03	46		Lunigiana	79	7-8	5.19
2	1919	09	25	03	15		Frignano	7	4	3.70
3	1995	10	10	06	54	2	Lunigiana	341	7	4.82

Fig. 3 Int: intensità al sito. Np: numero di osservazioni macroscopiche del terremoto CPTI15. Io: intensità epicentrale (MCS). Mw: magnitudo momento.



Fig. 4 I dati sono stati ottenuti dal database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15.

Dalla relativa tabella (cfr. Fig. 3 e Fig. 4) può comprendere quella che è stata la storia sismica della città, evidenziando i terremoti con le intensità maggiori. Nello specifico gli eventi registrati con la massima intensità si sono avuti nell' area epicentrale localizzata sulla Lunigiana nel 1903 con un'intensità al sito (Is) NF secondo la Scala Mercalli, Mw 5,19, nell'area epicentrale localizzata nel Frignano nel 11919 con un intensità al sito (Is) del 2° secondo la Scala Mercalli, Mw 3,7, ed area epicentrale localizzata sulla Lunigiana più recentemente nel 1995 con un intensità al sito (Is) del 3° grado della Scala Mercalli, Mw 4.82.

### Pericolosità sismica di base

L'azione sismica di progetto sulle costruzioni è valutata a partire dalla “pericolosità sismica di base” in condizioni ideali (suolo di categoria A “NTC2018”). La pericolosità sismica costituisce la chiave d'accesso per la caratterizzazione delle azioni sismiche secondo un approccio di “sito dipendente” sostituito all'approccio “area dipendente”. Le forme spettrali su sito di riferimento rigido orizzontale sono definite in funzione di tre parametri:

- ag: accelerazione orizzontale massima del terreno;
- FO: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

- $T^*c$ : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno  $T_R$  considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50esimo percentile ed attribuendo a:

- $a_g$ : il valore previsto dalla pericolosità sismica;
- $F_0$  e  $T^*c$ : i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica (la condizione di minimo è imposta operando ai minimi quadrati, su spettri di risposta normalizzati ad uno, per ciascun sito e per ciascun periodo di ritorno).

Una volta fissate la vita di riferimento della costruzione  $V_R$  e la probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$ , associate a ciascuno degli stati limite considerati, la pericolosità sismica del sito è identificata come la probabilità di superamento nel tempo di riferimento che si verifichi un evento sismico pari al valore catalogato presso l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

In base alla localizzazione dell’opera e alle prestazioni attese vengono definiti gli stati limite ultimi e di esercizio nei confronti dell’azione sismica (cfr. Fig. 5).

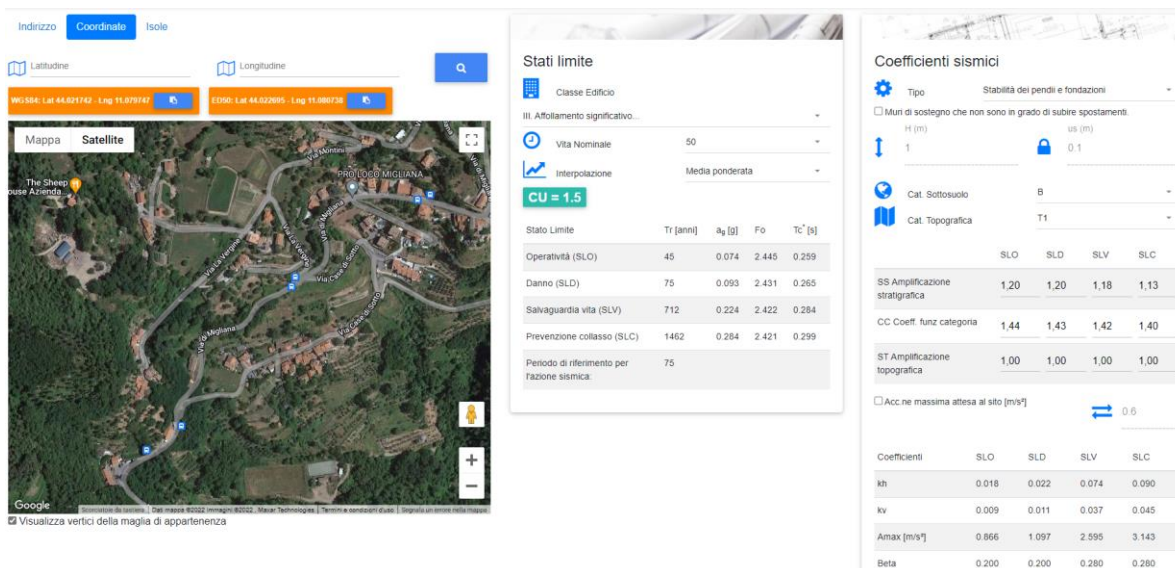


Fig. 5 Calcolo dei parametri sismici di base.

**Sito in esame (coordinate espresse in ED50):**

Latitudine: 44,022695

Longitudine: 11,080738

Classe d'uso: III. Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Vita nominale: 50 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Sito di riferimento:

	ID	Latitudine (°)	Longitudine (°)	Distanza (m)
Sito 1	18946	44,0098	11,0574	2354,946
Sito 2	18947	44,0112	11,1269	3907,041
Sito 3	18725	44,0611	11,1249	5545,931
Sito 4	18724	44,0597	11,0555	4586,719

**Parametri sismici<sup>3</sup>**

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50 anni

Coefficiente cu: 1

	Probabilità superamento (%)	TR (anni)	ag (g)	Fo (-)	TC* (s)
Operatività (SLO)	81	45	0.074	2.445	0.259
Danno (SLD)	63	75	0.093	2.431	0.265
Salvaguardia della vita (SLV)	10	712	0.224	2.422	0.284
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1462	0.284	2.421	0.299

**Coefficienti sismici:**

	Ss (-)	Cc (-)	St (-)	Kh (-)	Kv (-)	Amax (m/s <sup>2</sup> )	Beta (-)
SLO	1.200	1.440	1.000	0.018	0.009	0.866	0.200
SLD	1.200	1.430	1.000	0.022	0.011	1.097	0.200

<sup>3</sup> I parametri sismici sono stati calcolati da <https://geoapp.eu/parametrisismici2018/> secondo le NTC2018. Tutti i coefficienti sismici fanno riferimento al calcolo della stabilità dei pendii con paratie.



	Ss (-)	Cc (-)	St (-)	Kh (-)	Kv (-)	Amax (m/s <sup>2</sup> )	Beta (-)
SLV	1.180	1.420	1.000	0.074	0.037	2.595	0.280
SLC	1.130	1.400	1.000	0.090	0.045	3.143	0.280

### **RSL - Risposta Sismica Locale**

Le vibrazioni della parte superficiale del terreno causate dal moto sismico sono la principale causa di danneggiamento delle strutture. L'entità delle vibrazioni dipende dalla magnitudo del terremoto, dalla tipologia di faglia, dalla distanza dall'epicentro e da come le onde si trasmettono attraversando le varie tipologie di terreni con amplificazione e smorzamento. Per questo motivo la pericolosità locale ed i relativi danni provocati variano da zona a zona a causa di una diversa risposta sismica locale. L'amplificazione di un moto sismico al suolo si verifica dove queste condizioni assumono particolari caratteristiche, e dove gli effetti più pericolosi si hanno quando la frequenza di risonanza del sito coincide con quella dell'edificio.

La risposta degli edifici al sisma è funzione delle caratteristiche dinamiche proprie e del sisma stesso. I maggiori danni si avranno con l'insorgere di effetti locali e fenomeni quali ad esempio:

- amplificazioni sismiche;
- frane sismo indotte;
- liquefazione;
- densificazione;
- fratturazione superficiale.

Fenomeni in cui le onde sismiche arrivando dall'ipocentro in superficie modificando il proprio moto sismico di base in termini di ampiezza, durata e contenuto di frequenze a causa della risposta dinamica degli strati superficiali dovuta alle caratteristiche litologiche, tecniche e geometriche del substrato e degli strati superficiali e alla morfologia del piano campagna. Le condizioni in situ dovrebbero essere valutate in relazione alle problematiche relative a fenomeni di amplificazione o particolari fenomeni secondari che si potrebbero innescare.



## 1.2 Prospezione Sismica Multicanale M. A. S. W.

Per il caso oggetto di studio è stata realizzata una prova sismica attiva del tipo M. A. S. W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), la quale si basa sulla misurazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

Per ciò che riguarda l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i seguenti software: “Easy M. A. S. W.” della Geostru Software e “Geopsy” sviluppato dall'Università “Joseph Fourier (France) - Liegi (Belgium)”.

Le prove M. A. S. W. consentono di ricavare il parametro  $V_{s30}$ /equivalente, richiesto dalla nuova normativa sismica NTC 2018, tramite la misura delle velocità sismiche delle onde superficiali dette di Rayleigh (VR) a diverse frequenze. La variazione di velocità a diverse frequenze (dispersione) è imputabile prevalentemente alla stratificazione geologica, i cui valori sono ricavabili da un successivo processo di inversione numerica.

### Strumentazione e configurazione geometrica utilizzata

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale M. A. E. X820S, avente le seguenti caratteristiche tecniche (cfr. Fig. 6):

- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00005 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del “tempo zero” (time break);
- filtri High Pass e Band Reject;
- “Automatic Gain Control”;
- convertitore A/D a 24 bit;
- 24 geofoni verticali (P) con periodo proprio di 4,5 Hz;
- massa battente pesante di 8 Kg.

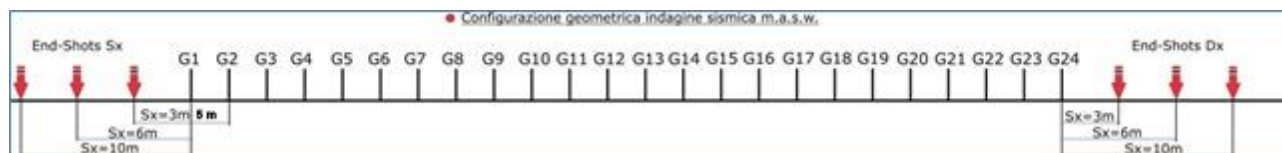


Fig. 6 Configurazione utilizzata per la prova M. A. S. W..

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

- M. a. s. w. 1 e M. a. s. w. 2: 24 geofoni con interspazio (Gx) di 5.00 metri;
- guadagno costante (stesso valore per tutti i canali), nessun AGC (Automatic Gain Control), nessun filtro, guadagno impostato sui 24 dB in modo da evitare saturazione nelle tracce più vicine allo shot e non perdendo troppo segnale alle tracce più lontane;
- n. 12 energizzazioni con n. 2 shots cadauno ad offset (Sx - Dx) -3.00 m; -6.00 m; -10.00 m dal primo geofono e dall'ultimo geofono;
- frequenza di campionamento pari a 1000 campioni secondo;
- tempo di registrazione 2.048 m/s;
- numero di campioni 2048;
- frequenza minima di elaborazione 1 Hz;
- frequenza massima di elaborazione 60 Hz;
- velocità minima di elaborazione 1 m/s;
- velocità massima di elaborazione 800 m/s;
- intervallo di velocità 20 m/s.

Tale configurazione ha consentito di mitigare gli effetti near - field dovuti alle onde di volume.

### Elaborazione dati

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

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali nel dominio frequenza  $f$  – numero d'onda  $K$ ;
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie  $f$ - $k$  cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) consentendo di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano Velocità di fase (m/sec)–frequenza (Hz) o lentezza (sec/m)–frequenza (Hz) (cfr. **Fig. 9** e **Fig. 10**);
- la terza fase consiste nel calcolo della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione

Vp, la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo (cfr. Fig. 12);

- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo (cfr. Fig. 12 e Fig. 13).

## 2. M. a. s. w. 1

Le coordinate del punto medio della prova in “EPSG 3004” sono: X: 1668349,9; Y: 4873081,8” ed una quota altimetrica di 640,00 m s. l. m. (cfr. Fig. 7).

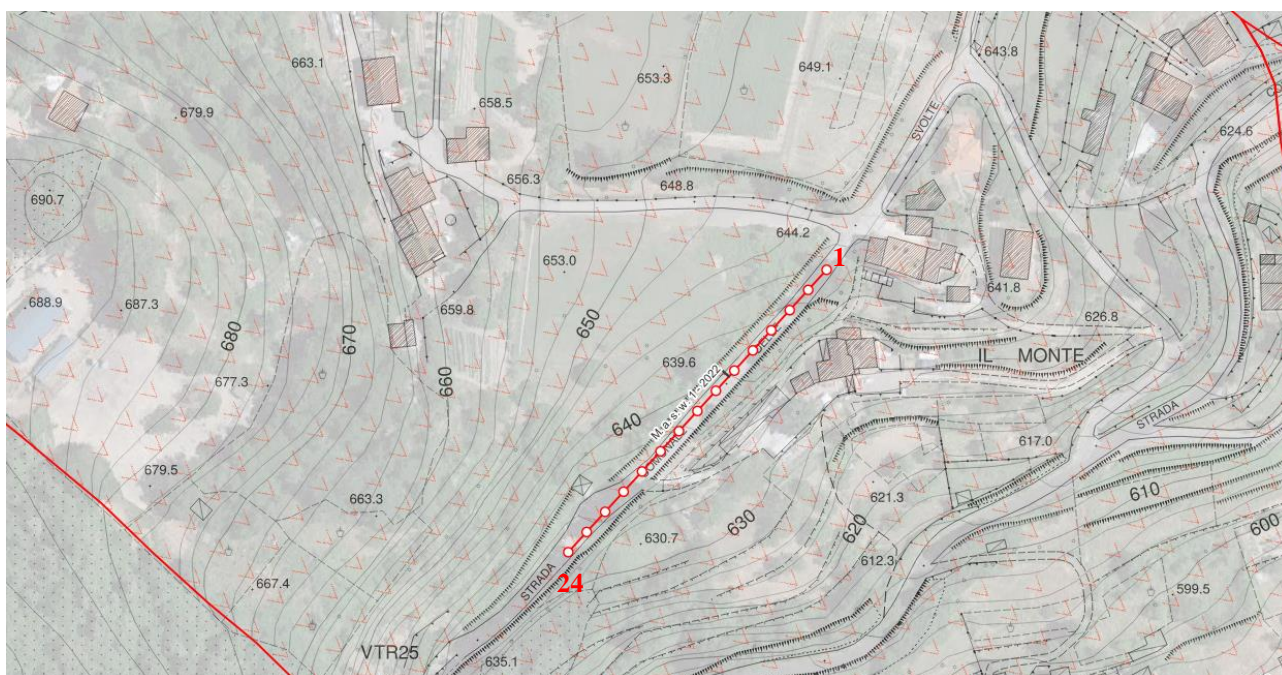


Fig. 7 Immagine da Google Earth con l'ubicazione del posizionamento dell'indagine.

L'indagine geofisica, in particolare è consistita in:

- n. 1 profilo sismico ed elaborazione dati con metodologia d'indagine m. a. s. w. di ml 115.00 con n.24 geofoni, con n. 12 end - shots ad una distanza di - 3.00 m, - 6.00 m, - 10.00 m dal primo e dall'ultimo geofono, per la determinazione del parametro

$V_{s30}$ /equivalente; con l’obiettivo di determinare i principali parametri elastomeccanici dei terreni costituenti il piano di sedime dalle opere in progetto.

## 2.1. Risultati M. A. S. W.

Di seguito è riportato il relativo grafico del sismogramma e della densità spettrale ottenuto per il relativo punto di indagine (cfr. Fig. 8).

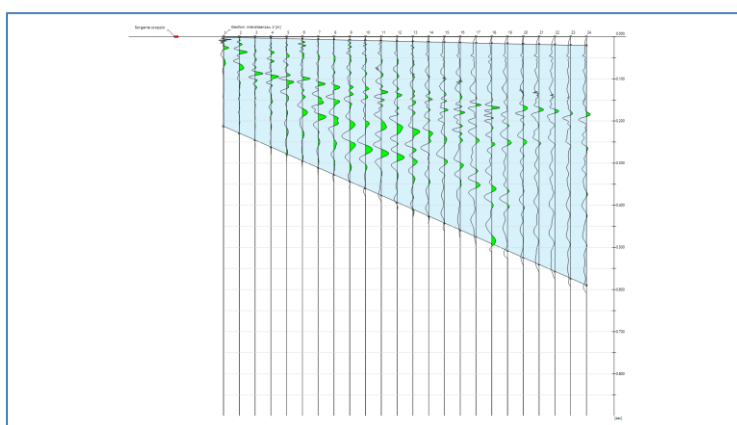


Fig. 8 Sismogramma ottenuto.

Nel grafico della densità spettrale, la velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/sec) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 5 Hz e 60 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra poco meno di 132 m/sec e poco più di 412 m/sec (cfr. Fig. 9 e Fig. 10).

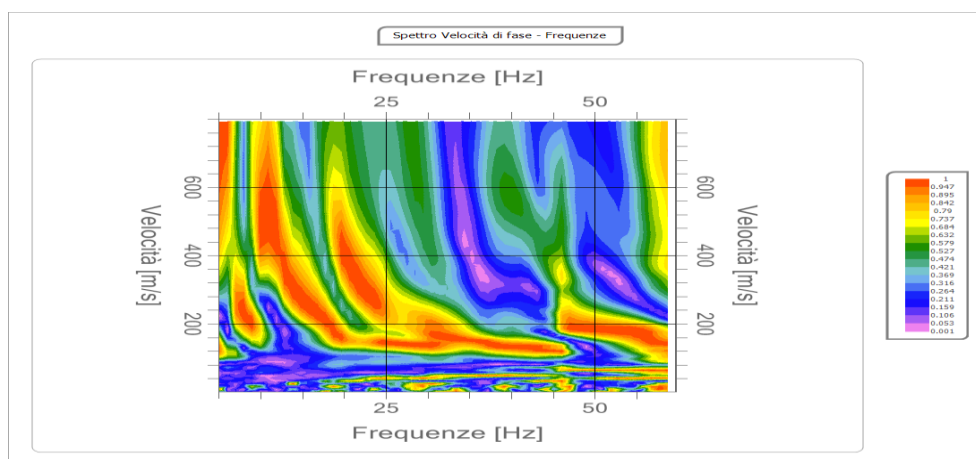


Fig. 9 Spettro 2D velocità di fase – frequenze.

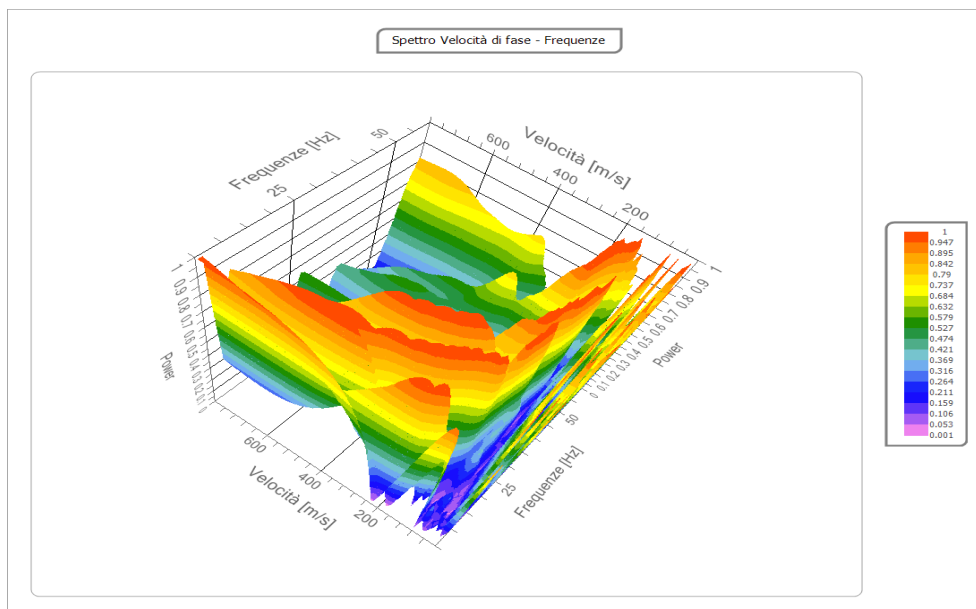


Fig. 10 Spettro 3D velocità di fase – frequenza.

La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l’inversione del modello di velocità evidenzia un buon accordo con la curva di dispersione sperimentale, con una percentuale d’errore che si attesta sullo 0.003% ed un disadattamento dalla soluzione dello 0.006 (cfr. Fig. 11).

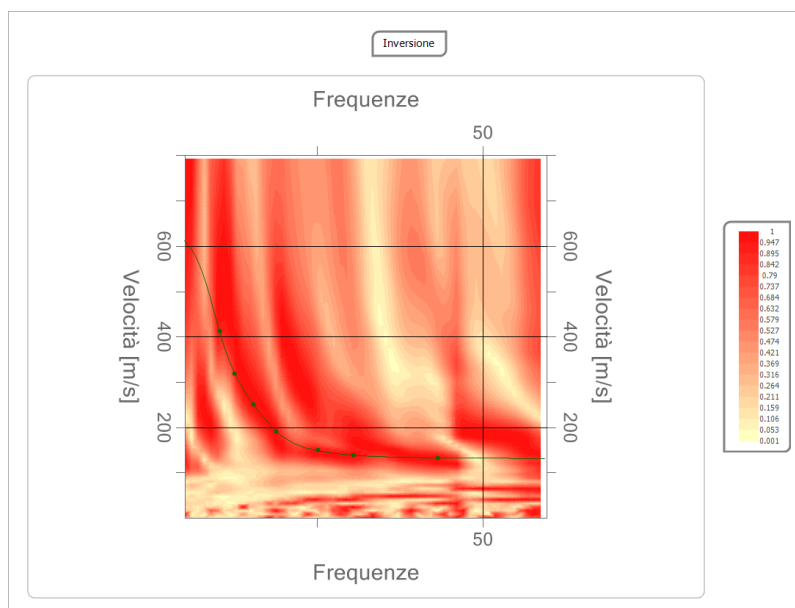


Fig. 11 Processo di inversione e fitting curva sperimentale - curva calcolata.

$V_{S30/Equivalente} = 405,64 \text{ m/s}$  a 0,00 m da p. c. con (h=30.00 m)

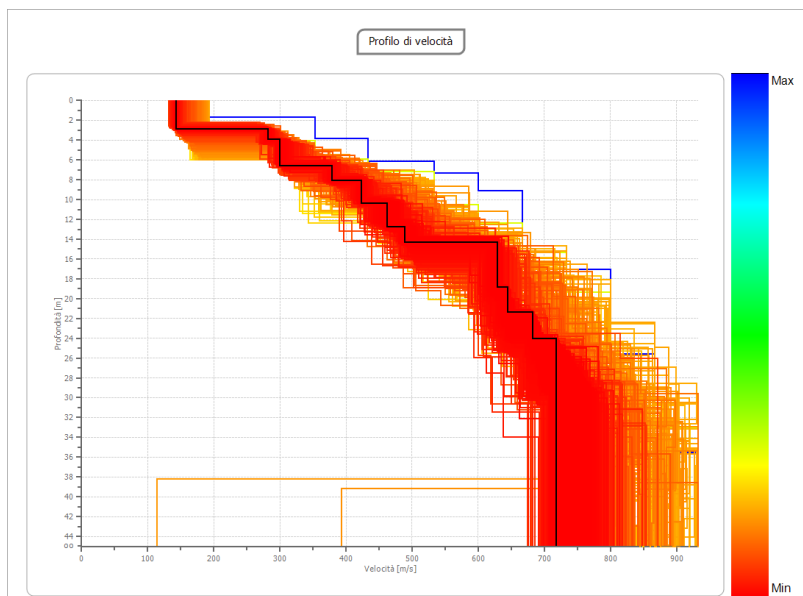


Fig. 12 Modello di velocità del sottosuolo Vs – Profondità (misfit min. - max.).

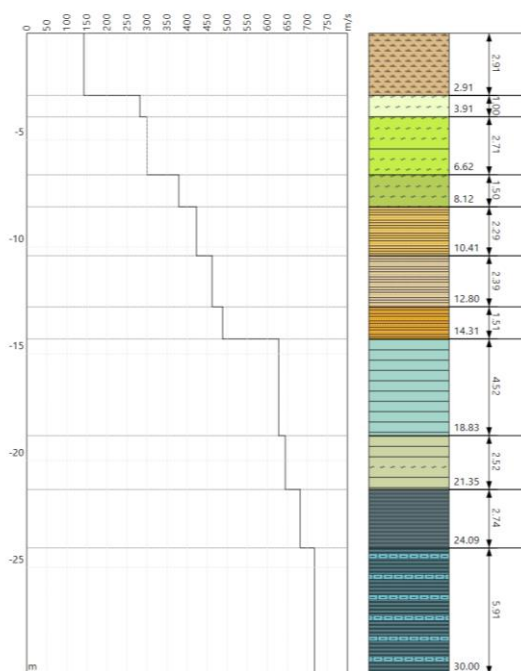


Fig. 13 Modello di velocità del sottosuolo Vs - Stratigrafia.

**Curva di dispersione**

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	10.3	412.8	0
2	12.5	318.0	0
3	15.4	251.0	0
4	18.8	190.5	0
5	25.2	149.7	0
6	30.4	138.3	0
7	43.2	131.7	0

**Inversione**

Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Vs [m/sec]
Sismostrato n.1	2.91	2.91	1700.0	0.25	142.6
Sismostrato n.2	3.91	1.00	1750.0	0.30	282.4
Sismostrato n.3	6.62	2.71	1800.0	0.35	299.6
Sismostrato n.4	8.12	1.50	1800.0	0.35	379.3
Sismostrato n.5	10.41	2.29	1850.0	0.35	423.4
Sismostrato n.6	12.80	2.39	1900.0	0.40	462.5
Sismostrato n.7	14.31	1.51	1900.0	0.40	488.5
Sismostrato n.8	18.83	4.52	1950.0	0.40	628.5
Sismostrato n.9	21.35	2.52	2000.0	0.40	644.8
Sismostrato n.1	24.09	2.74	2100.0	0.40	682.3
Sismostrato n.2	oo	oo	2100.0	0.40	717.5

**Altri parametri geotecnici**

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	2.91	2.91	142.61	1700.00	0.25	34.57	103.72	57.62	86.44
2	3.91	1.00	282.43	1750.00	0.30	139.59	488.57	302.45	362.94
3	6.62	2.71	299.64	1800.00	0.35	161.61	700.31	484.83	436.35
4	8.12	1.50	379.30	1800.00	0.35	258.97	1122.20	776.91	699.22
5	10.41	2.29	423.42	1850.00	0.35	331.68	1437.29	995.05	895.54
6	12.80	2.39	462.51	1900.00	0.40	406.44	2438.61	1896.70	1138.02
7	14.31	1.51	488.47	1900.00	0.40	453.34	2720.05	2115.59	1269.35
8	18.83	4.52	628.54	1950.00	0.40	770.37	4622.24	3595.08	2157.05
9	21.35	2.52	644.76	2000.00	0.40	831.43	4988.59	3880.01	2328.01
10	24.09	2.74	682.34	2100.00	0.40	977.74	5866.44	4562.79	2737.67
11	oo	oo	717.52	2100.00	0.40	1081.16	6486.98	5045.43	3027.26

G0: Modulo di deformazione al taglio;

Ed: Modulo edometrico;

M0: Modulo di compressibilità volumetrica;

Ey: Modulo di Young.

### **Rigidità sismica**

La rigidità sismica esprime la possibilità di amplificazione del danno dovuto ad un evento sismico e per i primi sismo-strati è uguale a:

$$R = \gamma \cdot V_s$$

Sismostrati	RIGIDITA' m/sec*KN/m <sup>3</sup>
Sismostrato 1	2424.37
Sismostrato 2	4942.52
Sismostrato 3	5393.52
Sismostrato 4	6827.40
Sismostrato 5	7833.27

L'elaborazione e la restituzione di un modello geofisico interpretativo viene fatta considerando un margine d'errore somma del tipo di strumentazione adottata, della tecnica utilizzata nell'acquisizione, dei vincoli ipotizzati nella modellazione geologica e delle problematiche di sito.

I valori dei parametri geotecnici sono ritenuti validi nel campo delle piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica indicativamente dell'ordine di  $10^{-2} \div 10^{-4} \%$ ).

Come si può dedurre dall'analisi dei risultati, dal piano campagna fino alla profondità di circa 2.91 m di media si ha uno strato scarsamente rigido la cui velocità delle onde di taglio si attesta sui circa 142.61 m/s. Questa moderata rigidità è espressa come valore mediato lungo tutto il profilo ed è dovuta a materiali scarsamente consistenti/addensati, come coltre eluvio-colluviale e/o coltre di frana a carattere limo-argilloso. Poi per circa 1.00 metri la velocità delle onde  $V_s$  aumenta moderatamente ed in modo non significativo, attestandosi sui circa 282.43m/s.

Successivamente per uno spessore di circa 2.71 metri si annovera un ulteriore leggero aumento della velocità delle onde di taglio, che si porta su valori di 299.64 m/s. Per uno spessore di circa 1.50 metri si annovera un ulteriore e netto aumento della velocità delle onde di taglio, che si porta



su valori di 379.30 m/s. Trattasi di una formazione abbastanza compatta e rigida. A questo sismostrato segue un orizzonte, caratterizzato da un ulteriore incremento della velocità delle onde  $V_s$  che si attestano su valori di circa 423.42 m/s, per uno spessore relativo di 2.29 metri. Successivamente la velocità delle onde di taglio cresce linearmente con l'aumentare della profondità, e superata la profondità utile e necessaria per ottenere il parametro delle  $V_{s,30}$ /equivalente, caratterizza il semispazio attestandosi su valori superiori ai 717.52 m/s circa.

## 2.2. Definizione della categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 delle NTC2018. In alternativa qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella (Tabella 3.2.II) si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità delle onde di taglio,  $V_s$ . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

La tabella riassume le categorie di suolo, caratterizzante il sito investigato, con la relativa descrizione e parametrizzazione.

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
<b>B</b>	Rocce e terre 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	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle

definite per le categorie C e D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

La velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{seq}$  è definita dalla seguente espressione:

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

Dove:

$h_i$  = (spessore in metri) dell'iesimo strato;

$V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nell'iesimo strato;

$N$  = numero di strati;

$H$  = 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 il caso in esame, utilizzando i valori del modello di velocità relativo alle onde di taglio e considerando varie opzioni di posa delle fondazioni da p. c., risulta che il suolo è di **Tipo B** ( $360 < V_{s,30} < 800$  m/s) per tutti gli ipotetici piani di posa da 0.00 m a 3.00 m dal p. c., (cfr. Fig. 14).

Profondità piano di posa delle fondazioni da p.c. (m)	$V_{s,30}$ /Equivalente (m/sec)	CATEGORIA DI SUOLO
0,0	405.64	B
1,0	438.99	B
2,0	478.31	B
3,0	522.46	B

Fig. 14 Stima della categoria di suolo in base al piano di fondazione ipotetico.

### 3. M. a. s. w. 2

Le coordinate del punto medio della prova in “EPSG 3004” sono: X: 1668508,9; Y: 4872994,0” ed una quota altimetrica di 640,00 m s. l. m. (cfr. Fig. 7).

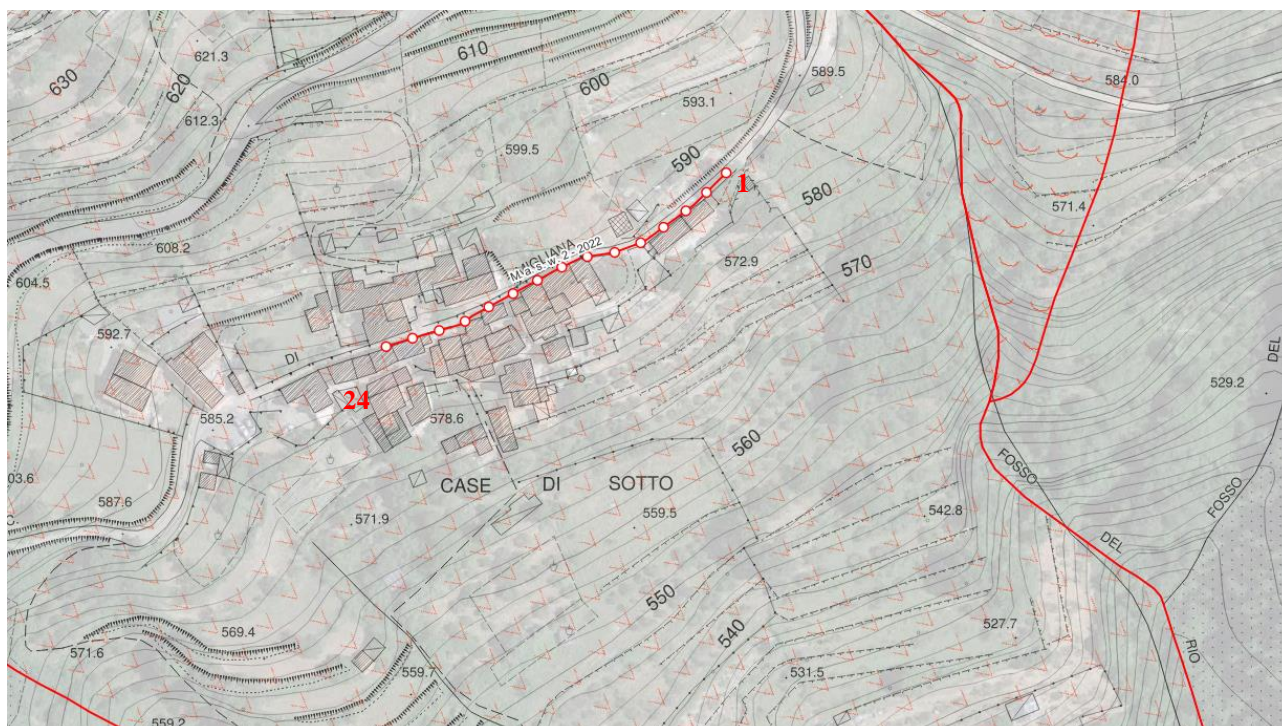


Fig. 15 Immagine Google Earth con l'ubicazione del posizionamento dell'indagine.

L'indagine geofisica, in particolare è consistita in:

- n. 1 profilo sismico ed elaborazione dati con metodologia d'indagine m. a. s. w. di ml 115.00 con n.24 geofoni, con n. 12 end - shots ad una distanza di – 3.00 m, - 6.00 m, - 10.00 m dal primo e dall'ultimo geofono, per la determinazione del parametro  $V_{s30}$ /equivalente; con l'obbiettivo di determinare i principali parametri elastomeccanici dei terreni costituenti il piano di sedime dalle opere in progetto.

#### 3.1. Risultati M. A. S. W.

Di seguito è riportato il relativo grafico del sismogramma e della densità spettrale ottenuto per il relativo punto di indagine (cfr. Fig. 16).

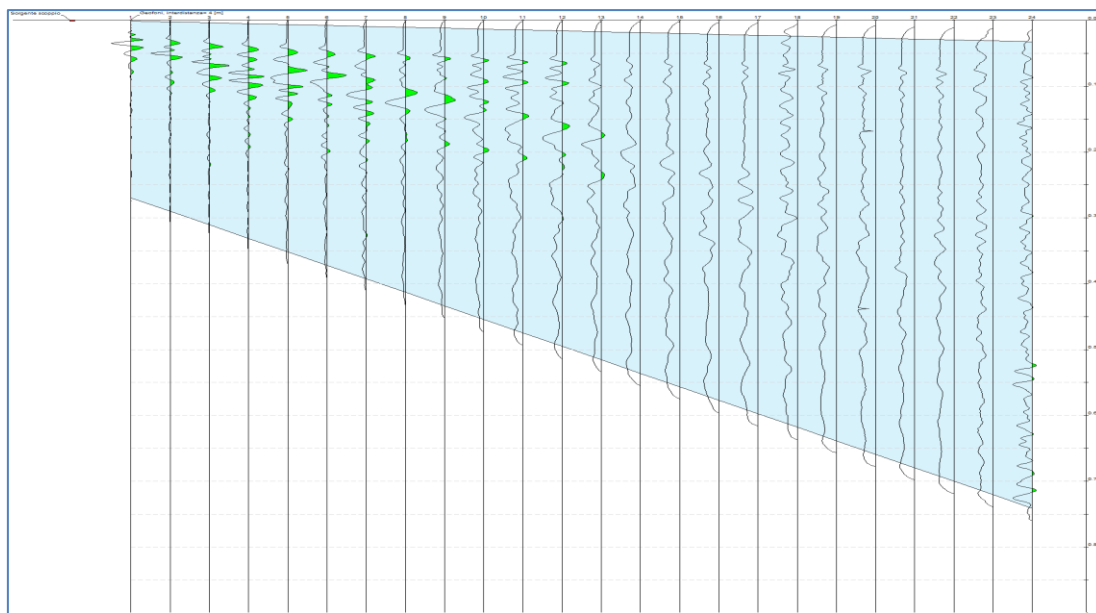


Fig. 16 Sismogramma ottenuto.

Nel grafico della densità spettrale, la velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (m/sec) - frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 5 Hz e 60 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra poco meno di 273 m/sec e poco più di 447 m/sec (cfr. Fig. 17 e Fig. 18).

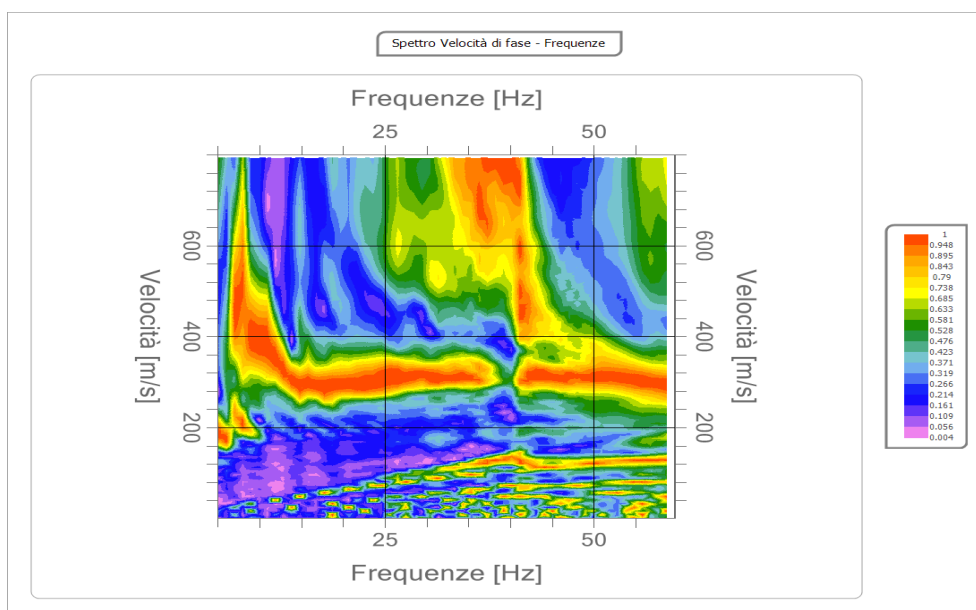


Fig. 17 Spettro 2D velocità di fase – frequenze.

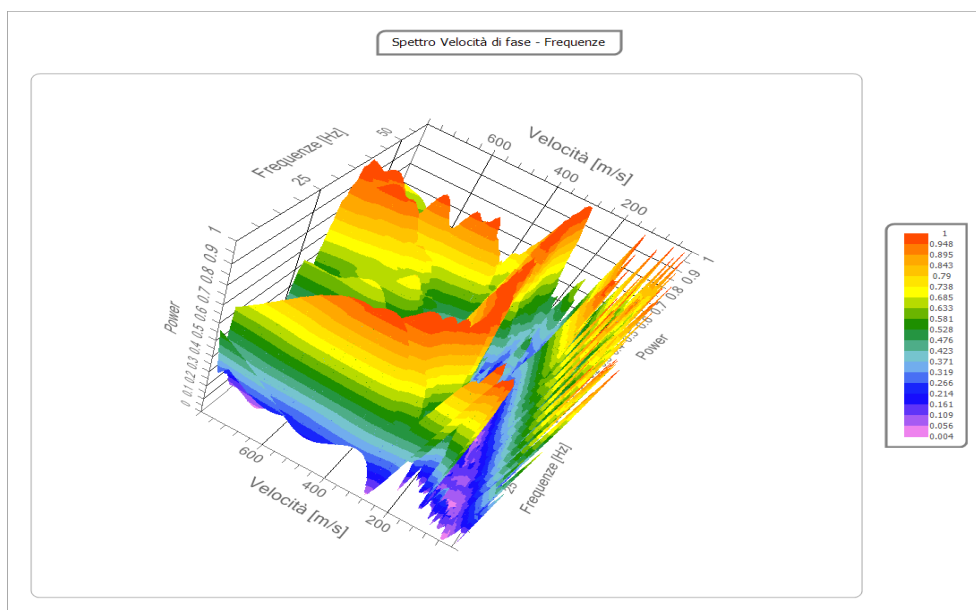


Fig. 18 Spettro 3D velocità di fase – frequenza.

La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l’inversione del modello di velocità evidenzia un buon accordo con la curva di dispersione sperimentale, con una percentuale d’errore che si attesta sullo 0.004% ed un disadattamento dalla soluzione dello 0.006 (cfr. Fig. 19 e Fig. 11).

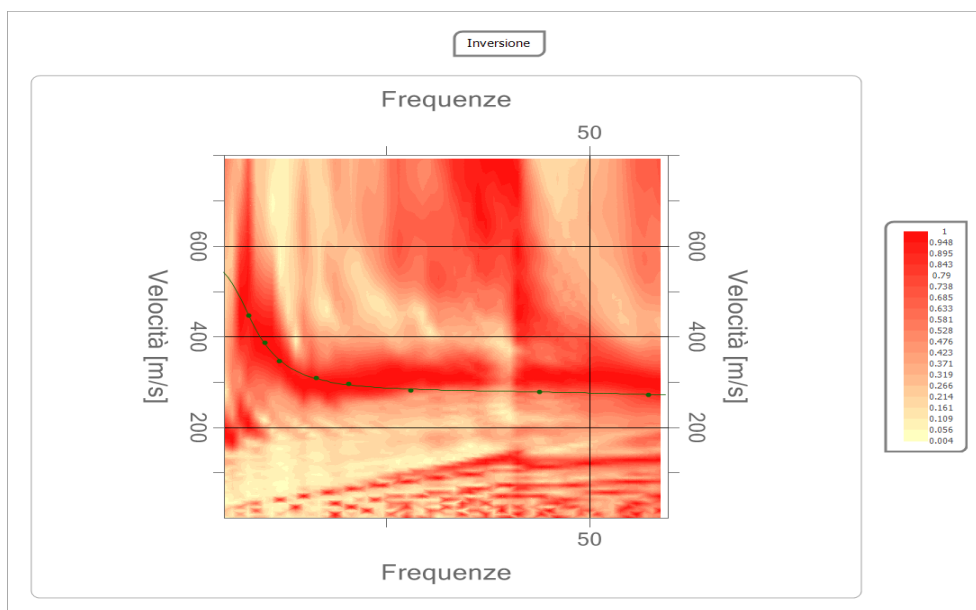


Fig. 19 Processo di inversione e fitting curva sperimentale - curva calcolata.

$V_{S30/Equivalente} = 406,21 \text{ m/s a } 0,00 \text{ m da p. c.}$

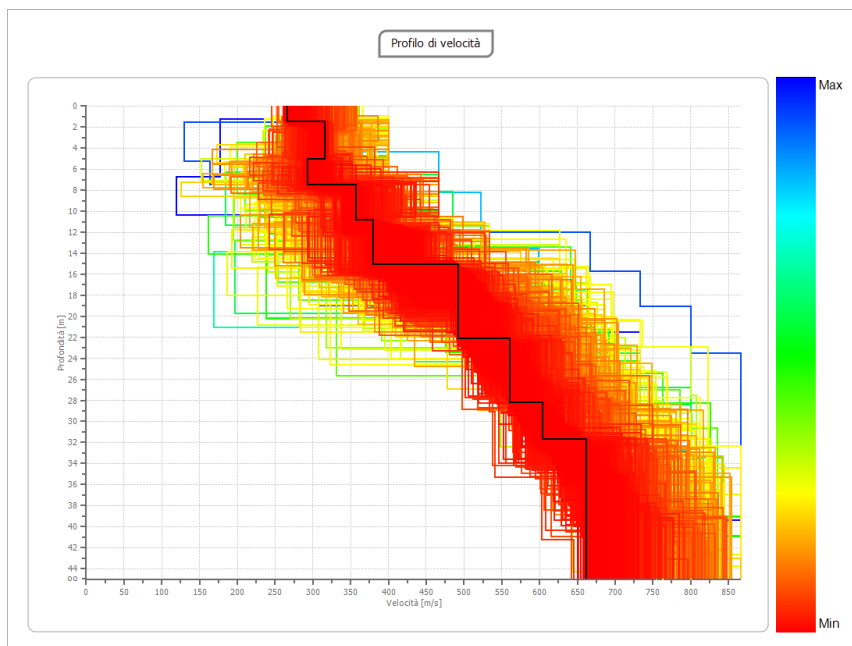


Fig. 20 Modello di velocità del sottosuolo Vs – Profondità (misfit min. - max.)

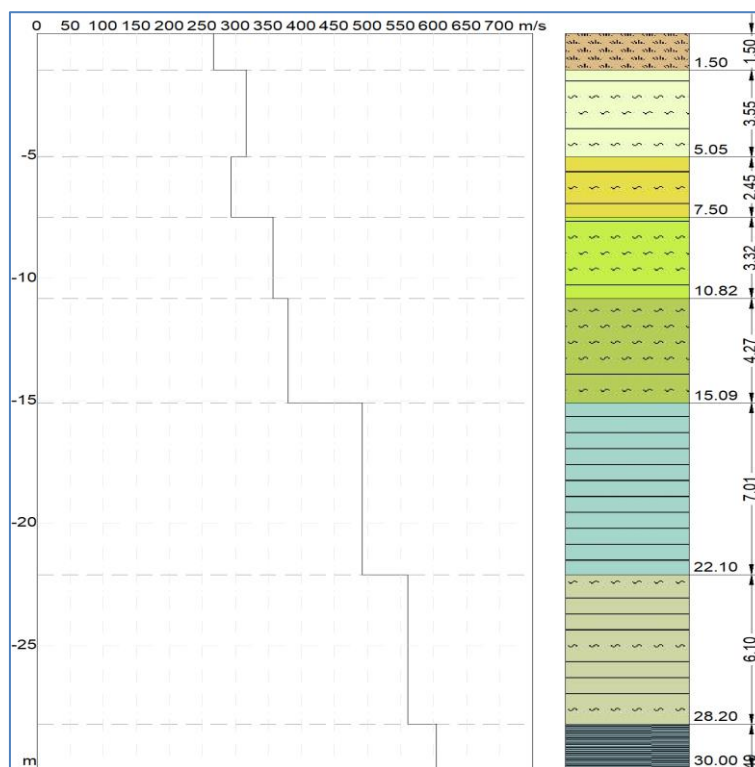


Fig. 21 Modello di velocità del sottosuolo Vs - Stratigrafia.

**Curva di dispersione**

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	8.0	447.1	0
2	10.0	386.6	0
3	11.8	345.8	0
4	16.3	308.2	0
5	20.4	296.7	0
6	28.0	282.0	0
7	43.9	278.8	0
8	57.3	272.2	0

**Inversione**

Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Vs [m/sec]
Sismostrato n.1	1.50	1.50	1500.0	0.30	266.2
Sismostrato n.2	5.05	3.55	1550.0	0.30	315.9
Sismostrato n.3	7.50	2.45	1600.0	0.30	293.0
Sismostrato n.4	10.82	3.32	1700.0	0.30	357.0
Sismostrato n.5	15.09	4.27	1800.0	0.30	380.1
Sismostrato n.6	22.10	7.01	1900.0	0.35	492.4
Sismostrato n.7	28.20	6.10	1900.0	0.35	560.9
Sismostrato n.8	31.69	3.49	2000.0	0.35	604.1
Sismostrato n.9	oo	oo	2100.0	0.35	662.1

**Altri parametri geotecnici**

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]
1	1.50	1.50	266.23	1500.00	0.30	106.31	372.10	230.35	276.42
2	5.05	3.55	315.92	1550.00	0.30	154.70	541.46	335.19	402.23
3	7.50	2.45	293.05	1600.00	0.30	137.40	480.91	297.71	357.25
4	10.82	3.32	357.01	1700.00	0.30	216.68	758.37	469.47	563.36
5	15.09	4.27	380.09	1800.00	0.30	260.05	910.16	563.43	676.12
6	22.10	7.01	492.40	1900.00	0.35	460.66	1996.21	1381.99	1243.79
7	28.20	6.10	560.88	1900.00	0.35	597.72	2590.12	1793.16	1613.85
8	31.69	3.49	604.06	2000.00	0.35	729.77	3162.34	2189.31	1970.38
9	oo	oo	662.10	2100.00	0.35	920.60	3989.25	2761.79	2485.61

G0: Modulo di deformazione al taglio;

Ed: Modulo edometrico;

M0: Modulo di compressibilità volumetrica;

Ey: Modulo di Young.

### Rigidità sismica

La rigidità sismica esprime la possibilità di amplificazione del danno dovuto ad un evento sismico e per i primi sismo-strati è uguale a:

$$R = \gamma * V_s$$

Sismostrati	RIGIDITA' m/sec*KN/m <sup>3</sup>
Sismostrato 1	3993.45
Sismostrato 2	4896.76
Sismostrato 3	4688.80
Sismostrato 4	6069.17
Sismostrato 5	6841.62

L'elaborazione e la restituzione di un modello geofisico interpretativo viene fatta considerando un margine d'errore somma del tipo di strumentazione adottata, della tecnica utilizzata nell'acquisizione, dei vincoli ipotizzati nella modellazione geologica e delle problematiche di sito.

I valori dei parametri geotecnici sono ritenuti validi nel campo delle piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica indicativamente dell'ordine di  $10^{-2} \div 10^{-4} \%$ ).

Come si può dedurre dall'analisi dei risultati, dal piano campagna fino alla profondità di circa 1.50 m di media si ha uno strato moderatamente rigido la cui velocità delle onde di taglio si attesta sui circa 266.23 m/s. Questa moderata rigidità è espressa come valore mediato lungo tutto il profilo ed è dovuta a materiali scarsamente consistenti/addensati, come coltre eluvio-colluviale e/o coltre di frana a carattere sabbio-ghiaiosa. Poi per circa 3.55 metri la velocità delle onde  $V_s$  aumenta leggermente ed in modo non significativo, attestandosi sui circa 315.92 m/s.

Successivamente per uno spessore di circa 2.45 metri si annovera una leggera diminuzione della velocità delle onde di taglio, che si porta su valori di 293.05 m/s. Per uno spessore di circa 3.32 metri si annovera un ulteriore e netto aumento della velocità delle onde di taglio, che si porta su valori di 357.01 m/s. Trattasi di una formazione abbastanza compatta e rigida. A questo sismostrato segue un orizzonte, caratterizzato da un ulteriore incremento della velocità delle onde  $V_s$  che



si attestano su valori di circa 380.09 m/s, per uno spessore relativo di 4.27 metri. Successivamente la velocità delle onde di taglio cresce linearmente con l'aumentare della profondità, e superata la profondità utile e necessaria per ottenere il parametro delle  $V_{s,30}$  equivalente, caratterizza il semispazio attestandosi su valori superiori ai 604.06 m/s circa.

### 3.2. Definizione della categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 delle NTC2018. In alternativa qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella (Tabella 3.2.II) si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità delle onde di taglio,  $V_s$ . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

La tabella riassume le categorie di suolo, caratterizzante il sito investigato, con la relativa descrizione e parametrizzazione.

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

La velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{seq}$  è definita dalla seguente espressione:

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

Dove:

$h_i$  = (spessore in metri) dell'iesimo strato;

$V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nell'iesimo strato;

$N$  = numero di strati;

$H$  = 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 il caso in esame, utilizzando i valori del modello di velocità relativo alle onde di taglio e considerando varie opzioni di posa delle fondazioni da p. c., risulta che il suolo è di **Tipo B** ( $360 < V_{s30} < 800$  m/s) per tutti gli ipotetici piani di posa da 0.00 m a 3.00 m dal p. c., (cfr. Fig. 22).

Profondità piano di posa delle fondazioni da p.c. (m)	$V_{s30}$ /Equivalente (m/sec)	CATEGORIA DI SUOLO
0,0	406.21	B
1,0	418.10	B
2,0	429.15	B
3,0	439.56	B

Fig. 22 Stima della categoria di suolo in base al piano di fondazione ipotetico.

Celenza sul Trigno (CH), Maggio 2022

Firma  
Il geologo senior  
(Dott. Geol. Andrea Venosini)  
(Documento firmato elettronicamente in base al D. Lgs. 82/2005 s.m.i. e norme Allegate, sostituisce il documento cartaceo e la firma autografa)