



**Comune di Villongo**  
Settore Lavori Pubblici

---

**PALAZZO MUNICIPALE**  
Progetto di fattibilità tecnica ed economica  
Opere di miglioramento sismico

---



via Roma n° 41

---

Parte d'opera: **Palazzo Municipale**

Titolo documento:  
**Relazione geologica**

**CODICE ELABORATO**

agglomeramenti	progetto	fase	categoria	sottocategoria	numero progressivo										
A	G	1	P	M	P	F	G	E	N	R	E	L	0	0	4

Progettista:



Via Milano, 36  
24055, Cologno al Serio (BG)  
Telefono: 3202694979  
e-mail: [rp.geologo@gmail.com](mailto:rp.geologo@gmail.com)

dott. geol. Roberto Pagani

**Revisioni**

Rev.	Data	Oggetto
A G 1		Aggiornamento 01



# **COMUNE DI VILLONGO**

*(Provincia di Bergamo)*

## **Oggetto**

Verifica sismica di edifici strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico. Palazzo municipale.

<b><u>Elaborato</u></b>	
Relazione geologica	

<b><u>Committente</u></b>	<b><u>Data</u></b>
Comune di Villongo	Marzo 2018

**A cura di:**

*Dott. Geol. Roberto Pagani*

*Iscritto all'Ordine dei Geologi della Lombardia al n. 1664*



Via Milano, 36  
24055, Cologno al Serio (BG)  
Telefono: 3202694979  
e-mail: [rp.geologo@gmail.com](mailto:rp.geologo@gmail.com)



## ***SOMMARIO***

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CAMPAGNA GEOGNOSTICA.....</b>	<b>5</b>
	<b>3.1 Piano dell'indagine .....</b>	<b>5</b>
	<b>3.2 Prove penetrometriche dinamiche .....</b>	<b>7</b>
	<b>3.2.1 Caratteristiche della strumentazione .....</b>	<b>7</b>
	<b>3.2.2 Profondità raggiunta dalle prove.....</b>	<b>8</b>
	<b>3.2.3 Commento dei risultati ottenuti.....</b>	<b>8</b>
	<b>3.3 Indagini geofisiche .....</b>	<b>10</b>
	<b>3.3.1 Premessa.....</b>	<b>10</b>
	<b>3.3.2 Indagine MASW .....</b>	<b>17</b>
	<b>3.3.3 Indagine H/V.....</b>	<b>19</b>
	<b>3.3.4 Risultati ottenuti.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE.....</b>	<b>24</b>
	<b>4.1 Modello geologico del sito .....</b>	<b>24</b>
	<b>4.2 Parametri nominali .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>ASPETTI GEODINAMICI E SISMICITÀ.....</b>	<b>27</b>
	<b>5.1 Pericolosità sismica di base.....</b>	<b>27</b>
	<b>5.1.1 Zona sismica .....</b>	<b>27</b>
	<b>5.1.2 Pericolosità sismica locale.....</b>	<b>28</b>
	<b>5.2 Approccio sito dipendente.....</b>	<b>29</b>
	<b>5.2.1 Premessa.....</b>	<b>29</b>
	<b>5.2.2 Categoria di sottosuolo .....</b>	<b>30</b>
	<b>5.2.3 Condizioni topografiche.....</b>	<b>31</b>
	<b>5.2.4 Stima della pericolosità sismica .....</b>	<b>32</b>
	<b>5.3 Risposta sismica e stabilità del sito .....</b>	<b>34</b>
	<b>5.3.1 Accelerazione massima e coefficienti sismici orizzontale e verticale</b>	<b>34</b>
	<b>5.3.2 Stabilità nei confronti della liquefazione.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>39</b>

### *Allegati:*

- Certificati delle prove penetrometriche.

## 1 PREMESSA

Su incarico della committenza è stata eseguita la presente indagine geofisica sui terreni ubicati in Via Roma nel comune di Villongo (BG).

La presente relazione, seguendo i dettami della norma vigente e dello stato dell'arte, è finalizzata alla definizione del modello geologico e geofisico di sottosuolo, della frequenza di risonanza del terreno e della categoria di sottosuolo derivante dalla Vs30 (NTC08).

Il lavoro si è sviluppato in diverse fasi, che hanno portato alla caratterizzazione e alla modellazione geologica e geotecnica del sito, che consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

L'area di studio è situata nel territorio comunale di Villongo, in Via Roma, presso il municipio. La quota di riferimento è pari a 238 m s.l.m. circa. L'esatta ubicazione dell'area è visibile nella figura seguente.

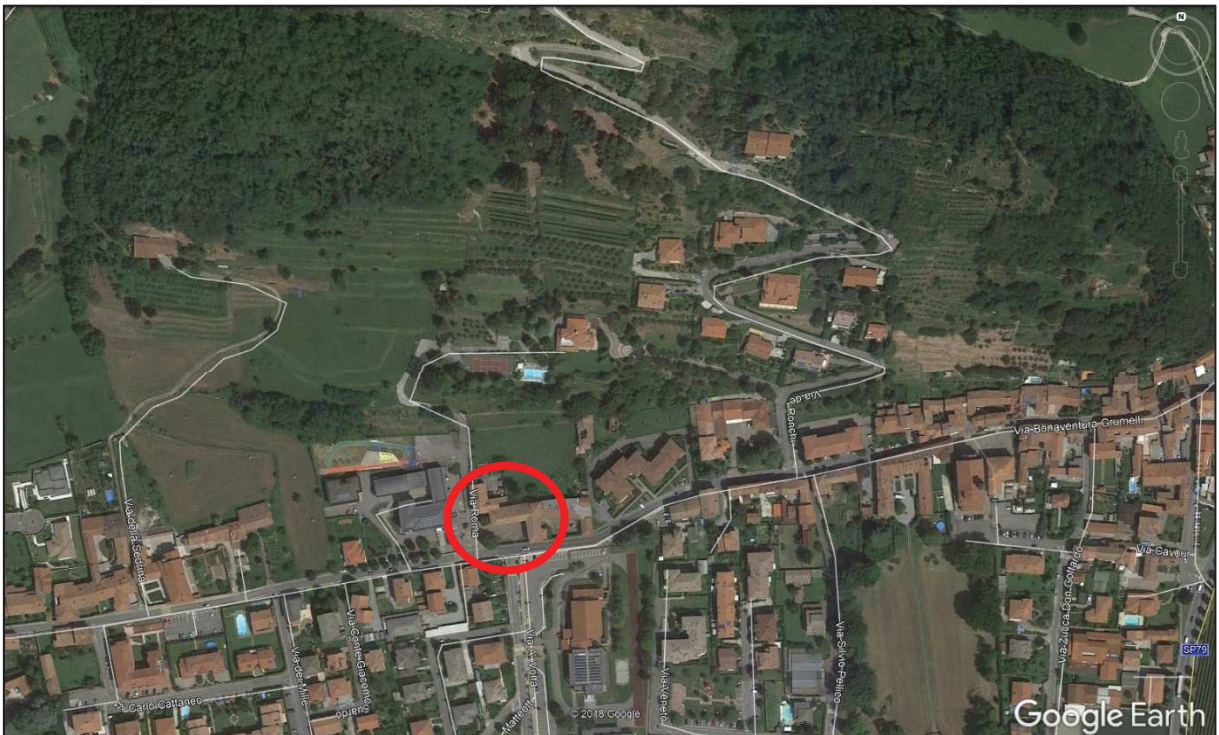


Figura 1 - Immagine dell'area tratta da [www.maps.google.it](http://www.maps.google.it). Indicata in rosso l'area di intervento.

## 2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito di intervento si trova sul versante sud ovest del Monte Dratto, in una zona caratterizzata dall'affioramento di unità cretacicche sovrastate da depositi quaternari poligenici.

Il sito in oggetto, in particolare, è posto su terreni appartenenti all'unità nota in letteratura come Supersintema di Monterotondo - Unità di Torbiato (ROO).

Tale unità, datata Pleistocene Medio – Superiore, è costituita da depositi di contatto glaciale comprendenti limi e limi argillosi laminati da normalconsolidati a sovraconsolidati; diamicton massivi da caotici a gradati localmente risedimentati. La superficie limite superiore si presenta con morfologia ben conservata, coltre eolica multipla costituita da loess 10YR su loess 7,5YR; profondità massima del fronte di decarbonatazione sino a 1,9 m su till, 2,0 m su ghiaie fluviali, 2,8 m su sequenze complesse; sino a tre differenti orizzonti pedologici Bt su depositi glaciali e fluviali; laccature Fe - Mn negli orizzonti argillificati; clasti calcarei argillificati, silicoclasti metamorfici in parte alterati o con cortex vulcanici raramente alterati; colore della matrice da 5 a 10YR.



Figura 2 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia - Foglio 98 Bergamo. Indicata in rosso l'area in esame.

Il substrato roccioso, affiorante a monte dell'edificio scolastico, è costituito dall'Arenaria di Sarnico (SAR), datata Coniaciano.

Tale unità comprende arenarie grigie da medie a fini in strati piano paralleli sa sottili a spessi, massivi o con laminazioni interne, alternate a peliti in orizzonti al massimo decimetrici; arenarie da medie a grossolane in strati amalgamati anche di sviluppo lenticolare, in orizzonti plurimetrici. Nelle peliti foraminiferi planctonici e nanno fossili relativi alle zone *Marthasterites furcatus* e *Broinsonia lacunosa*. Spessore 400 m. Lobi torbiditici di avampaese.

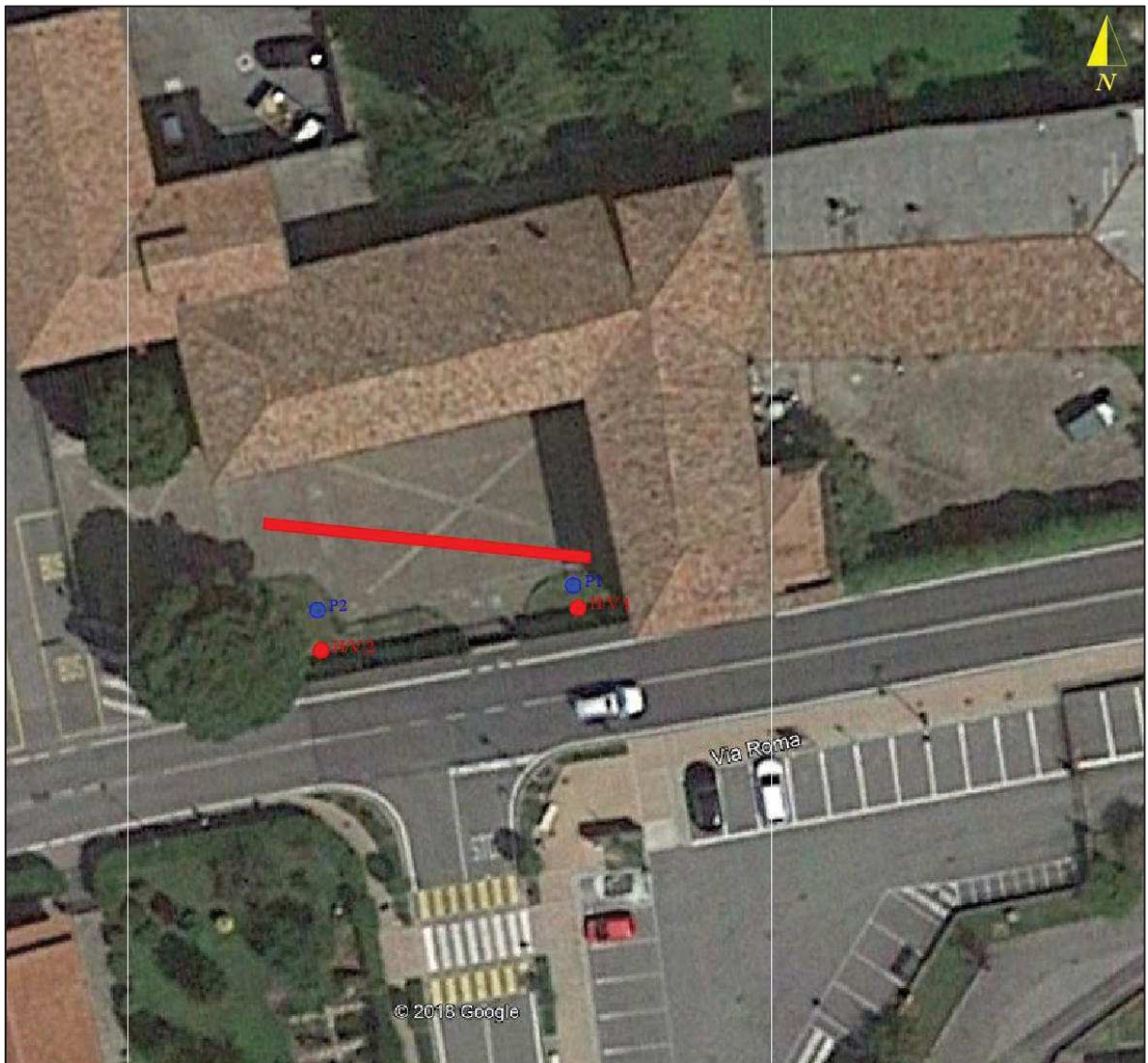
### **3 CAMPAGNA GEOGNOSTICA**

#### ***3.1 Piano dell'indagine***

Per la ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo e la caratterizzazione fisico - meccanica dei terreni è stata sviluppata una campagna geognostica composta dalle seguenti indagini:

- rilevamento geologico – tecnico dell'area in esame e di un suo significativo intorno;
- n. 2 prove penetrometriche dinamiche eseguite con penetrometro DPSH;
- n. 1 indagine sismica a onde di superficie con tecniche combinate multicanale e H/V.

L'esatta ubicazione delle indagini eseguite è visibile nella figura seguente.



**LEGENDA**

- P1 Prova penetrometrica dinamica
- H/V 1 Indagine geofisica H/V
- Indagine geofisica multicanale

Scala grafica

0 m  20 m

*Figura 3 - Ubicazione indagini geognostiche.*

### 3.2 *Prove penetrometriche dinamiche*

#### 3.2.1 *Caratteristiche della strumentazione*

Le prove penetrometriche dinamiche DP sono state eseguite con penetrometro dinamico automatico super pesante DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) del tipo Pagani TG73-100L. I dati tecnici del penetrometro sono riassunti nella tabella seguente.

Massa maglio (kg)	73
Altezza caduta (m)	0,75
Massa passiva (kg)	-
Lunghezza aste (m)	1,2
Massa aste (kg/m)	7,0
Aste O.D. (mm)	34
Aste I.D. (mm)	18
Punta conica Ø base (mm)	51
Angolo apertura punta conica (°)	60
Altezza complessiva punta (mm)	70
Penetrazione standard (cm)	30

La prova consiste nel misurare il numero dei colpi ( $N_{30}$ ) necessari all'infissione delle aste per un intervallo pari a 30 centimetri (N/colpi/piede) seguite, nel caso di terreni particolarmente coesivi, dai tubi di rivestimento per evitare l'eventuale attrito tra aste e terreno (e per l'avanzamento dei quali si registra il numero dei colpi necessario allo stesso).



### 3.2.2 Profondità raggiunta dalle prove

La prove penetrometriche hanno raggiunto le profondità indicate nella tabella seguente.

<i>Numero prova</i>	<i>Profondità (m)</i>	<i>Aste bagnate (m)</i>
1	10,8	No
2	9,9	No

### 3.2.3 Commento dei risultati ottenuti

Analizzando i risultati delle prove penetrometriche è possibile individuare quattro livelli/orizzonti.

Il primo è costituito verosimilmente da limo e argilla, ha uno spessore compreso tra 2 m e 3 m ed è caratterizzato da un  $N_{30}$  generalmente compreso tra 1 e 4.

Il secondo orizzonte ha un  $N_{30}$  compreso tra 8 e 11, è verosimilmente costituito da diamicton e si spinge fino a profondità di circa 6,6 m.

Il terzo livello litotecnico si spinge fino a profondità comprese tra 9 m e 10,5 m ed ha un  $N_{30}$  compreso tra 11 e 21.

L'ultimo livello è costituito con ogni probabilità dal substrato roccioso arenaceo, in corrispondenza del quale si manifesta il rifiuto alla penetrazione con evidenti rimbalzi del maglio di battuta.



*Figura 4 - Esecuzione delle prove penetrometriche dinamiche.*

### ***3.3 Indagini geofisiche***

#### ***3.3.1 Premessa***

##### ***3.3.1.1 Descrizione delle tecniche utilizzate***

È bene ricordare che le procedure di misura impiegate per l'indagine geofisica si basano su tecniche di esplorazione indiretta che, nonostante siano utilizzate allo stato dell'arte sia delle conoscenze scientifiche che degli avanzamenti tecnologici, hanno una serie di intrinseche limitazioni.

L'indagine si fonda infatti sull'applicazione di conoscenze e di leggi scientifiche riconosciute ma anche su calcoli e valutazioni professionali circa fenomeni suscettibili di interpretazione, pertanto non può sostituire integralmente l'esplorazione diretta.

Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione.

Infine, i profili di Vs ricavati con questa metodologia, come tutti i metodi indiretti, non presentano una soluzione univoca e quindi più modelli possono fornire curve sintetiche simili tra loro.

### *3.3.1.2 Tecniche multicanale a onde di superficie*

#### Cenni metodologici

La propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda che interessano il terreno a diverse profondità e che risultano condizionate dalle caratteristiche elastiche e di rigidità del sottosuolo. Lunghezza d'onda “ $\lambda$ ”, frequenza “ $f$ ” e velocità di propagazione “ $V$ ” sono legate dalla relazione:

$$V = \lambda \cdot f$$

In generale, lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario lunghezze d'onda minori, poiché associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. Questa proprietà, chiamata dispersione, è valida solo per le onde di superficie, Rayleigh e Love in mezzi stratificati.

Le tecniche per ricavare le curve di dispersione da sorgenti attive o passive con due o più ricevitori hanno una varietà di nomi che dipendono da dettagli quali la geometria dei ricevitori, sorgente attiva o passiva etc. I più diffusi tra i metodi attivi sono: SASW (spectral analysis of surface waves; Heisey et al., 1982) e MASW (multichannel analysis of surface waves; Park et al., 1999); mentre tra i metodi passivi sono ESAC (extended spatial auto correlation; Ohori et al., 2002) e ReMi (refraction microtremor; Louie, 2001).

La base di tutte queste tecniche è lo slant - stack o correlazione del segnale registrato da una serie di ricevitori (geofoni), che permette la determinazione della velocità di propagazione di onde a frequenze diverse che attraversano lo stendimento.

### Acquisizione dati

Per l'esecuzione delle indagini sismiche in oggetto si è utilizzata la seguente strumentazione:

- sismografo digitale multicanale Soilspy Rosina (Moho s.r.l.) a 24 + 1 canali;
- n. 24 + 1 geofoni verticali da 4,5 Hz;
- mazza battente da 8 kg;
- piattello metallico di battuta;
- pc portatile.

Sullo stesso stendimento è possibile realizzare due tipologie di indagini: MASW e ReMi.

Nel caso di una indagine con tecnica MASW, per il posizionamento del piattello di battuta (shot point) è stata preparata una piazzola asportando i primi centimetri di suolo vegetale e infiggendo la piastra metallica di alcuni centimetri nel terreno; in questo modo si è ottenuta una migliore energizzazione sismica in termini di ampiezza e di spettro dell'impulso immesso, con un incremento del rapporto segnale/rumore.

In seguito sono state acquisite n. 5 energizzazioni, generate battendo la mazza da 8 kg sulla piastra metallica.

Nel caso di una indagine con tecnica ReMi, invece, si esegue una registrazione simultanea in più geofoni del rumore sismico ambientale. La registrazione ha una durata di alcuni minuti.

### Elaborazione ed interpretazione dei risultati

Per quanto riguarda, infine, l'elaborazione delle misure è stato impiegato il software Grilla prodotto da Moho s.r.l., col quale il segnale sismico registrato viene processato attraverso procedure di slant - stack (traslazione e somma) e FFT ottenendo gli spettri di velocità di fase. Questi indicano, per ogni frequenza, la più probabile velocità delle onde di superficie investigate.

Da tali spettri è possibile ricostruire un profilo di  $V_s$ , sapendo che:

- per ogni frequenza è possibile calcolare la lunghezza d'onda corrispondente secondo la relazione  $\lambda = V/f$ ;
- la profondità corrispondente  $z$  è compresa tra  $\lambda/3$  e  $\lambda/2$ .

La  $V_s$ , inoltre, è collegata alle velocità delle onde di Love e di Rayleigh attraverso il coefficiente di Poisson e normalmente risulta maggiore di queste ultime del 10 - 15 %.

Le onde di superficie possiedono diversi modi di propagazione; questo implica che negli spettri di velocità, alla stessa frequenza, sono possibili diversi massimi relativi di energia.

Nel caso di sorgente impulsiva ideale (con spettro bianco), geometria dei ricevitori ideale (perfettamente sintonizzata su tutte le frequenze) e suolo ideale (isotropo, lateralmente omogeneo, con graduale aumento della velocità in profondità) il modo fondamentale è quello dominante in termini di energia.

Individuare la curva di dispersione del modo fondamentale o classificare correttamente i modi superiori implica un certo grado di soggettività. Utilizzando gli spettri di velocità di fase si ha il vantaggio di avere un dato più oggettivo e più completo, che conserva le informazioni sulla natura multi modale delle curve di dispersione.

### 3.3.1.3 *Tecnica H/V*

#### Cenni metodologici

La tecnica H/V, appartenente alla sismica passiva, nasce da studi condotti in Giappone attorno al 1950 ed è basata sullo studio dei rapporti di ampiezza che, nelle diverse frequenze di vibrazione (rapporti spettrali), esistono fra il rumore sismico misurato sul piano orizzontale (H) e quello misurato lungo la componente verticale (V). L'idea che sta alla base della procedura è quella secondo cui il rapporto H/V consente di eliminare il ruolo della sorgente isolando gli effetti delle modalità di propagazione delle onde sismiche. In particolare, si osserva che l'andamento dei rapporti spettrali in funzione della frequenza di vibrazione (funzione H/V) mostra dei massimi in corrispondenza delle frequenze di risonanza per le onde S generate da forti variazioni di velocità.

Il significato teorico del rapporto spettrale H/V è abbastanza immediato nel caso in cui si consideri un mezzo semplice formato da due soli strati: il bedrock ed uno strato superficiale più soffice. Si precisa che per bedrock si intende qualunque strato con velocità nettamente maggiore di quello sovrastante, in grado di determinare un picco di risonanza; tale strato non deve necessariamente essere una roccia ma, soprattutto in ambiti di pianura, può essere una sabbia o una ghiaia. Le frequenze di risonanza, in questo sistema, sono pertanto date da:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

dove  $V_s$  indica la velocità delle onde di taglio nel mezzo e  $H$  lo spessore dello strato che risuona alla frequenza  $f_r$ . Tali frequenze, associabili ai picchi del rapporto H/V, possono essere quindi eccitate dal rumore di fondo e diventare visibili nello spettro del rumore sismico misurato in superficie.

### Frequenze di vibrazione e doppia risonanza

Un sisma è composto da onde di frequenza differente, che subiscono amplificazioni differenti. La frequenza a cui corrisponde la massima amplificazione viene detta frequenza naturale di vibrazione del terreno. I danni maggiori si hanno in quelle strutture la cui frequenza naturale di vibrazione è prossima alla frequenza naturale di vibrazione del terreno. In questi casi si verifica il fenomeno della doppia risonanza. Le ampiezze di oscillazione del terreno e dell'edificio si combinano, amplificando in maniera disastrosa le sollecitazioni sulla struttura.

Il fenomeno della doppia risonanza consente di spiegare il danneggiamento selettivo che si osserva quasi sempre nelle aree colpite da un sisma. Variando le condizioni geologiche locali, varia la frequenza naturale del terreno. Edifici con simile frequenza naturale possono subire livelli di danno molto differenti fra loro, perché posti in siti dove cambia la situazione geologica.

Grazie all'impiego della tecnica H/V è possibile determinare la frequenza naturale del terreno, fornendo una informazione fondamentale per la progettazione di nuovi edifici o per la verifica di quelli esistenti.

La frequenza naturale degli edifici si determina attraverso formule empiriche, come quelle proposte nelle NTC08, oppure eseguendo misure dirette con strumentazione sensibile posta all'interno dell'edificio.



### Acquisizione dati

Per l'esecuzione dell'indagine sismica secondo la tecnica H/V in oggetto si è utilizzato il tromometro digitale Tromino 3G prodotto dalla Moho s.r.l., dotato di tre canali velocimetrici ad alta risoluzione per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale, due livelli di amplificazione (saturazione  $\pm 1.2$  mm/s in banda) e frequenze di campionamento 128, 256, 512, 1024 Hz su tutti i canali.

Le misure vengono eseguite posizionando lo strumento al suolo, avendo cura della sua messa in bolla, e successivamente registrando per alcuni minuti.

### Elaborazione ed interpretazione dei risultati

Per quanto riguarda, infine, l'elaborazione delle misure è stato impiegato il software Grilla prodotto da Moho s.r.l., eseguendo su ciascuna tromografia le seguenti operazioni.

- **Analisi della traccia.** La pulizia della traccia è preliminare a qualsiasi tipo di modellazione. La rimozione dei disturbi è di fondamentale importanza anche per l'analisi delle curve H/V. Tali curve devono essere statisticamente significative, ossia essere caratterizzate da una deviazione in ampiezza e in frequenza ridotta. Quando questa caratteristica non sia presente sin dall'inizio, essa va ricercata tramite una pulizia del tracciato.
- **Modellazione.** L'osservazione simultanea delle curve H/V e degli spettri delle singole componenti permette di distinguere i picchi di origine stratigrafica da quelli di natura antropica. Un picco di origine naturale individuato sulla curva H/V coincide, sugli spettri delle singole componenti, ad un minimo locale della componente spettrale verticale.

### 3.3.2 Indagine MASW

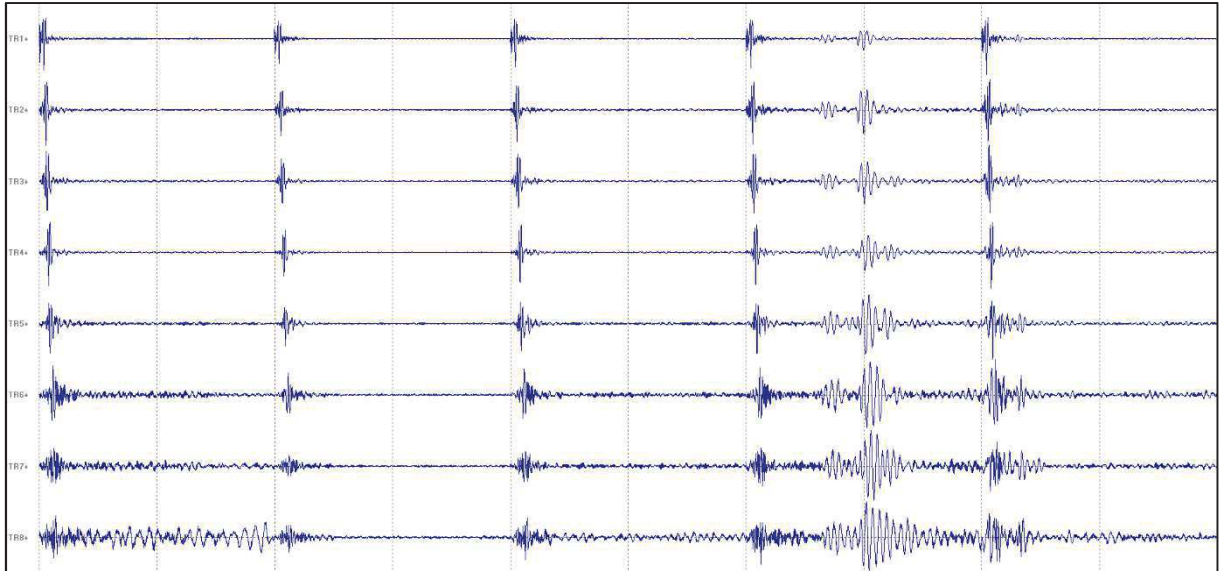
#### 3.3.2.1 Parametri di acquisizione

<i>Numero geofoni</i>	<i>Spaziatura geofoni [m]</i>	<i>Lunghezza stendimento [m]</i>	<i>Geofono trigger</i>	<i>Offset [m]</i>	<i>Durata registrazione [s]</i>	<i>Frequenza di campionamento [Hz]</i>
8	3	21	1	5	2	512

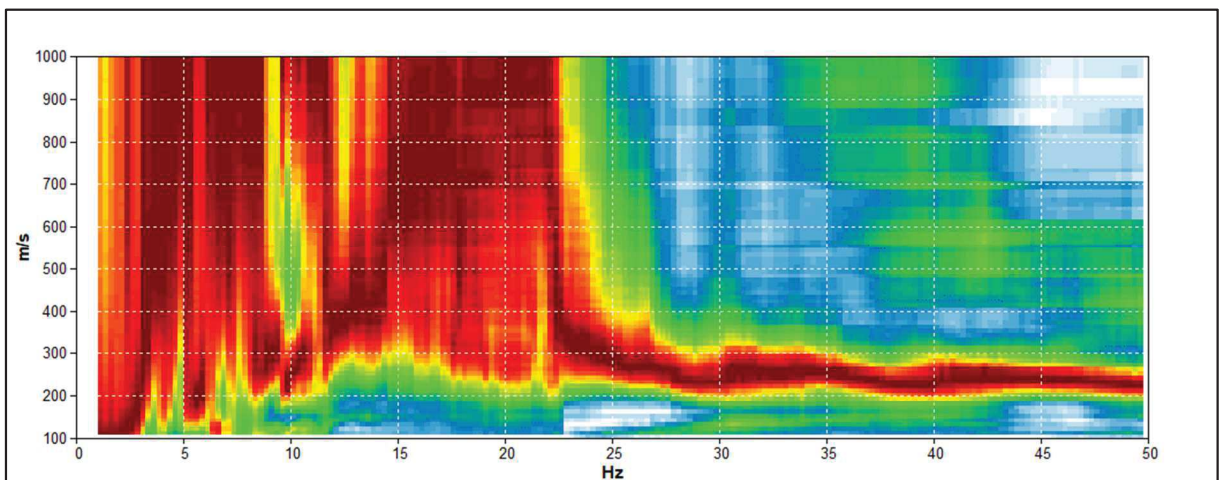


*Figura 5 – Esecuzione dell'indagine.*

### 3.3.2.2 *Acquisizione ed elaborazione*



*Figura 6 - Sismogramma acquisito.*



*Figura 7 - Spettro delle velocità di fase.*

La fase di processing digitale del segnale ha permesso di ottimizzare l'identificazione dello spettro di velocità di fase, nel quale si osservano frammentazioni e sovrapposizioni dei modi di vibrare. Tuttavia, il modo fondamentale risulta meglio definito ed interpretabile nell'intervallo di frequenza 25 ÷ 50 Hz.

### 3.3.3 Indagine H/V

#### 3.3.3.1 *Informazioni generali*

<b>Frequenza di campionamento</b>	128 Hz	<b>Condizioni meteorologiche</b>	Sereno
<b>Data registrazione</b>	28/02/2018	<b>Lunghezza finestre</b>	20 s
<b>Terreno di misura</b>	Suolo	<b>Tipo di lisciamiento</b>	Triangular window
<b>Accoppiamento suolo strumento</b>	Piedini lunghi	<b>Lisciamiento</b>	10 %
<b>Orientamento dello strumento</b>	Nord	<b>Durata della registrazione</b>	10' 00"
<b>Vincolo stratigrafico</b>	Prove penetrometriche dinamiche, sismica multicanale a onde di superficie		

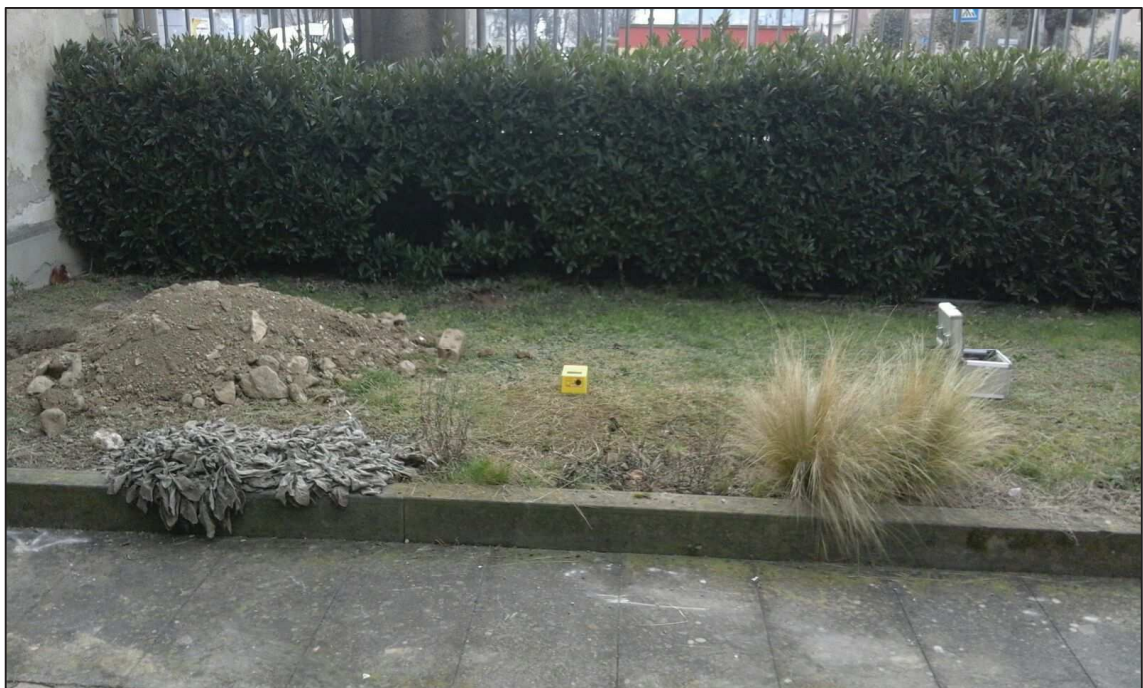


Figura 8 – Esecuzione dell'indagine.

### 3.3.3.2 Analisi della traccia

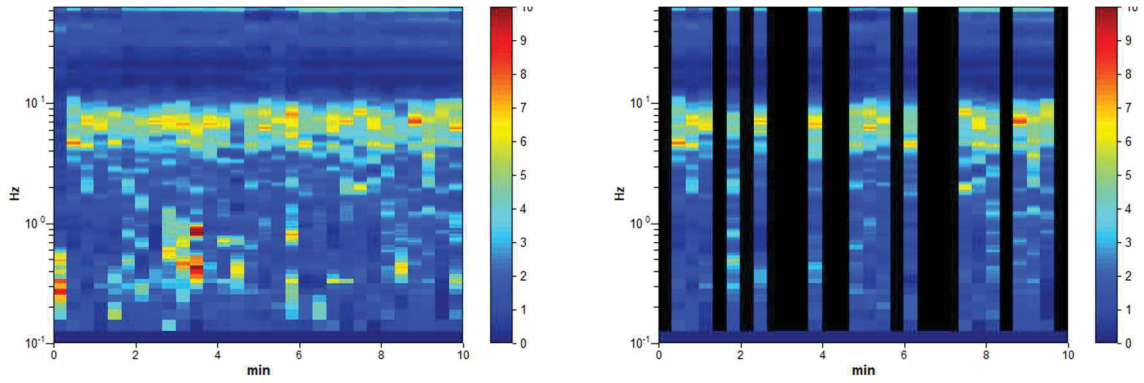


Figura 9 – Serie temporale H/V durante la misura e in seguito alla rimozione dei disturbi.

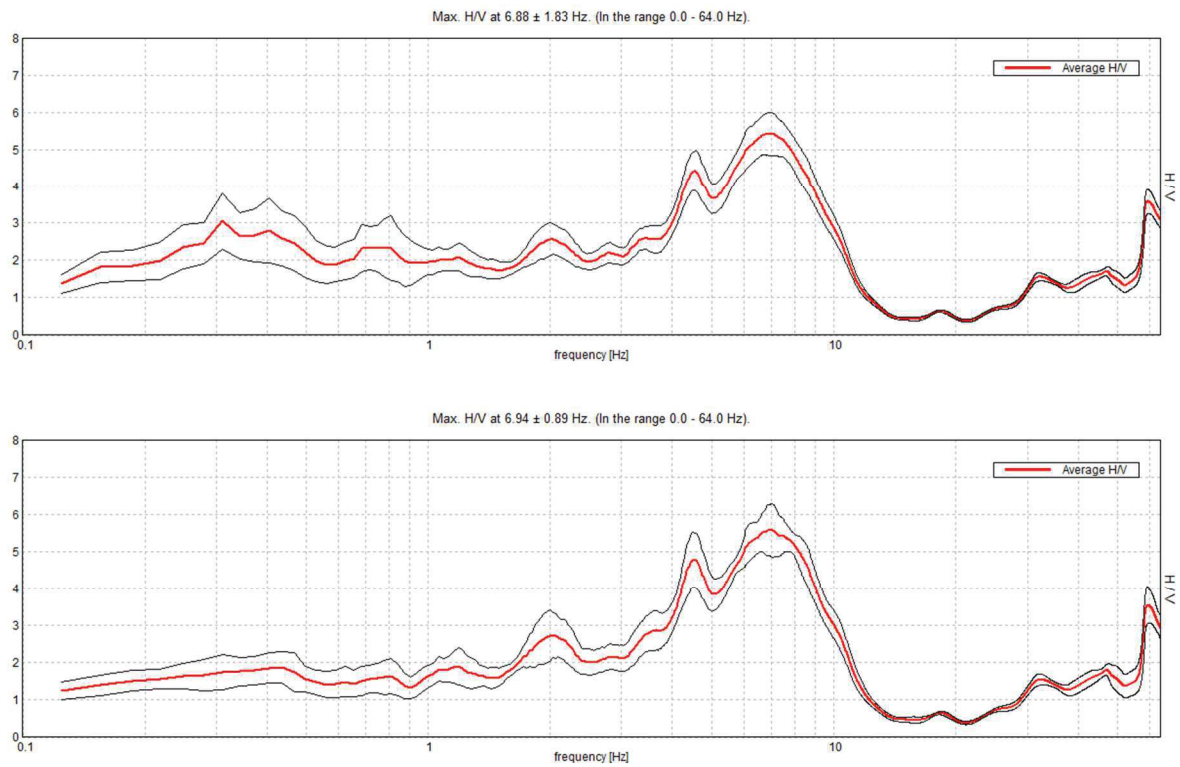


Figura 10 - Curve H/V e deviazione standard prima e dopo la rimozione dei disturbi.

### 3.3.3.3 Modellazione

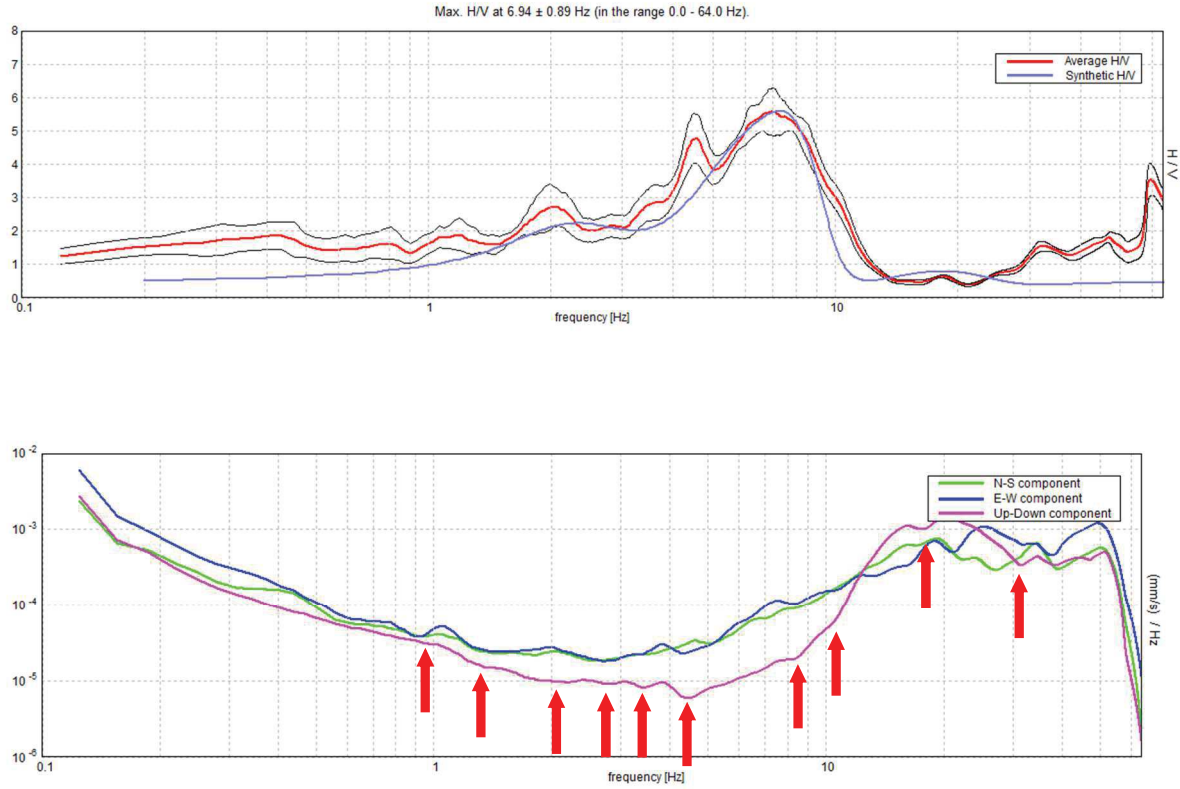
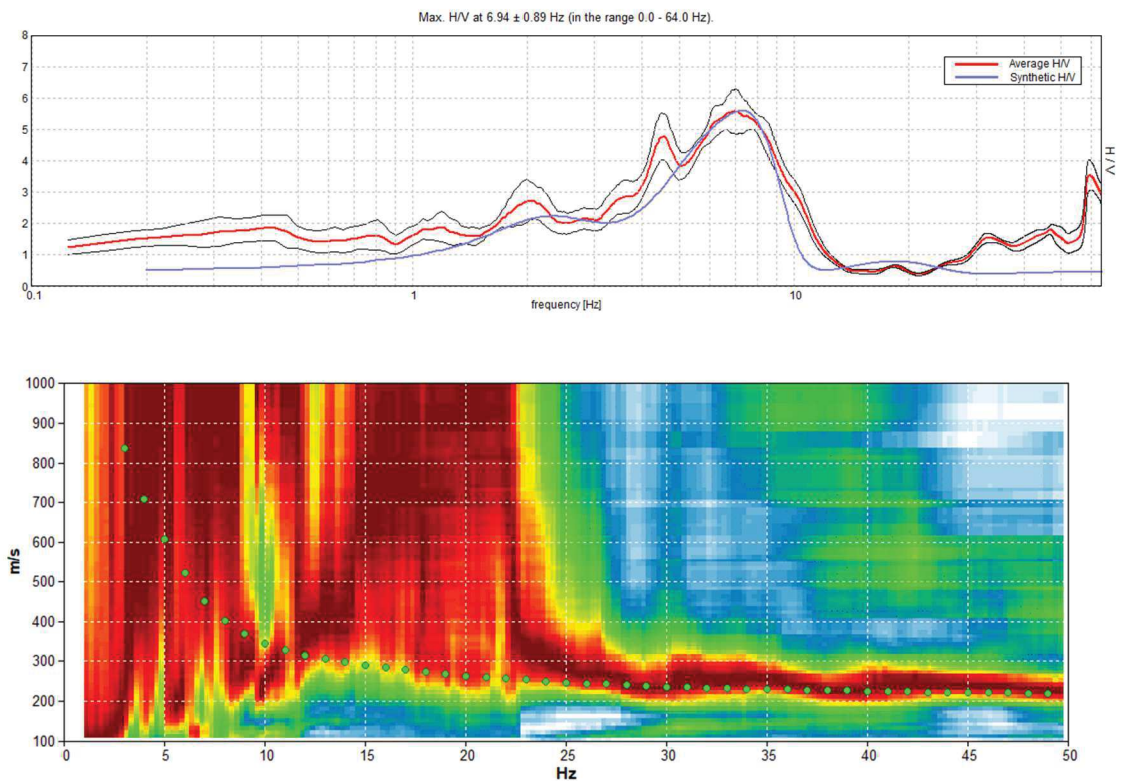


Figura 11 - Dall'alto in basso: curva H/V nella prima immagine; spettri delle singole componenti nella seconda immagine. Le frecce rosse indicano i picchi di origine stratigrafica.

### 3.3.4 Risultati ottenuti

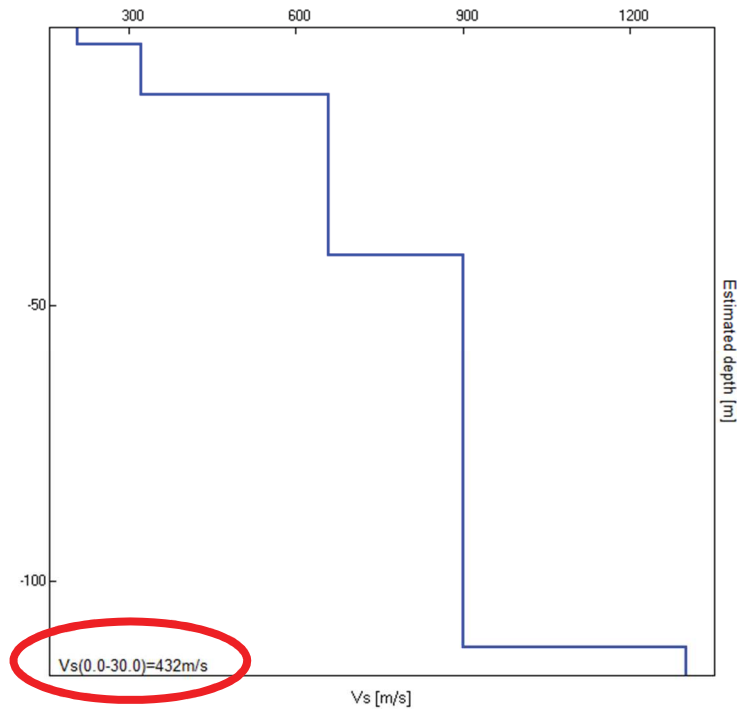
Il profilo sismo - stratigrafico verticale ricavato dall'interpretazione congiunta delle due indagini geofisiche eseguite (H/V + MASW) si caratterizza per la presenza di riflettori piuttosto soffici nei primi 12 m ( $V_s \approx 209$  m/s e 323 m/s). Alla profondità di 41 m la  $V_s$  raggiunge i 900 m/s, passando poi a 1300 m/s a circa 110 m da p.c..

Nel caso in esame lo spettro H/V ha consentito di individuare le frequenze di risonanza del terreno, per le quali si rimanda al capitolo precedente.



*Figura 12 - Interpretazione congiunta delle curve di inversione e H/V.*

Di seguito sono riassunti: il modello sismo stratigrafico del sito, il profilo verticale delle onde S ed il valore di Vs30 riferibili ai primi metri di sottosuolo.



<i>Profondità alla base dello strato [m]</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Vs [m/s]</i>
3,0	3,0	209
12,0	9,0	323
41,0	29,0	660
112,0	71,0	900
∞	∞	1300

Le misure effettuate hanno fornito un valore di Vs30 di 432 m/s. Tale risultato consentirebbe di attribuire il terreno alla categoria sismica B. Tuttavia, considerando i risultati delle altre indagini eseguite in sito, che evidenziano la presenza di substrato roccioso a circa 10 m di profondità, nonché i risultati delle indagini eseguite presso la adiacente scuola, si ritiene più opportuno considerare per il sito in esame una categoria di suolo E.



## **4 CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE**

### ***4.1 Modello geologico del sito***

La diretta osservazione dei terreni affioranti eseguita durante il rilevamento geologico dell'area di intervento, la consultazione della bibliografia disponibile e le ricostruzioni litostratigrafiche derivate dalla campagna geognostica hanno consentito di ipotizzare, relativamente alla porzione di sottosuolo influenzata direttamente o indirettamente dalla costruzione dell'opera, una stratigrafia costituita dalle unità litotecniche descritte di seguito.

#### Livello A.

È costituito verosimilmente dal profilo di alterazione e dal loess superficiale che comprendono limo e argilla. Ha uno spessore compreso tra 2 m e 3 m, si presenta poco consistente e denota una consistente bioturbazione sia vegetale che animale. Il limite con il livello inferiore appare abbastanza netto.

#### Livello B.

Corrisponde con ogni probabilità ai depositi di contatto glaciale che comprendono limi argillosi e diamicton. Il livello si spinge fino a profondità comprese tra 6 e 7 m, si presenta consistente ed il limite con il livello inferiore è abbastanza graduale.

#### Livello C.

Corrisponde con ogni probabilità ai depositi di contatto glaciale che comprendono limi argillosi e diamicton. Lo spessore è variabile ma comunque nell'ordine di 4/5 m. Si presenta molto consistente ed il limite con il livello inferiore è netto.

Livello D.

È costituito dal substrato roccioso arenaceo. Dalle prove effettuate, si è notato come il limite a tetto della formazione sia alquanto irregolare, probabilmente a causa di processi di alterazione e strutturali.

Falda acquifera.

Durante le indagini realizzate non è stata rinvenuta presenza di acquiferi ma è verosimile ipotizzare la presenza di una falda, seppur temporanea, all'interfaccia tra depositi sciolti e substrato roccioso.

## 4.2 Parametri nominali

Alle unità litotecniche descritte precedentemente sono stati assegnati i parametri nominali riportati nella tabella.

Unità litotecniche e classificazione (A.G.I. 1977)	A – poco consistente	B – consistente	C – molto consistente	D - substrato
Limite inferiore (m da p.c.)	2,1 – 3,0	6,0 – 6,6	9,3 – 10,2	-
N <sub>SPT</sub> (-)	3 - 4	10 - 11	20 - 21	73 - 74
Peso di volume naturale (kN/m <sup>3</sup> )	17,0 - 18,0	18,5 – 19,3	18,5 – 19,5	19,0 – 22,0
Densità relativa (%)	10 - 20	25 - 35	40 - 50	45 – 70
Angolo d'attrito (°)	27 - 29	29 - 31	30 – 33	33 – 38
Coesione non drenata (MPa)	0,01 – 0,02	0,04 – 0,08	0,08 – 0,15	0,12 – 0,20
Coesione efficace (MPa)	0,01 – 0,02	0,04 – 0,08	0,05 – 0,10	0,10 – 0,20
Modulo edometrico (MPa)	0,8 – 1,0	3,0 - 5,0	7,0 - 9,0	8,0 – 20,0
Modulo elastico (MPa)	3,0 - 5,0	20,0 - 30,0	50,0 – 70,0	70,0 - 100,0

I parametri geotecnici sono stati ottenuti elaborando i dati delle penetrometrie con correlazioni empiriche note in letteratura; in particolare si è fatto riferimento ai seguenti autori: Terzaghi e Peck, Meyerhof, Mesre et al, Stroud, Farrent, classificazione consistenza delle terre (AGI, 1977).

## 5 ASPETTI GEODINAMICI E SISMICITÀ

### 5.1 Pericolosità sismica di base

#### 5.1.1 Zona sismica

L'ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri 28 aprile 2006 n. 3519, richiamata da Regione Lombardia all'interno della D.G.R. 11 luglio 2014 n. X/2129, ha come oggetto la nuova classificazione sismica del territorio nazionale.

Il territorio italiano è stato diviso in 4 zone a pericolosità sismica decrescente, caratterizzate da quattro diversi valori di accelerazione ( $a_g$ ) orizzontale massima convenzionale su suolo di tipo A, ai quali ancorare lo spettro di risposta elastico.

zona sismica	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [ $a_g/g$ ]	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [ $a_g/g$ ]
1	> 0.25	0.35
2	0.15 – 0.25	0.25
3	0.05 – 0.15	0.15
4	< 0.05	0.05

Figura 13 - Zone sismiche e relativi valori di accelerazione (O.P.C.M. 3519 del 28 aprile 2006).

Il comune di Villongo ricade nella zona sismica 3, a cui corrisponde una accelerazione orizzontale con probabilità di superamento del 10% in 50 anni compresa tra 0,05 e 0,15 ( $a_g/g$ ), che si traduce in una accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico pari a 0,15 ( $a_g/g$ ) riferita a suoli molto rigidi.

### 5.1.2 Pericolosità sismica locale

Secondo la Carta della pericolosità sismica locale, l'area di intervento è compresa nelle zone classificate come Z4a - zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi. Effetti attesi: amplificazioni stratigrafiche. Pertanto è necessario procedere al calcolo del Fattore di amplificazione ed eseguire il confronto con il valore di soglia comunale (secondo livello di approfondimento D.G.R. 30/11/2016 n. IX/2616).

#### 5.1.2.1 Applicazione del secondo livello di normativa

La valutazione eseguita secondo i criteri regionali ha fornito i seguenti risultati:

- scheda litologica: sabbiosa;
- curva (profondità - Vs strato superficiale): n. 2;
- periodo proprio del sito  $T = 0,58$  s;
- $F_a(0,1 - 0,5) = 1,52 + 0,1$ ;
- $F_a(0,5 - 1,5) = 1,35 + 0,1$ .

Vs30	Intervallo	Valori Soglia			
		B	C	D	E
432 m/s (categoria E)	0,1 – 0,5	1,5	1,9	2,3	2,0
	0,5 – 1,5	1,7	2,4	4,3	3,1

I fattori di amplificazione ottenuti, considerando una variabilità di + 0,1 che tiene in conto l'incertezza di tali risultati, risultano inferiori al valore soglia e pertanto la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica e quindi è possibile utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo ottenuta con l'indagine, cioè la E.

## 5.2 *Approccio sito dipendente*

### 5.2.1 Premessa

Con l'entrata in vigore delle NTC08 la stima della pericolosità sismica viene definita mediante un approccio sito dipendente e non più zona dipendente.

Infatti, l'azione sismica di progetto, in base alla quale valutare il rispetto dei diversi stati limite, viene definita partendo dalla "pericolosità sismica di base del sito di costruzione".

La pericolosità sismica in un generico sito deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC08 e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità sono forniti:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC08, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi chiaramente precisati dalle NTC08, per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale.

### 5.2.2 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. La misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata. Le categorie di sottosuolo di riferimento sono indicate nella figura seguente.

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con <math>V_s &gt; 800</math> m/s).</i>

Alla luce di quanto illustrato fin'ora, al sito in esame è stata attribuita la categoria di sottosuolo di riferimento E.

### 5.2.3 Condizioni topografiche

Per la progettazione o la verifica di opere e sistemi geotecnici realizzati su versanti e per l'analisi delle condizioni di stabilità dei pendii, la valutazione dell'amplificazione topografica può essere effettuata mediante analisi di risposta sismica locale o utilizzando il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$ . Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a  $15^\circ$ . Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale, mentre per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione.

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

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Figura 14 - Categorie topografiche e valori del coefficiente  $S_T$ .

Ad ogni categoria topografica è associato un coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$ , in funzione della categoria stessa e dell'ubicazione del sito di studio.

L'area di progetto si trova in un sito pianeggiante. Dunque in questo caso è opportuno considerare la categoria topografica T1. A tale categoria si può associare un fattore  $S_T$  pari a 1,0.



#### 5.2.4 Stima della pericolosità sismica

Le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione, che è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo  $V_R$ , in detto sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato; tale probabilità è denominata “probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ ”.

La pericolosità sismica è definita in termini di:


- accelerazione orizzontale massima  $a_g$  attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale;
- ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

Ai fini delle NTC08 le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  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.

In accordo con le NTC08 la stima della pericolosità sismica, quindi, è basata sulle coordinate geografiche dell'area di intervento e in funzione della vita nominale dell'opera.

### Stati limite

 Classe Edificio  
IV. Funzioni pubbliche o strategiche importanti... ▼

---

 Vita Nominale 50 ▼

 Interpolazione Media ponderata ▼

**CU = 2**

Stato Limite	Tr [anni]	$a_g$ [g]	Fo	$T_c^*$ [s]
Operatività (SLO)	60	0.054	2.397	0.235
Danno (SLD)	101	0.070	2.396	0.252
Salvaguardia vita (SLV)	949	0.168	2.486	0.283
Prevenzione collasso (SLC)	1950	0.211	2.517	0.294
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	100			

Figura 15 - Parametri sismici puntuali per il sito di intervento.

### ***5.3 Risposta sismica e stabilità del sito***

#### ***5.3.1 Accelerazione massima e coefficienti sismici orizzontale e verticale***

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Il moto sismico alla superficie di un sito, associato a ciascuna categoria di sottosuolo, è definito mediante l'accelerazione massima ( $a_{\max}$ ) attesa in superficie ed una forma spettrale ancorata ad essa.

Il valore di  $a_{\max}$  può essere ricavato dalla relazione:

$$a_{\max} = S \cdot a_g$$

dove  $a_g$  è l'accelerazione massima su sito di riferimento rigido ed  $S$  è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente:

$$S = S_T \cdot S_S$$

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per l'accelerazione massima attesa al sito ( $a_{\max}$ ) e per i coefficienti sismici orizzontale ( $k_h$ ) e verticale ( $k_v$ ).

### Coefficienti sismici

Tipo: Stabilità dei pendii e fondazioni

Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti.

H (m): 1      us (m): 0.1

Cat. Sottosuolo: E

Cat. Topografica: T1

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,60	1,60	1,54	1,42
CC Coeff. funz categoria	2,05	2,00	1,91	1,88
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Acc.ne massima attesa al sito [m/s<sup>2</sup>]: 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.017	0.022	0.062	0.084
0.009	0.011	0.031	0.042	
Amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.844	1.093	2.537	2.935
Beta	0.200	0.200	0.240	0.280

### 5.3.2 Stabilità nei confronti della liquefazione

Il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
2. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1 g;
3. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub - orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $qc_{1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $qc_{1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle figure seguenti (dove con  $U_c$  è indicato il coefficiente di uniformità).

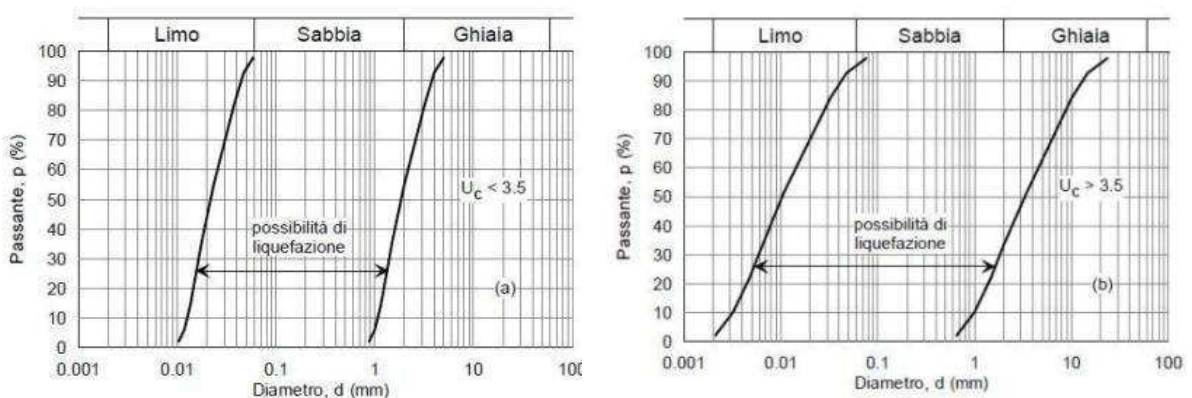


Figura 16 - Fusi granulometrici suscettibili di liquefazione (NTC08).

Nel sito in esame non è stata riscontrata presenza di falde acquifere, dato confermato anche dallo studio geologico comunale. Risulta così soddisfatta la condizione n. 3 dell'elenco precedente.

A favore di sicurezza, tuttavia, la verifica a liquefazione è stata svolta mediante diversi metodi, che richiedono prima la stima di CSR (Rapporto di tensione ciclica, funzione dei parametri del sisma di riferimento) e successivamente il calcolo di CRR (Rapporto di resistenza ciclica, che esprime la resistenza alla liquefazione). Tali verifiche sono correlate ai profili di  $N_{SPT}$  disponibili.

I calcoli hanno fornito valori del fattore di sicurezza FS ( $FS = CRR/CSR$ ) sempre superiori a 1,3, che indicano una possibilità di liquefazione molto bassa.

## 6 CONCLUSIONI

Su incarico della committenza è stata eseguita la presente indagine geofisica sui terreni ubicati in Via Roma nel comune di Villongo (BG).

Per quanto riguarda i risultati ottenuti e le conseguenti indicazioni tecniche si rimanda ai relativi capitoli.

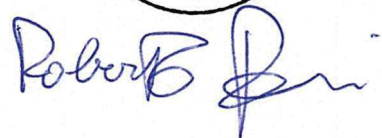
Lo scrivente si dichiara disponibile per eventuali chiarimenti e sopralluoghi che dovessero rendersi necessari.

Cologno al Serio, Marzo 2018

Dott. Geol. Roberto Pagani

Iscritto all'Ordine dei Geologi della Lombardia al n. 1664





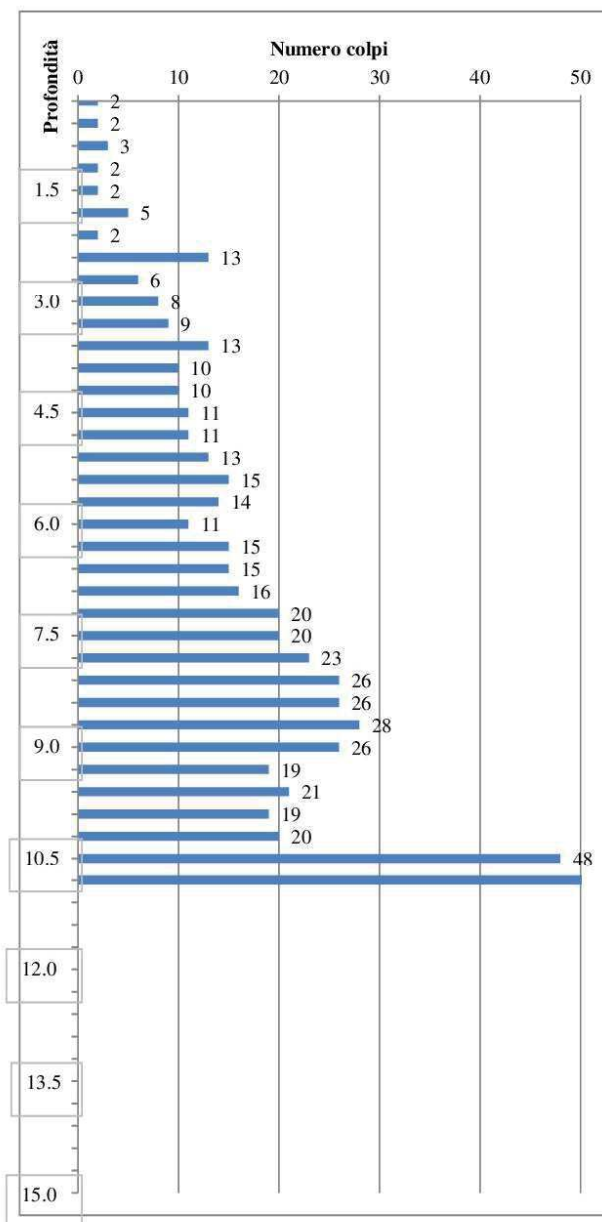
## 7 BIBLIOGRAFIA

- Carraro M., 2014. Componente geologica, idrogeologica e sismica del territorio comunale - Studio geologico comunale – L.R. 11/03/2005 - D.G.R. 2616/2011. 70 pp, 9 tavole. Amministrazione Comunale di Villongo.
- Castellaro S., 2016. The complementarity of H/V and dispersion curves. 16 pp. Geophysics, Vol. 81, No. 6 (November-December 2016).
- Forcella F. & Jadoul F., Eds., 2000. Carta geologica della Provincia di Bergamo alla scala 1:50.000 con relativa nota illustrativa. 300 pp, 3 fogli geologici. Monti Ed., Bergamo.
- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Servizio Geologico d'Italia, 2012. Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 con relativa nota illustrativa: Foglio 098 Bergamo. 298 pp, 1 foglio geologico. Regione Lombardia - Progetto CARG, Milano.
- Repertorio cartografico del Geoportale della Regione Lombardia, [www.cartografia.regione.lombardia.it](http://www.cartografia.regione.lombardia.it).
- Repertorio cartografico di Google Maps, [www.maps.google.it](http://www.maps.google.it).
- Repertorio cartografico del Siter@ della Provincia di Bergamo, [www.siter.provincia.bergamo.it](http://www.siter.provincia.bergamo.it).
- Tanzini M., 2009. Fondazioni. Caratterizzazione geotecnica. Verifiche geotecniche. Dimensionamento. 534 pp. Dario Flaccovio Editore, Palermo.



<b>Data</b>	28/02/2018	<b>Committente</b>	Comune di Villongo
<b>Località</b>	Villongo	<b>Codice prova</b>	1
<b>Operatore</b>	SGB Perforazioni s.r.l.		
<b>Aste bagnate (m da p.c.)</b>	No		

Profondità	Colpi
0.3	2
0.6	2
0.9	3
1.2	2
1.5	2
1.8	5
2.1	2
2.4	13
2.7	6
3.0	8
3.3	9
3.6	13
3.9	10
4.2	10
4.5	11
4.8	11
5.1	13
5.4	15
5.7	14
6.0	11
6.3	15
6.6	15
6.9	16
7.2	20
7.5	20
7.8	23
8.1	26
8.4	26
8.7	28
9.0	26
9.3	19
9.6	21
9.9	19
10.2	20
10.5	48
10.8	100
11.1	
11.4	
11.7	
12.0	
12.3	
12.6	
12.9	
13.2	



<b>Data</b>	28/02/2018	<b>Committente</b>	Comune di Villongo
<b>Località</b>	Villongo		
<b>Operatore</b>	SGB Perforazioni s.r.l.	<b>Codice prova</b>	2
<b>Aste bagnate (m da p.c.)</b>	No		

Profondità	Colpi
0.3	1
0.6	7
0.9	2
1.2	2
1.5	4
1.8	5
2.1	7
2.4	5
2.7	3
3.0	4
3.3	9
3.6	7
3.9	8
4.2	9
4.5	7
4.8	12
5.1	11
5.4	13
5.7	13
6.0	11
6.3	14
6.6	11
6.9	17
7.2	15
7.5	19
7.8	20
8.1	22
8.4	20
8.7	19
9.0	23
9.3	30
9.6	50
9.9	100
10.2	
10.5	
10.8	
11.1	
11.4	
11.7	
12.0	
12.3	
12.6	
12.9	
13.2	

