

# COMUNE DI BOLOGNA

REGIONE EMILIA-ROMAGNA

PROVINCIA DI BOLOGNA

***Determinazione della categoria di suolo di fondazione eseguita sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio  $S$  entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ) dei terreni costituenti l'area sita nel parco urbano dei Giardini Margherita dove sorge la palazzina di viale Drusiani.***



I.G.B. Snc

Via della Tecnica 57/A4

40068 San Lazzaro di Savena (BO)

Tel 0516255377 – Cell 349 7846581

Fax 0514998378

E-mail [igbsnc@gmail.com](mailto:igbsnc@gmail.com)

P.I. e C.F.: 02689571202



Committente: **COMUNE DI BOLOGNA**

Dott. Geol. Stefano Maggi

Novembre 2011

Commessa 86.2011



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

## **SOMMARIO.....**

2	IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO .....	3
3	PREMESSE.....	4
4	DESCRIZIONE DELLE INDAGINI.....	5
4.1	Introduzione generale .....	5
4.2	Tecnica MASW : procedura e strumentazione utilizzata.....	7
4.3	Misura a stazione singola H/V: procedura e strumentazione utilizzata.....	8
5	ACQUISIZIONE DATI .....	9
6	RISULTATI: MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO .....	10



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

## 2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO

- ☐ Il presente documento viene identificato con il numero **86.2011** rev. n° 1;
- ☐ Le indagini ed il lavoro svolto sono stati coordinati dal Dott. Geol. **Stefano Maggi**;
- ☐ Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. **Stefano Maggi** in data **08/11/2011**;
- ☐ Il documento si compone di n° 11 fogli e da n° 8 pagine di allegati.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

### 3 PREMESSE

Su incarico del Comune di Bologna, presso l'area sita all'interno del parco urbano dei Giardini Margherita, in data 08/11/2011, è stata effettuata un'indagine geofisica mediante prova in array con tecnica *MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)* e misura a stazione singola con tecnica *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)*, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani che sarà destinata a scuola per l'infanzia. L'indagine è stata eseguita al fine di ottenere la classificazione del tipo di suolo presente nel sito, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio verticali ( $V_s$ ) entro i primi 30 m di profondità, in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" (pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n. 30).

La presente indagine geofisica è consistita nell'esecuzione di

- N. 1 profilo sismico in array con tecnica MASW;
- N. 1 misura stazione singola con tecnica H/V (HVSR).

Per quanto riguarda la prova in array l'acquisizione è stata effettuata mediante sismografo digitale modello Dolang 24 canali 24 bit. La misura a stazione singola è stata eseguita con tromografo digitale modello Tromino® Engy.

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è "GRILLA"© Release 2010 ver. 6.0 beta (All rights reserved).

Nella Tav.1 in allegato si riporta l'ubicazione delle prove eseguite.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

## 4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

### 4.1 Introduzione generale

La tecnica *MASW* venne introdotta per la prima volta nell'ambito della comunità geofisica e geotecnica agli inizi del 1999. La *Multichannel Analysis of Surface Waves* è un metodo sismico mediante il quale è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) in relazione alla profondità ( $V_s$  *versus* *profondità*), attraverso l'analisi delle onde superficiali tipo Rayleigh (onde *R*). Tale tecnica permette quindi di ottemperare a quanto previsto nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", secondo il quale i terreni, su cui devono essere eseguite opere edili di una certa rilevanza, devono essere classificati sulla base del parametro  $V_{s30}$ . La classificazione prevista per i terreni comprende cinque categorie definite da una simbologia alfanumerica da *A* ad *E* e successive integrazioni *S1* e *S2*. A ciascuna di queste categorie corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. Il parametro  $V_{s30}$  rappresenta la media ponderata dei valori di velocità delle onde di taglio

$V_{s30}$  nei primi 30 metri di sottosuolo indagato e viene espressa matematicamente dalla seguente equazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}$$

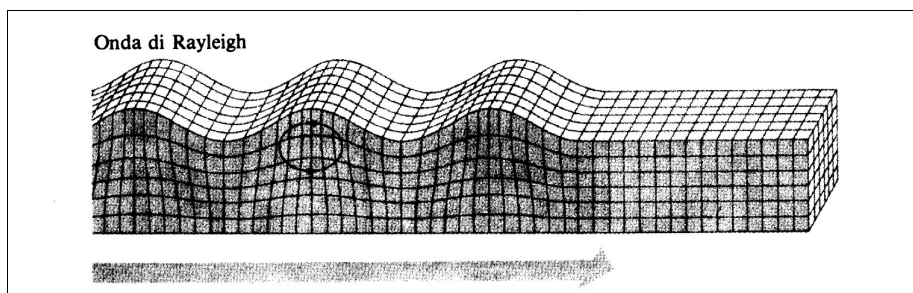
dove  $V_{s30}$  : velocità media ponderata delle onde di taglio "S";  
 $h_i$  : spessore dello strato *i*-esimo;  
 $v_i$  : velocità delle onde di taglio "S" nello strato *i*-esimo.

Esistono diversi tipi di onde superficiali, oltre alle già citate onde di *Rayleigh* ( $P+S_v$ ), si conoscono le onde di *Love* ( $Sh$ ) e le onde di *Lamb*. Le onde di *Rayleigh* rappresentano la componente principale delle onde superficiali e sono generate dall'interazione tra onde di compressione (o di volume) *P* e onde di taglio verticali  $S_v$  ogniquale si è in presenza di una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Le onde *R* si propagano alla superficie libera (vedi Fig. 1) con un moto ellittico retrogrado (moto antiorario) che si inverte alla profondità di  $\lambda/2\pi$  (dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda). L'ampiezza di tale spostamento decresce secondo una legge esponenziale, pertanto diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

L'utilizzo delle onde superficiali di tipo *Rayleigh* per la costruzione di un profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  è giustificato da una serie di fattori:

- La percentuale di energia convertita in onde *R* è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde *P* (7%) e onde *S* (26%);

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.



**Figura 1 - Modalità di propagazione delle onde R**

- ❑ il metodo d'analisi basato sulle onde *R* non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- ❑ buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;
- ❑ la propagazione delle onde di *Rayleigh*, anche se influenzata dalla  $V_p$  (velocità delle onde di compressione  $P$ ) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della  $V_s$  che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

Tenuto conto dei fattori sopraelencati, l'elemento fondamentale che permette l'impiego di tecniche basate sulle onde superficiali, in questo caso la tecnica *MASW* e le onde *Rayleigh*, è una caratteristica chiamata *dispersione*. La dispersione è una proprietà delle onde superficiali che consiste nella deformazione di un treno d'onde dovuta alla variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza. Per le onde *R* questa variazione si manifesta solo all'interno di un mezzo stratificato. In altre parole, ipotizzando una variazione di densità del terreno in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda  $\lambda$  (e quindi per una certa frequenza  $\nu$ ) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di  $\lambda/2$  (anche se recenti studi hanno posto questo limite a  $\lambda/2.5$ ). Inoltre, la velocità delle onde *R* ( $V_r$ ) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ).

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di *Rayleigh*, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

#### 4.2 Tecnica MASW : procedura e strumentazione utilizzata

La procedura MASW si può sintetizzare in tre stadi successivi e distinti:

- ❑ acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);
- ❑ costruzione della curva di dispersione : grafico velocità di fase  $V_r$  – frequenza  $\nu$ ;
- ❑ inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale della  $V_s$ .

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, quale generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi Fig. 2). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la strumentazione DOLANG JEA 24 descritta nelle premesse.

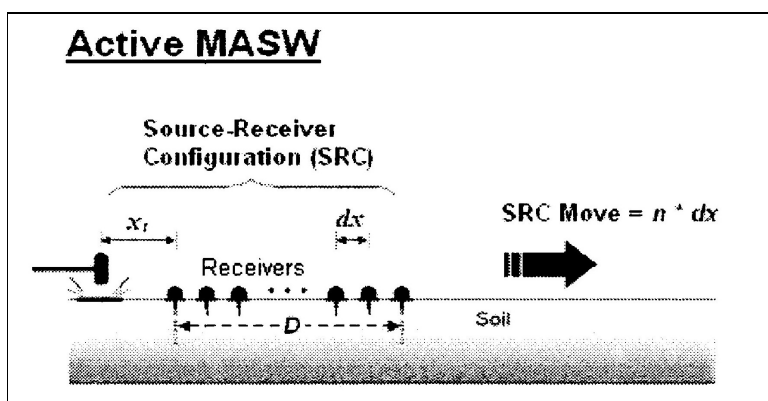


Figura 2 - MASW : stendimento lineare e sorgente attiva

Mediante il software si procede alla lettura dei dati acquisiti (*common-shot gather*) e al calcolo dello spettro nel dominio frequenza – numero d'onda (spettro f-k). Quindi, dallo spettro f-k è possibile estrarre la curva di dispersione apparente sperimentale (si veda fig. 2 nel rapporto in allegato) mediante una doppia trasformata di Fourier applicata al campo di moto misurato nel dominio spazio - tempo.

L'ultimo passo da affrontare è l'inversione della curva di dispersione precedentemente costruita. Questa operazione viene effettuata grazie all'utilizzo di una potente tecnica di ottimizzazione basata su algoritmi genetici. Il risultato finale è quello di ottenere il profilo verticale della velocità delle onde di taglio  $V_s$ . L'elaborazione dei dati acquisiti, avvenuta mediante software Grilla, è riportata in dettaglio nel rapporto d'indagine allegato alla presente relazione



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

#### **4.3 Misura a stazione singola H/V: procedura e strumentazione utilizzata**

Il metodo *HVSR* (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) proposto da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente modificato da Nakamura (1989), si basa sull'analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del rumore sismico registrato in un sito. Il rumore sismico è presente ovunque ed è generato sia da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) che dall'attività antropica. Il rumore sismico è indicato spesso come microtremore poiché è caratterizzato da oscillazioni molto deboli (dell'ordine dei  $\mu\text{m/s}$ ). I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma soprattutto da onde superficiali, la cui velocità è comunque prossima a quella delle onde S (Mulargia et al., 2007). La tecnica di misura del rumore sismico richiede tempi di registrazione pari a 15-20 minuti e necessita di sensori tridirezionali da sismologia con messa in bolla, digitalizzatore 24 bit con elevata dinamica, elevato guadagno ed elevata frequenza di campionamento nativo, con minimizzazione del rumore elettro/meccanico.

L'acquisizione è stata eseguita utilizzando un tromografo digitale, "TROMINO ENGY" (*Micromed S.p.A.*) dotato di 3 canali velocimetrici (N-S, E-W, Up-Down) ad alto guadagno per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a  $\sim 1.5 \text{ mm/s}$ ); il sistema opera nell'intervallo di frequenze 0.1–1024 Hz. E' stata acquisita una misura di rumore sismico per un tempo di registrazione pari a 16 minuti. L'elaborazione dei dati di rumore sismico acquisiti è avvenuta mediante software *Grilla*.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

## 5 ACQUISIZIONE DATI

I parametri di campionamento utilizzati nella presente indagine e la geometria del profilo sono riportati di seguito.

Identificazione	Modello sismografo	Apertura stendimento	n° geofoni verticali (4.5 Hz)	sorgente	Distanza intergeofonica	Frequenza di campionamento
Profilo masw in array	Digitale Dolang 24 bit	33.00 m	12	Mazza 10 Kg	3.00 m	4000 Hz

**Tabella 1 - Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata e parametri di acquisizione (metodo in array MASW).**

Identificazione	Modello tromografo	Canali velocimetrici	sorgente	Frequenza di campionamento	Lunghezza registrazione	Ampiezza finestra di analisi
HVSR	Tromino® Engy	N-S;E-W UP-DOWN	Rumore ambientale	128 Hz	16 min	20 sec

**Tabella 2 - Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata e parametri di acquisizione (metodo a stazione singola H/V)**

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

## 6 RISULTATI: MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO

Nella sottostante tabella è riportato il modello di sottosuolo proposto, ottenuto mediante fit congiunto prova masw in array e misura HVSR (si veda rapporto in allegato).

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	140
3.00	2.00	176
6.00	3.00	210
10.00	4.00	240
25.00	15.00	385
40.00	15.00	410
75.00	35.00	550
135.00	60.00	600
inf.	inf.	840

**Tabella 3 – Profilo verticale delle onde di taglio S relativo al modello di sottosuolo ottenuto da fit congiunto prova MASW in array e misura HVSR.**

Sulla base di quanto riportato in tabella, la Categoria di suolo determinata unicamente sulla base dei risultati delle prove geofisiche descritte (media ponderata della velocità equivalente di propagazione delle onde S entro i primi 30 m di profondità) secondo approccio semplificato da NTC 2008 è risultata:

- **da quota p.c. su cui è stato eseguito il profilo: “C” ( $V_{s30} = 298$  m/s)**

L'incertezza sul valore calcolato di  $V_{s30}$  è dell'ordine del 20% (cfr. Mulargia e Castellaro, 2009, Seism. Res. Lett., 80, 985-989). La categoria di suolo così determinata dovrà essere comunque valutata e verificata dal tecnico progettista sulla base dei dati e delle informazioni di carattere litostratigrafico ottenute mediante le indagini geognostiche eseguite.

I valori di velocità delle onde di taglio S, secondo il modello di sottosuolo proposto dallo scrivente, sono normalmente crescenti con la profondità, e presentano valori caratteristici di materiali da mediamente addensati/consistenti a compatti e molto compatti.

La misura HVSR effettuata non ha messo in evidenza amplificazioni significative del moto del suolo (risonanza) per l'intero range di frequenze analizzato (0-64 Hz). Nel complesso, le variazioni dalla planarità della curva HVSR sono legate alla stratificazione/fratturazione naturale del sottosuolo.

In fase di progettazione sarà compito del tecnico progettista confrontare il periodo fondamentale di vibrazione dell'edificio oggetto d'intervento, con la curva HVSR sopra descritta. Questo confronto è

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

determinante al fine di evitare il fenomeno di doppia risonanza terreno-struttura.

La normativa applicata nel presente lavoro è il DM 14 gennaio 2008.

San Lazzaro di Savena (BO), 11/11/2011



## **ALLEGATI**

- ☐ Rapporto indagine geofisica (n°8)



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

# Rapporto indagine geofisica eseguita per la determinazione del parametro $V_{s30}$ mediante tecnica masw e misura a stazione singola H/V

**Autore: I.G.B. SNC**

**Committente: COMUNE DI BOLOGNA**

**Sito: NUOVA SCUOLA PER L'INFANZIA**

**RECUPERO FUNZIONALE PALAZZINA DRUSIANI**

**PARCO URBANO GIARDINI MARHERITA**

**Data di effettuazione: 08/11/2011**

Software utilizzato: Grilla® (Release 2010 – ver. 6.0 beta) all rights reserved.

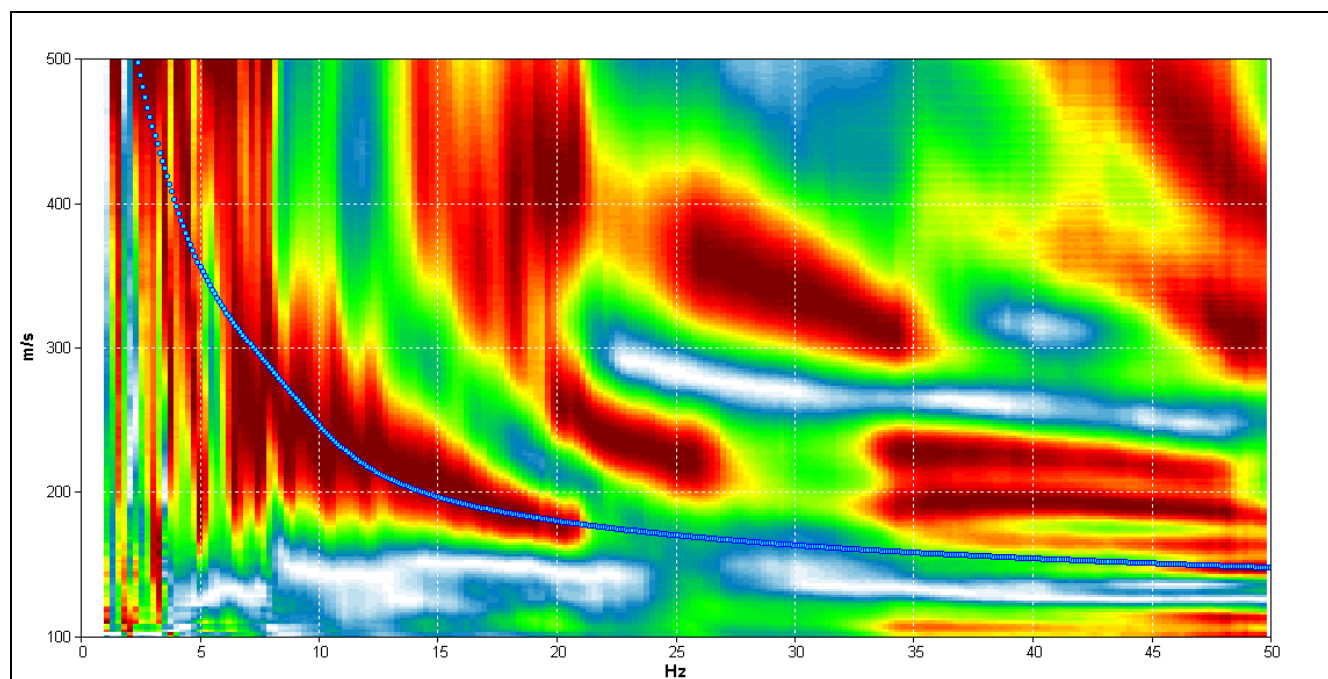
**IGB Snc via della Tecnica 57/A4 - 40068 San Lazzaro di Savena (BO)**

**Tel 051 6255377 - Fax 051 4998378 - Cell 349 7846581 - E-mail [igbsnc@gmail.com](mailto:igbsnc@gmail.com)**

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

## 1 – Dati sperimentali tecnica MASW e risultati ottenuti

Strumentazione utilizzata.....Sismografo digitale 24 canali – 24 bit modello Dolang  
 Numero di geofoni verticali (frq. Propria 4.5 Hz).....12  
 Spaziatura tra i geofoni.....3.00 m  
 Frequenza di campionamento.....4000 Hz  
 Lunghezza traccia acquisita.....1 sec  
 Sorgente.....mazza (10 Kg)



**Figura 1 - Spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per il profilo sismico eseguito in array con tecnica MASW mediante sismografo digitale Dolang (energizzazione ottenuta mediante mazza battente del peso di 10Kg). In blu il modo fondamentale della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito. Lo scrivente ritiene che il limite inferiore di leggibilità della curva sia intorno alla frequenza di circa 7-8 Hz, corrispondente ad una profondità compresa tra circa 10 e 15 m da p.c. Per profondità maggiori (frequenze minori) è stata analizzata la curva HVSr mostrata nelle figure seguenti.**

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

## 2 –Dati sperimentali misura HVSR e risultati

Strumento: TROMINO MODELLO ENGY

Start recording: 08/11/11 11:01:35 End recording: 08/11/11 11:17:36

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h16'00".

Analyzed 65% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

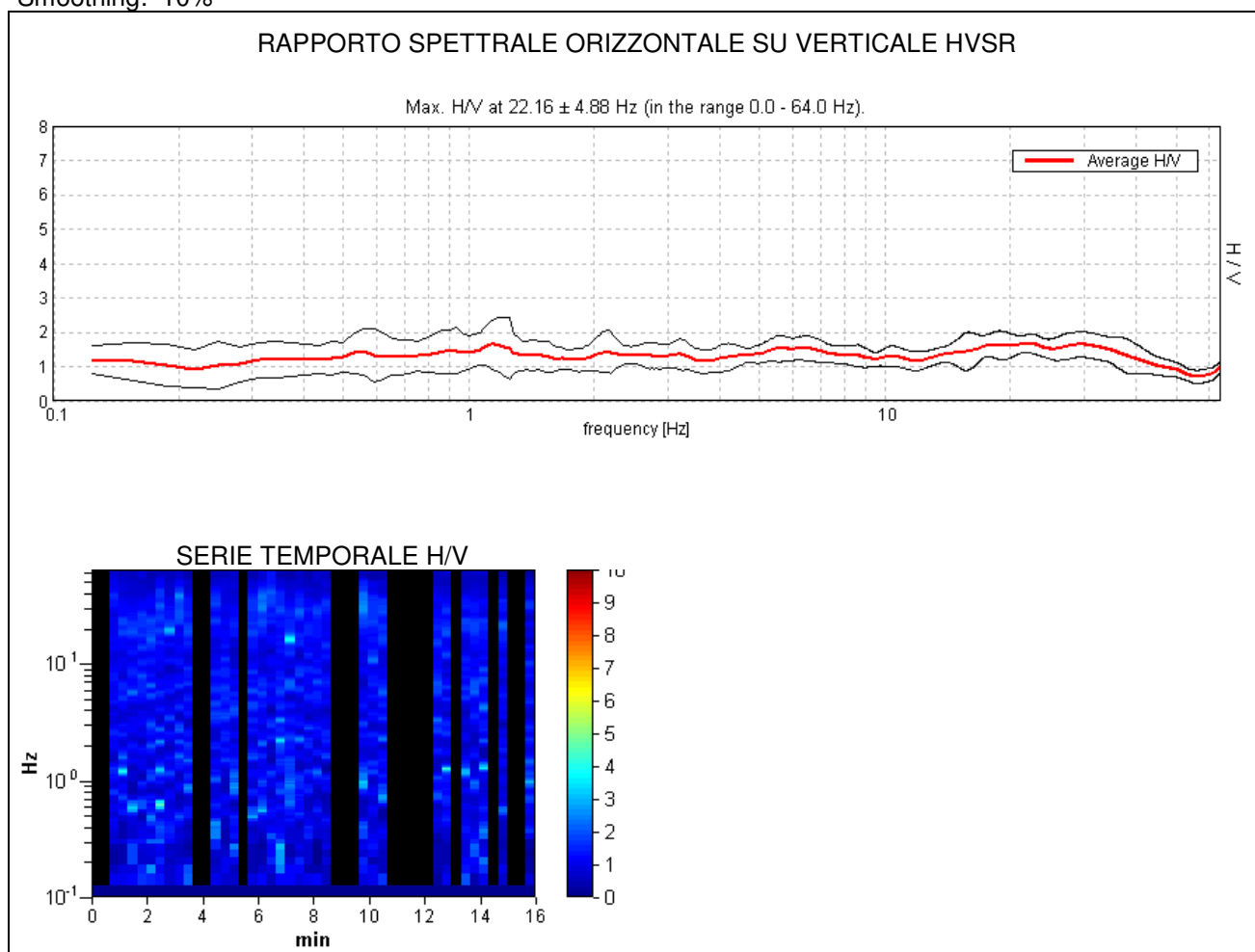


Figura 2 – Curva H/V (HVSR) registrata nel sito in esame e serie temporale considerata nell'analisi.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI HVSR

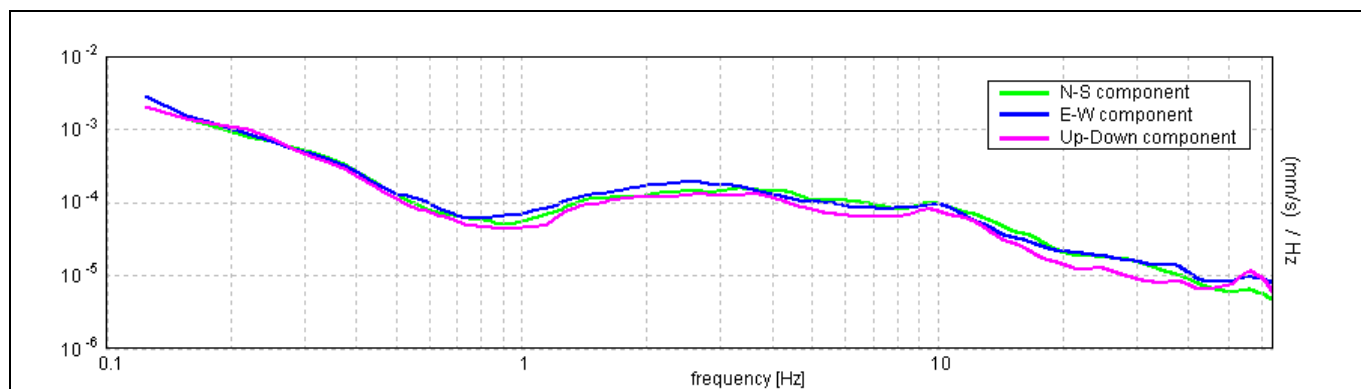


Figura 3 – spettri delle 3 componenti del moto in velocità registrate nel sito (HVSR)

### H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

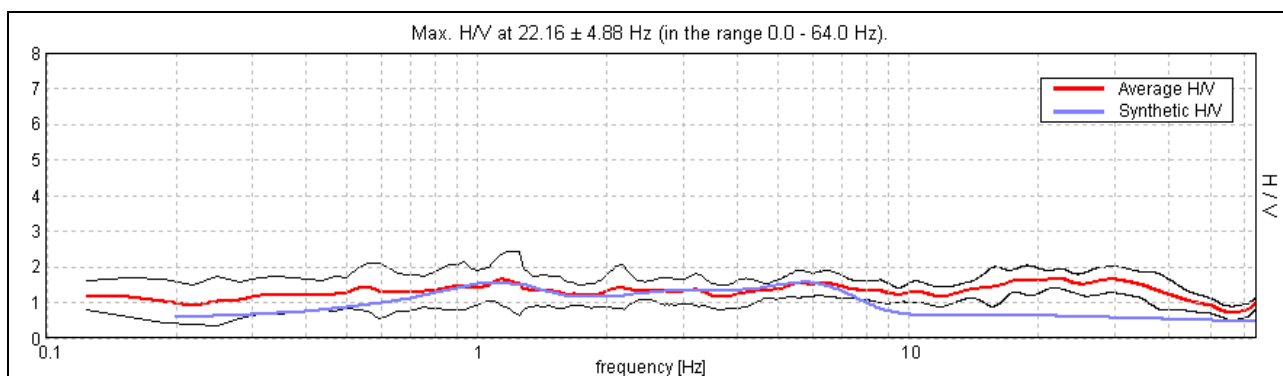


Figura 4 – confronto tra curva HVSR sperimentale (rosso) registrata nel sito e curva teorica (blu) relativa al modello di sottosuolo proposto per il sito.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

### 3 – Modello di sottosuolo ottenuto da fit congiunto prova in array (masw) e misura HVSr

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	140
3.00	2.00	176
6.00	3.00	210
10.00	4.00	240
25.00	15.00	385
40.00	15.00	410
75.00	35.00	550
135.00	60.00	600
inf.	inf.	840

$V_{s(0.0-30.0)}=298$  m/s (misurata da p.c. su cui è stato eseguito lo stendimento sismico)

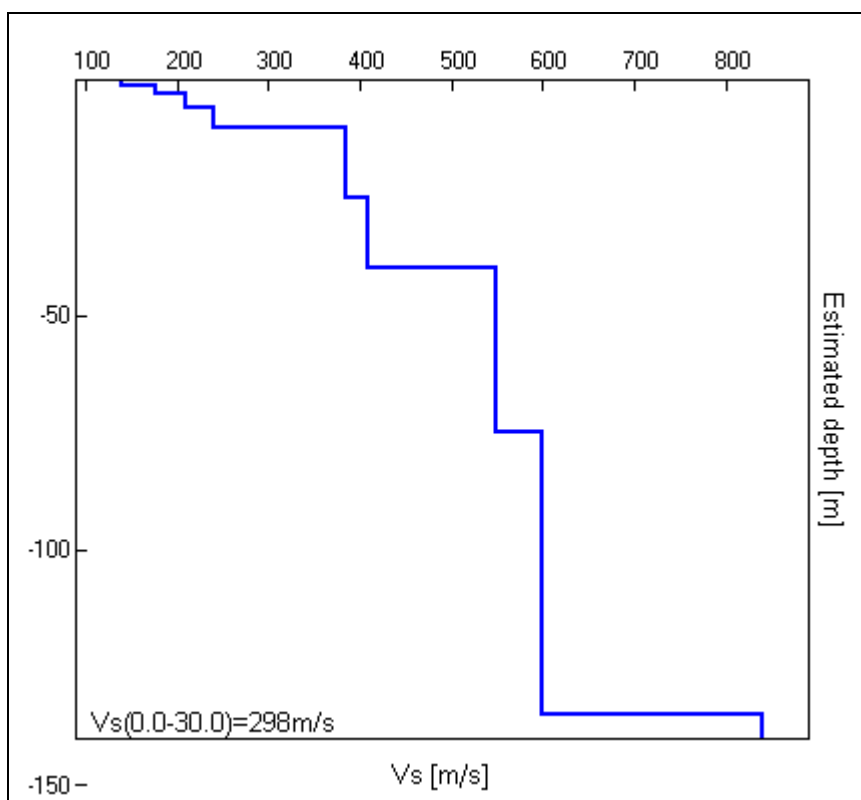


Figura 5 - Modello di velocità delle onde di taglio S (modello medio sotto il profilo effettuato) derivato da fit congiunto tecnica masw e tecnica H/V



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

## 4 – Risultati finali

L'analisi congiunta MASW-HVSr ha permesso sia di ricostruire il profilo verticale di velocità delle onde S nel sito in esame, sia di individuare la presenza di contrasti di impedenza-rigidezza nel sottosuolo medesimo.

$V_{s30}$  [m/s] da quota piano campagna su cui è stato eseguito il profilo.....**298**

L'incertezza sul valore calcolato di  $V_{s30}$  è dell'ordine del 20% (cfr. Mulargia e Castellano, 2009, Seism. Res. Lett., 80, 985-989).

**Categoria di suolo determinata unicamente sulla base dei risultati delle prove geofisiche descritte (media ponderata della velocità equivalente di propagazione delle onde S entro i primi 30 m di profondità) secondo approccio semplificato da NTC 2008:**

- **da quota p.c. su cui è stato eseguito il profilo: C**

La categoria di suolo così determinata dovrà essere comunque valutata e verificata dal tecnico progettista sulla base dei dati e delle informazioni di carattere litostratigrafico ottenute mediante le indagini geognostiche eseguite.

I valori di velocità delle onde di taglio S, secondo il modello di sottosuolo proposto dallo scrivente, sono normalmente crescenti con la profondità, e presentano valori caratteristici di materiali da mediamente addensati/consistenti a compatti e molto compatti.

La misura HVSr effettuata non ha messo in evidenza amplificazioni significative del moto del suolo (risonanza) per l'intero range di frequenze analizzato (0-64 Hz). Nel complesso, le variazioni dalla planarità della curva HVSr sono legate alla stratificazione/fratturazione naturale del sottosuolo.

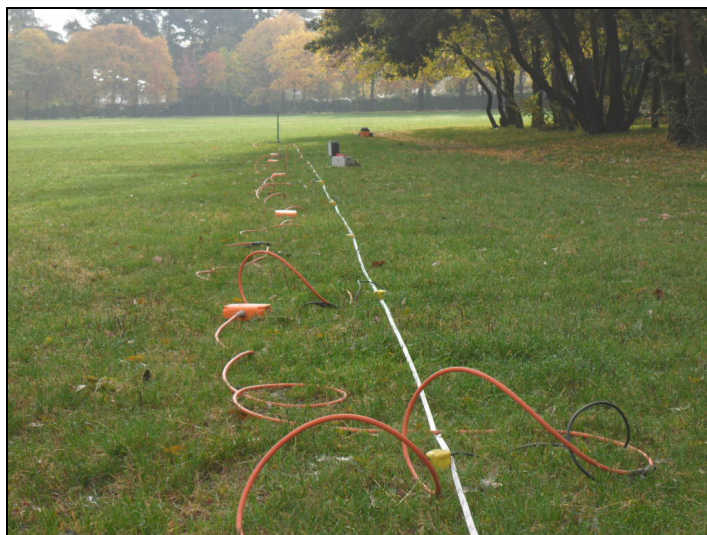
In fase di progettazione sarà compito del tecnico progettista confrontare il periodo fondamentale di vibrazione dell'edificio oggetto d'intervento, con la curva HVSr sopra descritta. Questo confronto è determinante al fine di evitare il fenomeno di doppia risonanza terreno-struttura.

La normativa applicata nel presente lavoro è il DM 14 gennaio 2008.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

## 5 – Documentazione fotografica



**Foto 1 – profilo masw in array**



**Foto 2 – misura a stazione singola HVSr**

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), dell'area sita presso il parco urbano dei Giardini Margherita, nel comune di Bologna, a corredo del progetto di recupero funzionale della palazzina di viale Drusiani da destinare a nuova scuola per l'infanzia.

---

## Appendice

### Categorie di suolo

**Tipo A:** Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.

**Tipo B:** Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti 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  $NSPT_{30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

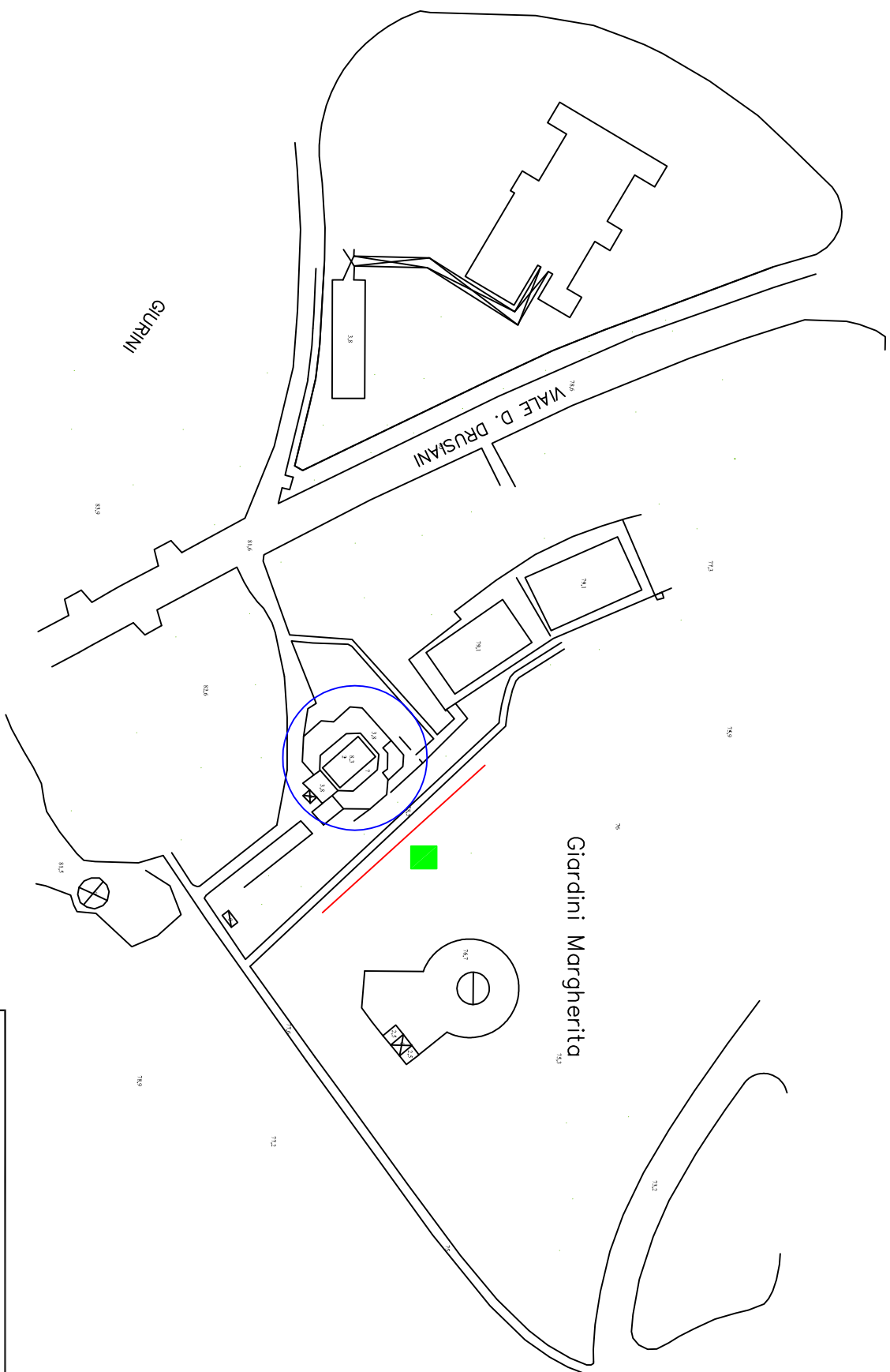
**Tipo C:** Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < NSPT_{30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo D:** Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  inferiori a 180 m/s (ovvero  $NSPT_{30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo E:** Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con  $V_s > 800$  m/s).

**Tipo S1:** Depositati di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s,30}$  inferiori a 100 m/s (ovvero  $10 < c_{u,30} < 20$  kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.

**Tipo S2:** Depositati di terreno liquefacibile o argille sensitive o altri profili di terreno non inclusi nei tipi A, B, C, D, E o S1. Attenzione: la nuova norma classifica come S2 una serie di siti che prima erano classificati come B, C, D, E.



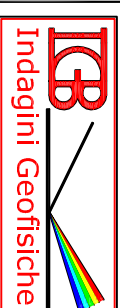
# Legenda

Profilo sismico in array eseguito con tecnica MASW



Area edificio oggetto d'intervento

Misura a stazione singola HVSR utilizzata per il fit  
congiunto con misura in array



TAV. 1  
Ubicazione Indagini

PR.: 086.2011	Comittente: Comune Bologna	Planimetria generale
Novembre 2011		