

Studio Tecnico Associato di Consulenze di Geologia e Ambiente del Dott. Geol. F. Barbieri e del Dott. Geol. M. Ropa

Via E. Fermi n° 11/A – 40017 SAN GIOVANNI IN PERSICETO (BO) Tel. +39 051 6871113 FAX +39 051 6874328

C.F. e Partita IVA 04112290376

Email: cgastudio@cgastudio.eu

PEC: cgastudio@pec.cgastudio.eu

Committente:	Comune di Bologna
Titolo:	Relazione geologica, sismica e geotecnica preliminare
Località:	Scuole Avogli - Via Saragozza 238
Comune:	Bologna (BO)
Data:	1 febbraio 2022
Codice Lavoro:	A 1608 - GF 816

Relazione geologica, sismica e geotecnica preliminare per le scuole Avogli in Via Saragozza n. 238
nel Comune di Bologna (BO)

I Geologi :





INDICE

INDICE.....	2
INTRODUZIONE.....	5
DESCRIZIONE GENERALE DEL SITO	6
CAMPAGNA GEOGNOSTICA.....	7
INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW.....	7
<i>MASW - metodologia d'indagine.....</i>	<i>7</i>
Modalità esecutive.....	7
<i>MASW - prove eseguite.....</i>	<i>9</i>
<i>MASW - procedure e codici di calcolo.....</i>	<i>9</i>
Analisi delle immagini di dispersione.....	9
Interpretazione.....	9
INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA HVSR.....	11
<i>HVSR - metodologia d'indagine</i>	<i>11</i>
<i>HVSR - prove eseguite</i>	<i>11</i>
<i>HVSR - procedure e codici di calcolo</i>	<i>11</i>
MODELLO GEOLOGICO	13
A) CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA DEL SITO	13
<i>Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico – Autorità del Bacino del Reno.....</i>	<i>13</i>
B) CARATTERIZZAZIONE MICROSISMICA DEL SITO.....	14
<i>Prova sismica MASW L1 – Presentazione risultati.....</i>	<i>14</i>
Sismostratigrafia.....	14
V _s equivalente	14
Proprietà geofisiche dei terreni	15
Determinazione delle categorie di suolo di fondazione	15
<i>Prova Sismica HVSR – Presentazione dei risultati</i>	<i>16</i>
Verifiche SESAME	16
Sismostratigrafia.....	16
Frequenza caratteristica di sito f ₁	16
Frequenza caratteristica di sito f ₀	16
Ampiezza del picco H/V.....	17
Profondità bedrock sismico	17
D) UNITÀ GEOLOGICHE	17
<i>Unità geologica 1 – Terreni superficiali.....</i>	<i>17</i>



<i>Unità geologica 2 – Formazione detensionata ed alterata</i>	17
<i>Unità geologica 3 – Formazione detensionata</i>	17
MODELLO GEOTECNICO	19
RISULTATI DELLE INDAGINI – PARAMETRI NON AGGREGATI	19
DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI	20
ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO	21
REQUISITI PRESTAZIONALI DELL’OPERA IN PROGETTO	21
<i>Determinazione del periodo di riferimento</i>	21
PARAMETRI SISMICI DI BASE	22
ANALISI RSL – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO	22
ANALISI RSL - DATI DI INPUT SLV	23
<i>Accelerogrammi di input</i>	23
<i>Modello sismostratigrafico</i>	24
<i>Curve di smorzamento</i>	24
VERIFICA FONDAZIONI NTC 2018 – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO	25
VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI	25
CALCOLO DI Q_d	27
CONDIZIONI DINAMICHE	29
<i>Verifica al collasso per scorrimento sul piano di posa (SLU)</i>	29
<i>Verifica al collasso per carico limite del complesso terreno fondazioni (SLU)</i>	29
VERIFICHE A CEDIMENTO	30
<i>Calcolo delle tensioni indotte</i>	31
Metodo di Boussinesq	31
<i>Calcolo dei cedimenti - Metodo edometrico</i>	31
ESITO VERIFICHE	32
ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	32
<i>Parametri spettro normalizzato</i>	32
<i>Fattore di Housner</i>	32
VERIFICA FONDAZIONE NTC 2018	33
<i>Tipologia fondazioni sottoposte a verifica</i>	33
PLINTO UNITARIO	33
<i>Verifica in condizioni non drenate</i>	33
Caratteristiche terreno in condizioni non drenate – terreno equivalente	33
Verifiche resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni non drenate SLU	34



<i>Verifica in condizioni drenate</i>	34
Caratteristiche terreno in condizioni drenate – Terreno equivalente	34
Verifiche capacità portante in condizioni drenate SLU	35
Verifiche resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni drenate SLU.....	35
Verifiche a cedimento in condizioni non drenate SLE	35
SINTESI NON TECNICA	36

APPENDICE 1 – FIGURE ED ELABORATI GRAFICI

APPENDICE 2 – MODELLAZIONE GEOLOGICA

- CERTIFICATO INDAGINE SISMICA MASW
- CERTIFICATO INDAGINE SISMICA HVSR
- MODELLO GEOLOGICO

APPENDICE 3 – ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

- SPETTRO DI OUTPUT – SUOLO C – SLV

APPENDICE 4 – MODELLAZIONE GEOTECNICA

- MODELLO GEOTECNICO



INTRODUZIONE

Su incarico del Comune di Bologna, è stata redatta questa Relazione geologica, sismica e geotecnica preliminare per le scuole Avogli in Via Saragozza n. 238 nel Comune di Bologna (BO).

In questa fase di studio preliminare la parametrizzazione geotecnica è stata effettuata sulla base delle sole prove geofisiche, utilizzando formule empiriche, verificate e tarate su terreni appartenenti alle stesse unità geologiche rispetto a quelle oggetto di questo lavoro, in aree limitrofe: in fase di progettazione esecutiva sarà necessario prevedere **l'esecuzione di prove geotecniche (prove penetrometriche, sondaggi a carotaggio continuo e prove di laboratorio).**



DESCRIZIONE GENERALE DEL SITO

Dal punto di vista cartografico l'area d'indagine è individuabile come segue:

CARTA	SCALA	TIPOLOGIA	NUMERO	TOPONIMO
C.T.R	1:25.000	Tavola	220 SE	Bologna Sud-Ovest
C.T.R	1:5.000	Elemento	220121	Madonna di San Luca

Tabella n° 1 - Riferimenti cartografici



CAMPAGNA GEOGNOSTICA

È stata realizzata la seguente campagna geognostica:

- a) indagine geologico-morfologica dell'area in esame;
- b) consultazione di prove geognostiche eseguite nelle vicinanze dell'area di studio;
- c) esecuzione di n° 1 prova sismica MASW a 1 shot;
- d) esecuzione di n° 1 acquisizione delle vibrazioni ambientali (HVSr).

INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW

MASW - METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (*Multichannel Acquisition Surf Wave*) ha come obiettivo quello di ricostruire il profilo sismostratigrafico di un sito, valutando in particolare la distribuzione della velocità delle onde "S" sia per la ricostruzione del profilo del sottosuolo che per la definizione *in situ* della V_{s30} .

Al fine di migliorare il rapporto segnale disturbo per ogni punto di offset vengono eseguiti, in modalità iterativa, tre shots.

Il metodo MASW prevede la costruzione di una curva di dispersione per le onde di superficie, attraverso l'elaborazione di un'immagine di dispersione derivata dall'analisi della propagazione delle onde di Rayleigh.

La tecnica di prospezione MASW utilizza quindi un'immagine rappresentativa delle frequenze delle onde superficiali, espressa in funzione della velocità di fase delle stesse. Nell'immagine di dispersione (*Over Tone Image*) viene inoltre enfatizzata cromaticamente l'ampiezza delle vibrazioni evidenziando così le aree corrispondenti al miglior rapporto segnale/disturbo.

Una volta individuata la sequenza di frequenze e velocità di fase corrispondenti alla più probabile distribuzione della dispersione nel sottosuolo esaminato (analisi della curva di dispersione) si procede alla ricostruzione delle stratigrafie rappresentativa della distribuzione delle velocità delle onde S tramite l'utilizzo di un algoritmo di inversione.

La tecnica di prospezione MASW può essere così schematizzata:

1. acquisizione delle onde superficiali;
2. costruzione delle curve di dispersione (grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
3. inversione delle curve di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Modalità esecutive

Le indagini MASW vengono eseguite disponendo sul terreno almeno 24 sensori (geofoni) da 4.5 Hz, posti ad intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare.



Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive ad alta frequenza in corrispondenza di un punto prestabilito lungo il profilo (*punto di scoppio*): nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (*trigger*). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con intervallo di campionamento pari a 0.25 ms e tempo di registrazione pari ad almeno 1 secondo.

Lo scoppio e la registrazione, se necessario, vengono ripetuti tre volte.

Nel caso di esecuzione di prova MASW tomografica l'intero array viene spostato di 5.00 m e la prova viene ripetuta con le medesime modalità della prova a shot singolo, per il numero di avanzamenti previsto.

Lo strumento utilizzato è il sismografo digitale A6000-S di produzione M.A.E. s.r.l. caratterizzato da 24 canali di acquisizione digitale con dinamica a 24 bit.

Gli impulsi sismici sono stati generati con l'utilizzo di una massa battente da 10.0 Kg.

Le caratteristiche del sismografo e dei geofoni utilizzati sono di seguito sinteticamente riassunte:

SISMOGRAFO M.A.E. - A6000S

CPU NS Geode GXLV 233MHz
Memoria RAM 128 Mb PC100 Mhz
Hard Disk 512 Mb on Compact Flash Disk Udma/33
Batteria di riserva al Litio
Monitoraggio Hardware Winbond W83781D
Display LCD 10,5" Tft Transflective a colori, touch screen
Controller Fast Ethernet Intel 82559ER 10/100 Base-T
Alimentazione con alimentatore Switching 12 Volt 2Ah
Valigia in copolimeri di polypropylene antischiacciamento
Temperatura di funzionamento da 0 a 60°C
Dimensioni e peso L280 X H220 X P170 mm, 3 Kg

Tabella n° 2 - Tabella delle caratteristiche del sismografo utilizzato.

GEOFONI GEOSPACE GS-11D

Natural Frequency	4,5 ± 0,75 Hz
Coil Resistance @ 25°C ± 5%	380 Ohms
Intrinsic Voltage Sensitivity with 380 Ohm Coil ± 10%	0,32 V/cm/s
Normalized Transduction Constant (V/in/sec)	0,42 (sq.root of Rc)
Open Circuit Damping	0,34 ± 20%
Damping Constant with 380 Ohm Coil	762
Optional Coil Resistances ± 5%	56,16 Ohms
Moving Mass ± 5%	23,6 g
Typical Case to Coil Motion P-P	0,18 cm
Harmonic Distortion with Driving Velocity of 0.7 in/sec (1.8 cm/sec) P-P	N/S

Dimensioni

Height (less terminals*)	3,35 cm
Diameter	3,18 cm
Weight	111 g

* terminal height is 0,3429 cm

Tabella n° 3 - Tabella delle caratteristiche dei geofoni utilizzati.



MASW - PROVE ESEGUITE

È stata eseguita una prova MASW, la cui ubicazione è riportata in appendice 1:

MASW 1 shot	n° geofoni	Spacing (m)	Offset (m)	Lunghezza array [m]	Data esecuzione
MASW1	24	1.00	7.00	30.00	13/01/2022

Tabella n° 4 - Array degli stendimenti MASW.

MASW - PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO

Analisi delle immagini di dispersione

Le immagini di dispersione rappresentano, in forma grafica, lo spettro di dispersione delle onde di Rayleigh che si propagano nel sottosuolo dell'area indagata.

Le immagini illustrano la dispersione vera e propria intesa come variazione della velocità di fase in funzione delle frequenze dello spettro. Evidenziano inoltre l'ampiezza delle vibrazioni (energia associata) utilizzando variazioni di toni di colori.

L'obiettivo dell'analisi dell'immagine di dispersione è l'individuazione del "tono fondamentale" della vibrazione (fundamental mode), distinguendolo da tutti gli ipertoni associati (higher tone) e dai rumori di fondo (noise).

L'individuazione del "tono fondamentale" permette di giungere alla principale chiave di lettura della prospezione cioè all'individuazione della "curva di dispersione" e quindi, tramite inversione, alla ricostruzione della sequenza sismostratigrafica del sito indagato.

Interpretazione

Il profilo delle V_s è determinato sulla base di un algoritmo iterativo di inversione che utilizza i dati ottenuti dallo studio della curva di dispersione. L'interpretazione è stata effettuata per entrambi i metodi di filtrazione adottati.

L'algoritmo si basa sulle seguenti considerazioni:

- la frequenza è direttamente legata alla profondità di indagine (basse frequenze alte profondità);
- la velocità di fase dipende essenzialmente dalle proprietà elastiche dei materiali interessati dal propagarsi della perturbazione.

L'algoritmo di inversione tiene inoltre conto della necessità di soddisfare la seguente relazione:

$$z_f = a \lambda_f$$

dove:

z_f = profondità di propagazione della frequenza f ;

a = coefficiente adimensionale;

λ_f = lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza f .



Le iterazioni necessarie per l'elaborazione in precedenza descritta avvengono tramite l'utilizzo di un programma di calcolo specifico (*Surfseis 6.7* del *Kansas Geological Survey*).

In Appendice 1 sono riportati sia i sismogrammi che le immagini di dispersione (*Over Tone Image*) relative alla somma di ogni shot effettuato, con relative curve di dispersione.

Nei calcoli il Coefficiente di Poisson è stato considerato pari 0.4.

Per quanto concerne il calcolo dei parametri elastici sono state utilizzate le seguenti formule:

Densità Dinamica:

$$\gamma = 0.51V_p^{0.19}$$

Dove:

γ = densità del mezzo attraversato;

V_p = velocità onde di compressione;

Modulo di taglio:

$$G = \rho V_s^2$$

Dove:

ρ = massa volumica (γ/g);

γ = densità del mezzo attraversato;

g = accelerazione di gravità;

V_s = velocità onde di taglio;

Modulo di Young:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Dove:

G = modulo di taglio;

ν = Coefficiente di Poisson.



INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA HVSR

HVSR - METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo HVSR (Nogoshi e Igarashi 1971; Nakamura 1989) si basa sulla stima del rapporto tra lo spettro di ampiezza delle componenti orizzontali (H) e verticali (V) dei microtermori sismici ambientali registrati contemporaneamente e da una singola stazione.

La registrazione dei microtremori viene effettuato utilizzando un sensore a tre componenti (orientati sugli assi z, x e y di una terna cartesiana con l'asse delle ordinate posto in coincidenza con il Nord del campo magnetico terrestre) con frequenza naturale pari a 2 Hz.

La stazione registrante è un sismografo a 24 bit reali dello stesso tipo di quello utilizzato per la prova MASW.

I tempi di acquisizione sono funzione delle frequenze fondamentali che si intendono campionare, nel caso specifico il campionamento viene eseguito con target frequenze nel range $0.2 < f_0 < 20$ Hz tempo di registrazione pari a 40' con frequenza di campionamento di 200 Hz.

HVSR - PROVE ESEGUITE

È stata eseguita una prova HVSR, la cui ubicazione è riportata in appendice 1:

Prova	Corpo	Data esecuzione
HVSR A1	Suolo	13/01/2022

Tabella n° 5 – Prova sismica HVSR

HVSR - PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO

Il calcolo del rapporto H/V si sviluppa secondo i seguenti step:

1. Scomposizione dei segnali in finestre temporali, nel caso specifico di almeno 40 s ognuna;
2. Scelta delle finestre nelle quali il segnale registrato risulta maggiormente stazionario (almeno 15);
3. Calcolo e smussamento dello spettro di ampiezza ricavato tramite la trasformata di Fourier per ognuna delle finestre selezionate;
4. Calcolo del rapporto H/V per ogni finestra;
5. Calcolo della media dei rapporti H/V delle singole finestre e costruzione della curva H/V definitiva.

Il picco a più elevato rapporto H/V e a frequenza più bassa, individuato sulla curva definitiva, è rappresentativo del salto di impedenza sismica tra la copertura e il bed rock sismico locale.



La frequenza corrispondente a tale picco è la frequenza fondamentale del sito (f_0), dalla quale conoscendo il comportamento sismico della copertura e utilizzando la semplice regola matematica del IV d'onda è possibile stimare la profondità del bed rock sismico locale.



MODELLO GEOLOGICO

Per la definizione del modello geologico si sono utilizzati tutti i dati ottenuti dall'esecuzione delle prove in sito.

A) CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA DEL SITO

L'area di indagine si trova sulle prime propaggini appenniniche immediatamente a Sud di Via Saragozza, ad una quota di m 74.9 sul livello del mare.

Dal punto di vista geologico, come riportato graficamente nella **carta geologica** in appendice 1, la zona è caratterizzata dalla presenza in affioramento della Formazione delle Argille Azzurre (**FAA**).

I terreni di questa formazione sono principalmente costituiti da argille, argille marnose e marne argillose, siltose di colore grigio azzurro di età pliocenica.

La porzione di fondo valle in prossimità del Rio Meloncello è caratterizzata dalla presenza di terreni dell'unità neogenico quaternaria del Subsistema di Ravenna (**AES8**), costituita da depositi alluvionali terrazzati, con granulometria da ghiaie a sabbie e limi.

Dal punto di vista morfologico oltre alla zona di terrazzo alluvionale che occupa la zona di fondo valle in corrispondenza del corso del Rio Meloncello si segnala la presenza di depositi eluvio-colluviali (**a4**), costituiti da una coltre di materiale detritico, generalmente fine, prodotto da alterazione prodotta dall'azione mista delle acque di ruscellamento e dalla gravità.

La superficie libera della falda è stata posta a profondità di m 1.50 dal piano di campagna.

La falda, principalmente associata ai livelli limoso-sabbiosi, può avere carattere temporaneo ed è direttamente legata alle precipitazioni atmosferiche, con variazioni anche significative in corrispondenza di particolari condizioni meteorologiche.

In considerazione della tipologia di fondazione (plinto unitario con piano di posa della fondazione a m 1.00 dal piano di campagna) non si prevedono interazioni fra falda e fondazione e pertanto non si rende necessario un approfondimento relativo alle verifiche HYD e UPL.

PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO – AUTORITÀ DEL BACINO DEL RENO

Dalla consultazione del PSAI redatto dalla Regione Emilia-Romagna – Autorità di Bacino del Reno, in particolare la carta del rischio da frana ed assetto dei versanti, riportata in stralcio in appendice 1, si evidenzia come la zona d'indagine ricada in area perimetrata come R4, a rischio molto elevato.



B) CARATTERIZZAZIONE MICROSISMICA DEL SITO

Per la caratterizzazione microsismica del sito si sono eseguite una prova MASW ed una prova HVSR.

PROVA SISMICA MASW L1 – PRESENTAZIONE RISULTATI

Il certificato dell'indagine sismica MASW eseguita è riportato in appendice 1.

Sismostratigrafia

La stratigrafia sismica è riportata nella seguente tabella:

Strato	Spessore medio (m)	Vs (m/s)
1	1.38	163.46
2	1.72	195.45
3	2.15	227.12
4	2.69	293.88
5	3.36	297.59
6	4.20	265.50
7	5.25	342.65
8	6.56	428.87
9	8.20	434.25
10	8.87	562.60

Tabella n° 6 – Stratigrafia da prova sismica e velocità di propagazione dell'onda sismica geofono 1012

V_s equivalente

Utilizzando le metodologie e le formule di cui al paragrafo relativo alla metodologia MASW e seguendo le prescrizioni del D.M. 17.01.2018 la determinazione della V_{seq} è stata ottenuta utilizzando la formula:

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

dove:

h_i = spessore dello strato i-esimo;

V_{si} = Velocità onde di taglio dello strato i-esimo;

N = numero degli strati;

H = profondità del substrato (H = 30 m nel caso di substrato a profondità maggiore di 30 m)

La V_{s eq}, è calcolata per ogni shot di ogni linea sismica MASW eseguita a partire dal piano di campagna:

V _{eq} [m/s]	300.74
-----------------------	--------

Tabella n° 7 – Valore calcolato di V_{s30} Linea L1



Proprietà geofisiche dei terreni

In Appendice 2 sono rappresentati graficamente le colonne sismostratigrafiche relative ai parametri geofisici, di seguito riassunti in forma tabellare:

Prova Masw					
Profondità	V_p (m/s)	V_s (m/s)	γ_{din} (kN/m ³)	E (Mpa)	G_0 (Mpa)
1.38	400.40	163.46	15.62	119.14	42.55
3.10	478.75	195.45	16.16	176.20	62.93
5.24	556.33	227.12	16.62	244.83	87.44
7.93	719.85	293.88	17.46	430.46	153.74
11.29	728.93	297.59	17.50	442.45	158.02
15.49	650.34	265.50	17.12	344.63	123.08
20.73	839.32	342.65	17.97	602.54	215.19
27.29	1050.51	428.87	18.76	985.02	351.79
35.49	1063.70	434.25	18.80	1012.30	361.53
44.37	1378.08	562.60	19.75	1784.79	637.43

Tabella n° 8 – Parametri geofisici Linea L1

Determinazione delle categorie di suolo di fondazione

Utilizzando le tabelle di seguito riportate, si è proceduto alla determinazione della Categoria di appartenenza dei terreni:

Categorie di suolo di fondazione:	
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> 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	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> 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	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> con profondità del substrato superiore a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibile a quelli definiti per le categorie C e D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tabella n° 9 – Definizione dei profili stratigrafici

I terreni del sito appartengono alla Categoria **C**.



PROVA SISMICA HVSR – PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Il certificato dell'indagine sismica HVSR eseguita è riportato in appendice 2.

Verifiche SESAME

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5H$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5H$	
$\exists f^- \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Non superato
$f_{picco} > [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Tabella n° 10 - Esiti delle verifiche SESAME

Sismostratigrafia

La stratigrafia sismica della prova HVSR è riportata nella seguente tabella:

Strato	Profondità (m)	Spessore (m)	Vs (m/s)
1	1.50	1.50	85.00
2	20.00	18.50	300.00
3	50.00	30.00	430.00
4	BEDROCK	-	840.57

Tabella n° 11 – Dati della sismostratigrafia

Frequenza caratteristica di sito f_1

Frequenza f_1 [Hz]
17.10

Tabella n° 12 – Frequenza caratteristica di sito f_1

Frequenza caratteristica di sito f_0

Frequenza f_0 [Hz]
3.00

Tabella n° 13 – Frequenza caratteristica di sito f_0



Ampiezza del picco H/V

Ampiezza del picco [H/V]
1.60

Tabella n° 14 – Ampiezza del picco H/V

Profondità bedrock sismico

Profondità del bedrock [m]
50.00

Tabella n° 15 – Profondità del bed rock sismico

D) UNITÀ GEOLOGICHE

Si sono distinte le seguenti unità geologiche:

UNITÀ GEOLOGICA 1 – TERRENI SUPERFICIALI

Questa unità geologica è rappresentata dai depositi prevalentemente limo-sabbiosi a limo-argillosi. Dal punto di vista geotecnico il comportamento è prevalentemente coesivo.

UNITÀ GEOLOGICA 2 – FORMAZIONE DETENSIONATA ED ALTERATA

L'unità geologica 2 è rappresentata dai depositi prevalentemente limi argillosi, limi sabbiosi e rare ghiaie della Formazione detensionata ed alterata delle Argille Azzurre. Il comportamento geotecnico è prevalentemente coesivo.

UNITÀ GEOLOGICA 3 – FORMAZIONE DETENSIONATA

Questa unità geologica è rappresentata dalla Formazione delle Argille Azzurre detensionata, con litologie prevalentemente argillose e marnose. Dal punto di vista geotecnico il comportamento è coesivo.

Il modello geologico, rappresentato graficamente in appendice 2, è sintetizzato nella seguente tabella:



Unità geologiche	Ambiente deposizionale	Litologia	Comportamento
Unità 1	Terreni superficiali	Limi da sabbiosi ad argillosi	prevalentemente coesivo
Unità 2	Formazione delle Argille Azzurre alterata e detensionata	Limi argillosi, limi sabbiosi e rare ghiaie	prevalentemente coesivo
Unità 3	Formazione delle Argille Azzurre detensionata	Argille e marne	prevalentemente coesivo

Tabella n° 16- Unità geologiche

Con riferimento al modello geologico, in osservanza all'articolo 7.11.3.4.1 delle NTC 2018 non è necessario procedere alla verifica del rischio di liquefazione dei terreni per l'assenza di terreni potenzialmente liquefacibili in falda e non sono necessarie le verifiche HYD e UPL, in considerazione dell'assenza di interazioni fra falda e fondazione di progetto (plinto unitario con piano di posa a profondità di m 1.00 dal piano di campagna).



MODELLO GEOTECNICO

La parametrizzazione geotecnica in questa fase di studio preliminare è stata effettuata sulla base delle sole prove geofisiche eseguite.

Le formule utilizzate, seppure empiriche, sono state verificate e tarate su terreni appartenenti alle stesse unità geologiche rispetto a quelle oggetto di questo lavoro, in aree limitrofe.

In fase di progettazione esecutiva si prescrive l'esecuzione di prove geotecniche (prove penetrometriche, sondaggi a carotaggio continuo e prove di laboratorio).

RISULTATI DELLE INDAGINI – PARAMETRI NON AGGREGATI

Parametri geotecnici da prova MASW

Per la caratterizzazione geotecnica in termini di tensioni efficaci, oltre al dato di laboratorio, si è utilizzato il dato derivato dalla prova sismica MASW.

Partendo dalla correlazione q_c e V_s proposta da Prakoso (2010):

$$q_c = \left(\frac{V_s}{111.21} \right)^{1/0.37}$$

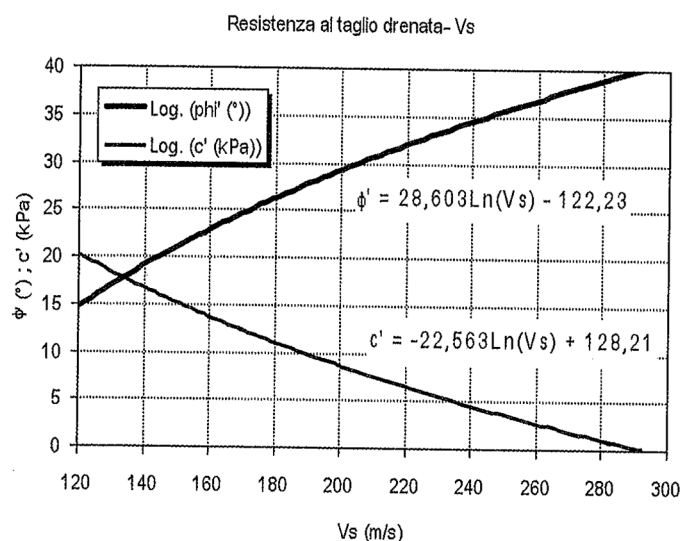
sviluppate per inversione, in modo da calcolare q_c in funzione di V_s , tramite le seguenti equazioni logaritmiche (valide nell'intervallo V_s 120 300 m/s):

$$\phi' = 28.603 * \ln(V_s) + 122.23$$

$$c' = 128.21 - 22.563 * \ln(V_s)$$

è possibile correlare la coesione drenata c' (kPa) e l'angolo d'attrito efficace ϕ' (°) con i valori di V_s misurati.

Di seguito si riporta l'abaco di correlazione tra c' e ϕ' con V_s





DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI

I parametri geotecnici disaggregati vengono poi trattati al fine di ottenere valori caratteristici per ogni unità geotecnica individuata.

Per valore caratteristico (che sarà indicato con la lettera k) si intende la soglia al di sotto della quale si colloca non più del 5% dei valori desumibili da una serie teoricamente illimitata di dati.

I valori caratteristici vengono determinati utilizzando la seguente relazione:

$$a'k = a'm(1 + XVa)$$

Dove:

$a'k$ = valore caratteristico di "a" con "a" parametro non aggregato trattato;

$a'm$ = valore medio di "a";

Va = coefficiente di variazione di "a";

X = parametro dipendente dalla legge di distribuzione della probabilità
e della probabilità di non superamento (pari a -1.645 Eurocode 7).

Unità geotecniche Parametri K	γ [kN/m ³]	c_u [kPa]	ϕ_u [°]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E_{ed} [kPa]
Unità 1	15.46	55.50	-	4.40	22.06	3031
Unità 2	17.02	90.20	-	2.30	36.51	68347
Unità 3	18.35	135.40	-	-	47.96	80000

Tabella n° 17 – tabella dei parametri geotecnici caratteristici.

Dove:

γ = Peso di volume del terreno [kN/m³]

c_u = Coesione del terreno in tensioni totali [kPa]

ϕ_u = Angolo di attrito interno del terreno in tensioni totali su base penetrometrica [°]

c' = Coesione del terreno in tensioni efficaci espressa in [kPa]

ϕ' = Angolo di attrito interno del terreno in tensioni efficaci [°]

E_{ed} = Modulo edometrico [kPa]



ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO

REQUISITI PRESTAZIONALI DELL'OPERA IN PROGETTO

DETERMINAZIONE DEL PERIODO DI RIFERIMENTO

Nel rispetto di quanto previsto dalla norma, l'opera di progetto rientra nelle seguenti categorie:

Tipi di Costruzione		Vita Nominale V_N (in anni)
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali, dighe di dimensioni contenute o importanza normale.	\geq 50

Tabella n° 18 – Vita Nominale V_N

Classi d'uso		Coefficiente C_U
Classe 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	1.5

Tabella n° 19 – Coefficiente d'uso C_U

Da cui il periodo di riferimento per la valutazione dell'azione sismica è:

V_r	$V_N * C_U$	75 anni
-------	-------------	---------

Tabella n° 20 – Vita di riferimento V_r

È stata eseguita l'analisi della risposta sismica locale nella condizione SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita) in funzione dei dati stratigrafici e sismico stratigrafici ottenuti dalla prova MASW e dalla registrazione HVSr.

L'analisi è stata condotta secondo quanto previsto Delibera Giunta regionale N. 476 del 12 aprile 2021 della Regione Emilia-Romagna che definisce l'aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico, sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (ARTT. 22 e 49, L.R. N. 20/2017) di cui alla deliberazione giunta regionale 29 aprile 2019, N. 630.

L'analisi ha seguito il seguente sviluppo:

- Definizione di V_n , C_u , Stati Limite ed ubicazione del sito;
- Determinazione dei parametri sismici relativi alla pericolosità di base;



- Definizione degli accelerogrammi di INPUT;
- Elaborazione della sismostratigrafia utilizzata nell'analisi (prova MASW + HVSr);
- Definizione della profondità del bedrock sismico (prova HVSr);
- Calcolo degli accelerogrammi di progetto (al suolo ed al bedrock), sulla base degli accelerogrammi di input previsti dalla Delibera Giunta regionale N. 476 del 12 aprile 2021;
- Calcolo delle PGA (Peak Ground Acceleration) e degli spettri di risposta elastici e dell'amplificazione locale nel caso SLV.

PARAMETRI SISMICI DI BASE

I parametri sismici di base:

- a_g (accelerazione massima attesa su sito di riferimento rigido);
- F_0 (valore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale);
- T_c^* (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale);

sono riferiti ad un sito identificato dalle seguenti coordinate geografiche:

	WGS 84
Latitudine	44.4887000
Longitudine	11.3122000

Tabella n° 21 - Tabella delle coordinate geografiche del sito

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei dati:

Stati limite	T_r [anni]	a_g [m/s²]	F_0 [-]	T_c^* [s]
SLO	45	0.638	2.485	0.268
SLD	75	0.786	2.485	0.278
SLV	712	1.886	2.410	0.313
SLC	1462	2.364	2.440	0.320

Tabella n° 22 – Parametri in funzione dei tempi di ritorno

ANALISI RSL – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO

La procedura di calcolo utilizzata per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, od uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- fattore di smorzamento iniziale;



- modulo di elasticità tangenziale;
- spessore;
- indice di plasticità.

Il codice di calcolo utilizzato è quello del software “Risposta Sismica Locale Monodimensionale” di produzione Aztec Informatica.

I metodi di calcolo utilizzati si basano su un comportamento detto Lineare Equivalente, che utilizza il modello visco-elastico di Kelvin-Voigt per la determinazione degli spettri di risposta elastici.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell’accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
2. Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
 - a. Stima della funzione di trasferimento;
 - b. Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - c. Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.a, 2.b e 2.c sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un’iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;

3. Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

ANALISI RSL - DATI DI INPUT SLV

ACCELEROGRAMMI DI INPUT

Gli accelerogrammi di input, in osservanza a quanto prescritto dalla Delibera di Giunta regionale N. 476 del 12 aprile 2021 della Regione Emilia-Romagna (Allegato A4), sono ricavati dalla piattaforma WebGIS <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html>.

Dalla piattaforma è possibile scaricare l’input sismico selezionato per ciascun nodo del reticolo di riferimento per il territorio dell’Emilia-Romagna considerato dalle NTC08 (D.M. 14.01.2008) e NTC18 (D.M. 17.01.2018). L’input sismico è disponibile per i periodi di ritorno di 101, 475 e 975 anni (nel nostro caso 975 anni) ed è espresso in termini di un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC08.

Nella seguente tabella si riportano gli accelerogrammi di input utilizzati nell’analisi:



ACCELEROGRAMMA n.	MAGNITUDO (Mw)	DISTANZA DALL'EPICENTRO (km)	FATTORE DI SCALA	BANCA DATI	NOME DEL FILE
1	6.20	29.90	3.07	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
2	5.74	12.57	2.01	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
3	6.93	83.53	2.23	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
4	6.69	38.07	1.69	NGA	RSN1091_NORTH_VAS090.AT2
5	6.60	31.00	0.95	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
6	6.60	37.00	1.82	KiKnet	SAGH010503201053.NS2
7	5.50	13.20	2.50	ESM	IT.AQP..HNE.D.20090407.174737.C.ACC.ASC

Tabella n° 23 – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi RSL

MODELLO SIMOSTRATIGRAFICO

n.	Descrizione	Profondità letto (m)	Spessore (m)	γ [kN/m ³]	V_s [m/s]	D_0 [%]	G_0 [kPa]	PI	Curve di dissipazione
1	Limi e limi sabbiosi superficiali	1.5	1.5	1650.00	245	30	1010	10	Vucetic & Dobry
2	Alternanza di limi argillosi, limi sabbiosi e rare ghiaie	20	18.5	1650.00	300	30	1514	10	Vucetic & Dobry
3	Marne detensionate	50	30	1800.00	403	30	2981	10	Vucetic & Dobry
6	Bedrock	oo	oo	Substrato rigido					Bedrock

Dove:

γ = Peso di volume del terreno [kN/m³]
 V_s = velocità delle onde di taglio [m/s]
 D_0 = Fattore di smorzamento iniziale [%]
 G_0 = modulo di elasticità tangenziale [kPa]
 PI = Indice di plasticità

Tabella n° 24 – Modello sismostratigrafico per l'analisi sismica di III livello

CURVE DI SMORZAMENTO

Le curve di smorzamento per i terreni considerati sono riportati di seguito in forma tabellare:

Vucetic & Dobry

γ %	G/Gmax --	Smorzamento %
1.00E-04	1.00E+00	0.00
3.16E-04	9.97E-01	0.00
1.00E-03	9.73E-01	0.00
3.16E-03	9.12E-01	2.77
1.00E-02	7.78E-01	5.00
3.16E-02	5.84E-01	8.53
1.00E-01	3.47E-01	12.83
3.16E-01	1.73E-01	17.33
1.00E+00	6.47E-02	21.27
1.65E+00	6.47E-02	22.70

Dove:

γ = Deformazione a taglio [%]
 G/G_{max} = Rapporto tra il modulo di taglio corrente e quello massimo
 D = Fattore di smorzamento [%]

Tabella n° 25– Curve di smorzamento



VERIFICA FONDAZIONI NTC 2018 – PROCEDURE E CODICI DI CALCOLO

VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI

Come previsto al paragrafo 6.4.2. delle Norme Tecniche 2018, la verifica è stata condotta prendendo in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Le verifiche devono accertare che sia soddisfatta per ogni stato limite considerato la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

Dove:

E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Per le fondazioni superficiali (**NTC 2018 6.4.2.1.**) le verifiche devono essere svolte applicando la **combinazione (A1+M1+R3)**, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle seguenti tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I:

Coefficienti parziali combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:				
Carichi	Effetto		A1	A2
Permanenti	Favorevole	γ_{G1fav}	1	1
Permanenti	Sfavorevole	γ_{G1sfav}	1.3	1
Variabili	Favorevole	γ_{G2fav}	0	0
Variabili	Sfavorevole	γ_{G2sfav}	1.5	1.3

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno			
Parametri		M1	M2
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{\tan\phi'}$	1	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1	1.4
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}	1	1.6
Peso dell'unità di volume	γ_v	1	1

Tabella n° 26 – coefficienti parziali condizioni statiche



Coefficienti parziali combinazioni sismiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:				
Carichi	Effetto		A1	A2
Permanenti	Favorevole	γ_{G1fav}	1	1
Permanenti	Sfavorevole	γ_{G1sfav}	1	1
Variabili	Favorevole	γ_{G2fav}	0	0
Variabili	Sfavorevole	γ_{G2sfav}	1	1

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno			
Parametri		M1	M2
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{\tan\phi'}$	1	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1	1.4
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}	1	1.6
Peso dell'unità di volume	γ_v	1	1

Tabella n° 27 – coefficienti parziali condizioni dinamiche

Coefficienti parziali γ_R per le verifiche geotecniche

		Coefficienti parziali γ_R per le verifiche geotecniche:		
		R1	R2	R3
Capacità portante	γ_R	1	1.8	2.3
Scorrimento	γ_R	1	1.1	1.1

Coeff. di combinazione	$\psi_0 = 0.70$	$\psi_1 = 0.50$	$\psi_2 = 0.20$
------------------------	-----------------	-----------------	-----------------

Tabella n° 28 – coefficienti parziali γ_R

Dove:

A = coefficienti parziali relativi alle azioni γ_f ;

M = coefficienti parziali relativi alla resistenza dei materiali γ_M ;

R = coefficienti parziali per la resistenza globale del sistema γ_R ;

ψ = coefficienti di combinazione.



In sintesi, nelle verifiche con l'utilizzo della **combinazione A1-M1-R3** vengono incrementate le azioni permanenti e variabili con i coefficienti parziali sulle azioni e vengono lasciate inalterate le caratteristiche di resistenza del terreno.

CALCOLO DI Q_D

La valutazione della resistenza di progetto del sistema geotecnico viene condotta utilizzando la seguente equazione (EC7):

$$q_u = c N_c s_c i_c + q N_q s_q i_q + 0.5 B \gamma N_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

dove:

N_c - N_q - N_γ sono coefficienti di portata, definiti come segue:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi$$

s_c - s_q - s_γ sono fattori di forma, definiti come segue:

$$\text{per } \phi = 0 \quad s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} \quad \text{per forma rettangolare}$$

$$s_c = 1 + 0.2 \quad \text{per forma quadrata o circolare}$$

$$\text{per } \phi > 0 \quad s_c = \frac{s_q N_q^{-1}}{N_q - 1} \sin \phi$$

$$\text{per } \phi > 0 \quad s_q = 1 + \frac{B}{L} \sin \phi \quad \text{per forma rettangolare}$$

$$s_q = 1 + \sin \phi \quad \text{per forma quadrata o circolare}$$

$$\text{per } \phi > 0 \quad s_\gamma = 1 - 0.3 \frac{B}{L} \quad \text{per forma rettangolare}$$

$$s_\gamma = 0.7 \quad \text{per forma quadrata o circolare}$$

i_c - i_q - i_γ sono fattori d'inclinazione del carico, definiti come segue:



per $\phi = 0$

$$i_c = 0.5(1 + (1 - \frac{H}{A_f c_u})^{0.5})$$

Inclinazione della risultante dovuta ad un carico orizzontale parallelo ad L:

per $\phi > 0$

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$i_q = i_\gamma = 1 - \frac{H}{V + A_f c_a \cot \phi}$$

Inclinazione della risultante dovuta ad un carico orizzontale parallelo a B:

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$i_q = (1 - \frac{0.7H}{V + A_f c_a \cot \phi})^3$$

$$i_\gamma = (1 - \frac{H}{V + A_f c_a \cot \phi})^3$$

Dove:

$A_f = B' x L'$ è l'area efficace della fondazione

$$B' = B - 2e_b$$

$$L' = L - 2e_L$$

e_b ed e_L eccentricità del carico

V è la componente del carico perpendicolare alla base

H è la componente del carico parallelo alla base

La verifica agli SLU risulta soddisfatta quando è verificata la seguente disequazione:

$$V \leq P_d$$

Dove:



V è il valore di progetto dell'azione in kN;

P_d è la resistenza di progetto del terreno.

CONDIZIONI DINAMICHE

La verifica agli Stati Limite Ultimi in condizioni dinamiche (sisma) viene effettuata per i seguenti casi:

- collasso per scorrimento sul piano di posa;
- collasso per carico limite del complesso terreno fondazioni.

VERIFICA AL COLLASSO PER SCORRIMENTO SUL PIANO DI POSA (SLU)

L'equazione di verifica utilizzata è la seguente:

$$T_k \leq R_{amm}$$

Con:

$$R_{amm} = \frac{1}{\gamma_r} \left[N_k \frac{\tan(\phi'_k)}{\gamma_\phi} \right]$$

Dove:

T_k = forza di taglio agente sul piano di posa, espresso in kN;

R_{amm} = resistenza di progetto allo scorrimento, espresso in kN;

ϕ'_k = angolo di attrito interno (valore aggregato);

γ_ϕ = coefficiente parziale (M1).

Il valore di T_k dipende dalle caratteristiche strutturali della fondazione e dalle scelte del progettista: nelle tabelle relative all'esito delle verifiche si riporta pertanto il solo valore di resistenza di progetto allo scorrimento R_{amm} .

VERIFICA AL COLLASSO PER CARICO LIMITE DEL COMPLESSO TERRENO FONDAZIONI (SLU)

L'influenza degli effetti sismici sul calcolo della resistenza di progetto è stata considerata utilizzando una riduzione dell'angolo d'attrito in funzione dell'intensità della sollecitazione sismica (metodo di Sano):

$$\phi^{(s)} = \phi - \arctan g \left(\frac{C}{\sqrt{2}} \right)$$



dove:

C= coefficiente d'intensità sismica

Secondo l'Eurocodice 8:

$C=0,5a_{\text{picco}}$

dove:

a_{picco} = accelerazione sismica di picco.

Il calcolo viene effettuato utilizzando la stessa equazione del calcolo della resistenza di progetto del sistema geotecnico modificata utilizzando il fattore di riduzione di Sano.

La verifica deve soddisfare la seguente disequazione:

$$N_k \leq R_D z$$

Dove:

$$N_k = G_k + Q_k$$

Riduzione per sisma		
Riduzione sismica:	SANO	4.16%

Tabella n° 29 - Riduzione dell'angolo d'attrito

VERIFICHE A CEDIMENTO

Le verifiche relative alle deformazioni del terreno dovute all'interazione tra terreno e struttura (cedimenti) vengono effettuate utilizzando i valori caratteristici dei parametri di progetto.

La disequazione che deve essere verificata è data da:

$$E_d \leq C_d$$

Dove:

E_d è il valore di progetto dell'azione e degli spostamenti;

C_d è il valore limite dell'effetto delle azioni (cedimenti).

Il valore di progetto dell'azione e degli spostamenti E_d dipende dalle caratteristiche strutturali della fondazione e dalle scelte del progettista: nelle tabelle relative all'esito delle verifiche si riporta pertanto il solo valore limite dell'effetto delle azioni C_d (cedimenti).



CALCOLO DELLE TENSIONI INDOTTE

Metodo di Boussinesq

Il metodo di Boussinesq considera il terreno come un mezzo omogeneo elastico ed isotropo. Dato un carico concentrato Q , applicato in superficie, la relazione di Boussinesq fornisce la seguente espressione della tensione verticale indotta in un punto $P(x,y,z)$ posto alla profondità z :

$$q_v = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5}$$

dove: $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$;

Per ottenere la pressione indotta da un carico distribuito occorre integrare tale espressione su tutta l'area di carico, considerando il carico Q come un carico infinitesimo agente su una areola dA . L'integrazione analitica di questa espressione si presenta estremamente complessa specialmente nel caso di carichi distribuiti in modo non uniforme. Pertanto, si ricorre a metodi di soluzione numerica. Dato il carico agente sulla fondazione, si calcola il diagramma delle pressioni indotte sul piano di posa della fondazione. Si divide l'area di carico in un elevato numero di areole rettangolari a ciascuna delle quali compete un carico dQ : la tensione indotta in un punto $P(x,y,z)$, posto alla profondità z , si otterrà sommando i contributi di tutte le areole di carico calcolati come nella formula di Boussinesq.

CALCOLO DEI CEDIMENTI - METODO EDMETRICO

Per il calcolo di questo tipo di cedimento viene utilizzata la classica formula:

$$\Delta H = m_v \Delta p H$$

dove:

m_v = coefficiente di compressibilità;

Δp = carico verticale;

H = spessore dello strato;

ΔH = cedimento per lo strato considerato.

Il cedimento totale è computato sommando i ΔH ottenuti da tutti gli strati presi in considerazione.

Il coefficiente di compressibilità volumetrico è determinato da prova di consolidazione edometrica o su base penetrometrica, con la seguente metodologia:

$$m_v = 1 / (\alpha Q_t);$$

α = coefficiente adimensionale; $\alpha = 2,75 \pm 0,55$ (Jones e Rust 1995, per argille di origine continentale).



ESITO VERIFICHE

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi della risposta sismica locale, eseguita con le metodologie ed i dati di input illustrati nel capitolo relativo alle procedure e codici di calcolo:

PARAMETRI SPETTRO NORMALIZZATO

Ag [m/s ²]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	PGA [m/s ²]	F0	Ss	St	η	ξ [%]
1.849	0.272	0.816	2.955	3.323	2.043	1.797	1	1	5.00

Tabella n° 30 – Parametri dello spettro normalizzato

Gli spettri di output sono rappresentati graficamente in appendice 3.

FATTORE DI HOUSNER

H _i [m]	H _o (m)	T _i (s)	T _f (s)	FA
0.035	0.133	0.10	0.50	3.798
0.054	0.386	0.50	1.00	7.198
0.054	0.386	1.00	2.50	7.198

Dove:

H _i	=	Intensità di Housner in ingresso, espressa in [m]
H _o	=	Intensità di Housner in uscita, espressa in [m]
T _i	=	Periodo iniziale di riferimento, espresso in [s]
T _f	=	Periodo finale di riferimento, espresso in [s]
FA	=	Fattore di amplificazione

Tabella n° 31 – Fattore di amplificazione di Housner



VERIFICA FONDAZIONE NTC 2018

TIPOLOGIA FONDAZIONI SOTTOPOSTE A VERIFICA

È stata sottoposta a verifica a livello esplicativo una fondazione ipotetica a plinto unitario:

PLINTO UNITARIO

TIPO	B	L	D
PLINTO	1.00	1.00	1.00

B	lunghezza elemento fondazione [m]
L	larghezza elemento fondazione [m]
D	profondità di posa della fondazione [m dal p.d.c.]

Sollecitazione verticale e baricentrica			
Carico Permanente	G	kN	98.07
Carico Variabile	Q	kN	9.81

Tabella n° 32 – Geometria e carichi Fondazione a plinto unitario

VERIFICA IN CONDIZIONI NON DRENATE

Caratteristiche terreno in condizioni non drenate – terreno equivalente

Il macrostrato equivalente per la verifica al carico limite è stato ottenuto applicando il criterio della media aritmetica:

MACROSTRATO EQUIVALENTE (CRITERIO MEDIA ARITMETICA)											
Combinazione	H [m]	γ [kN/mc]	ϕ [°]	c [kPa]	G [kPa]	B' [m]	L' [m]	Rex	Rey	I _R	I _{RC}
A1 + M1 + R3	0.51	7.65	1.00	56.00	0.00	1.00	1.00	--	--	1.00	9.09
A1 + M1 + R3 sismica	0.51	7.65	0.00	56.00	0.00	1.00	1.00	--	--	1.00	9.09

Tabella n° 33 – macrostrato equivalente in condizioni non drenate per plinto unitario

Dove:

- H = Altezza del cuneo di rottura, espressa in [m]
 γ = Peso di volume, espressa in [kN/mc]
 ϕ = Angolo di attrito, espressa in [°]
c = Coesione, espressa in [kPa]
G = Modulo di taglio, espresso in [kPa]
B' = Base ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ($B'=B-2ex$), espressa in [m]
L' = Lunghezza ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ($L'=L-2ey$), espressa in [m]
Rex = Fattore di riduzione per carico eccentrico lungo X
Rey = Fattore di riduzione per carico eccentrico lungo Y
IR = Indice di rigidezza
IRC = Indice di rigidezza critico



Verifiche capacità portante in condizioni non drenate SLU

Combinazione A1 + M1 + R3			Combinazione A1 + M1 + R3 sismica		
P_u [kN]	P_d [kN]	V [kN]	P_u [kN]	P_d [kN]	V [kN]
454.31	197.53	142.20	426.25	185.33	107.87
$V < P_d$ verifica soddisfatta			$V < P_d$ verifica soddisfatta		

Tabella n° 34– Verifiche SLU in condizioni non drenate per plinto unitario

Dove:

P_u = resistenza ultima del terreno [kN]

P_d = resistenza di progetto del terreno [kN]

V = valore di progetto dell'azione [kN]

Verifiche resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni non drenate SLU

	Combinazione A1 + M1 + R3	Combinazione A1 + M1 + R3 sismica
R_{amm} [kN]	27.53	25.27

Tabella n° 35 - Verifiche SLU resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni non drenate per plinto unitario

VERIFICA IN CONDIZIONI DRENATE

Caratteristiche terreno in condizioni drenate – Terreno equivalente

Il macrostrato equivalente per la verifica al carico limite è stato ottenuto applicando il criterio della media aritmetica:

MACROSTRATO EQUIVALENTE (CRITERIO MEDIA ARITMETICA)											
Combinazione	H [m]	γ [kN/mc]	ϕ [°]	c [kPa]	G [kPa]	B' [m]	L' [m]	R_{ex}	R_{ey}	I_R	I_{ac}
A1 + M1 + R3	0.74	7.65	22.06	4.00	0.00	1.00	1.00	--	--	1.00	34.36
A1 + M1 + R3 sismica	0.74	7.65	20.38	4.00	0.00	1.00	1.00	--	--	1.00	34.36

Tabella n° 36 - macrostrato equivalente in condizioni drenate per plinto unitario

Dove:

H = Altezza del cuneo di rottura, espressa in [m]

γ = Peso di volume, espressa in [kN/mc]

ϕ = Angolo di attrito, espressa in [°]

c = Coesione, espressa in [kPa]

G = Modulo di taglio, espresso in [kPa]

B' = Base ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ($B'=B-2ex$), espressa in [m]



L' = Lunghezza ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ($L'=L-2ey$), espressa in [m]

R_{ex} = Fattore di riduzione per carico eccentrico lungo X

R_{ey} = Fattore di riduzione per carico eccentrico lungo Y

IR = Indice di rigidezza

IRC = Indice di rigidezza critico

Verifiche capacità portante in condizioni drenate SLU

Combinazione A1 + M1 + R3			Combinazione A1 + M1 + R3 sismica		
P_u [kN]	P_d [kN]	V [kN]	P_u [kN]	P_d [kN]	V [kN]
354.32	154.05	142.20	296.16	128.77	107.87
$V < P_d$ verifica soddisfatta			$V < P_d$ verifica soddisfatta		

Tabella n° 37 - Verifiche SLU in condizioni drenate per plinto unitario

Dove:

P_u = resistenza ultima del terreno [kN]

P_d = resistenza di progetto del terreno [kN]

V = valore di progetto dell'azione [kN]

Verifiche resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni drenate SLU

	Combinazione A1 + M1 + R3	Combinazione A1 + M1 + R3 sismica
R_{amm} [kN]	37.94	29.75

Tabella n° 38 - Verifiche SLU resistenza di progetto allo scorrimento in condizioni drenate per plinto unitario

Verifiche a cedimento in condizioni non drenate SLE

I calcoli delle verifiche a cedimento a lungo termine (condizioni drenate) sono stati condotti nelle condizioni SLE, con coefficienti parziali per i carichi pari a 1, per la fondazione considerata:

Massimo Cedimento (cm)	3.07
------------------------	------

Tabella n° 39- Verifiche SLE cedimento fondazione in condizioni drenate per plinto unitario



SINTESI NON TECNICA

Sulla base dello studio effettuato è possibile affermare quanto segue:

- l'area d'intervento ricade in **area perimetrata** come **R4, a rischio molto elevato** nella carta del rischio da frana ed assetto dei versanti, del PSAI dell'Autorità di Bacino del Reno;
- dal punto di vista geologico, la zona è caratterizzata dalla presenza della Formazione delle Argille Azzurre, detensionata ed alterata in prossimità della superficie;
- dal punto di vista morfologico si evidenziano depositi intravallivi (Subsistema di Ravenna) nella zona di fondo valle in corrispondenza del corso del Rio Meloncello e depositi eluvio-colluviali, costituiti da una coltre di materiale detritico, in prossimità dell'area di intervento;
- il modello geologico (rappresentato graficamente in appendice 2) è sintetizzabile nella seguente tabella:

Unità geologiche	Ambiente deposizionale	Litologia	Comportamento
Unità 1	Terreni superficiali	Limi da sabbiosi ad argillosi	prevalentemente coesivo
Unità 2	Formazione delle Argille Azzurre alterata e detensionata	Limi argillosi, limi sabbiosi e rare ghiaie	prevalentemente coesivo
Unità 3	Formazione delle Argille Azzurre detensionata	Argille e marne	prevalentemente coesivo

- la superficie libera della falda è stata posta a profondità di m 1.50 dal piano di campagna. La falda, principalmente associata ai livelli limoso-sabbiosi, può avere carattere temporaneo ed è direttamente legata alle precipitazioni atmosferiche, con variazioni anche significative in corrispondenza di particolari condizioni meteorologiche.
- da un punto di vista sismico i terreni dell'area appartengono alla **categoria di suolo di fondazione "C"**, con V_{seq} per piano di fondazione sul piano di campagna pari a:

V_{eq} [m/s]	300.74
----------------	--------

- con la prova sismica HVSr ha individuato due picchi d'impedenza f_1 , più superficiale ed f_0 che permette di definire la profondità del bedrock sismico:



Frequenza f_1 [Hz]
17.10

Frequenza f_0 [Hz]
3.00

Profondità del bedrock [m]
50.00

- il modello geotecnico è sintetizzabile nella seguente tabella (parametri caratteristici):

Unità geotecniche Parametri K	γ [kN/m ³]	c_u [kPa]	ϕ [°]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E_{ed} [kPa]
Unità 1	15.46	55.50	-	4.40	22.06	3031
Unità 2	17.02	90.20	-	2.30	36.51	68347
Unità 3	18.35	135.40	-	-	47.96	80000

- in considerazione della dell'assetto geologico individuato non si sono rese necessarie né verifiche a liquefazione, né verifiche HYD e UPL;
- è stato eseguito l'analisi della risposta sismica locale (approfondimento di terzo livello);
- i parametri dello spettro normalizzato SLV sono riportati nella seguente tabella:

A_g [m/s ²]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	PGA [m/s ²]	F0	Ss	St	η	ξ [%]
1.849	0.272	0.816	2.955	3.323	2.043	1.797	1	1	5.00

- il fattore di amplificazione di Housner è riportato nella seguente tabella:

H_i [m]	H_o (m)	T_i (s)	T_f (s)	FA
0.035	0.133	0.10	0.50	3.798
0.054	0.386	0.50	1.00	7.198
0.054	0.386	1.00	2.50	7.198

- le verifiche SLU per la fondazione esemplificativa (plinto unitario) sottoposta ad analisi, sono soddisfatte, sia in condizioni drenate, che non drenate;



- i cedimenti a lungo termine (condizioni drenate) per la fondazione considerata sono pari a:

Massimo Cedimento (cm)	3.07
------------------------	------

- in questa fase di studio preliminare la parametrizzazione geotecnica è stata effettuata sulla base delle sole prove geofisiche eseguite, utilizzando formule empiriche, verificate e tarate su terreni appartenenti alle stesse unità geologiche rispetto a quelle oggetto di questo lavoro, in aree limitrofe: in fase di progettazione esecutiva **si prescrive l'esecuzione di prove geotecniche (prove penetrometriche, sondaggi a carotaggio continuo e prove di laboratorio).**

San Giovanni in Persiceto, 1 febbraio 2022

I Geologi :





Studio Tecnico Associato Consulenze di Geologia e Ambiente del Dott. Geol. F. Barbieri e del Dott. Geol. M. Ropa
Via E. Fermi n° 11/A - 40017 SAN GIOVANNI IN PERSICETO (BO) Tel. +39 051 - 6871113 Fax +39 051 6874328
C.F. e Partita IVA 04112290376
Email: cgastudio@cgstudio.eu

APPENDICE 1

- FIGURE ED ELABORATI GRAFICI



COMMITTENTE: Comune di Bologna

UBICAZIONE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

LAVORO: Relazione geologica, geotecnica e sismica preliminare

RIFERIMENTO PRATICA: A 1608 - GF 816

CARTA GEOLOGICA

Carta Geologica 1:10.000 202120 - Casalecchio di Reno



LEGENDA:

DEPOSITI QUATERNARI CONTINENTALI

- a1a - Deposito di frana attiva per crollo
- a1b - Deposito di frana attiva per scivolamento
- a1d - Deposito di frana attiva per colamento di fango
- a1g - Deposito di frana attiva complessa
- a2b - Deposito di frana quiescente per scivolamento
- a2d - Deposito di frana quiescente per colamento di fango
- a2g - Deposito di frana quiescente complessa
- a3 - Deposito di versante s.l.
- a4 - Deposito eluvio-colluviale
- b1 - Deposito alluvionale in evoluzione
- i1 - Conoide torrentizia in evoluzione

SUCCESSIONE NEOGENICO-QUATERNARIA

- AES8 - Subsistema di Ravenna
- AES8a - Unità di Modena
- IMO1 - Sabbie di Imola - membro di Monte Castellaccio
- FAA - Argille Azzurre
- GES - Formazione Gessoso Solifera

SUCCESSIONE EPIGIGURE

- TER - Formazione del Termina
- CIG - Formazione di Cigarellino
- PAT - Formazione di Pantano

Area indagine



COMMITTENTE: Comune di Bologna

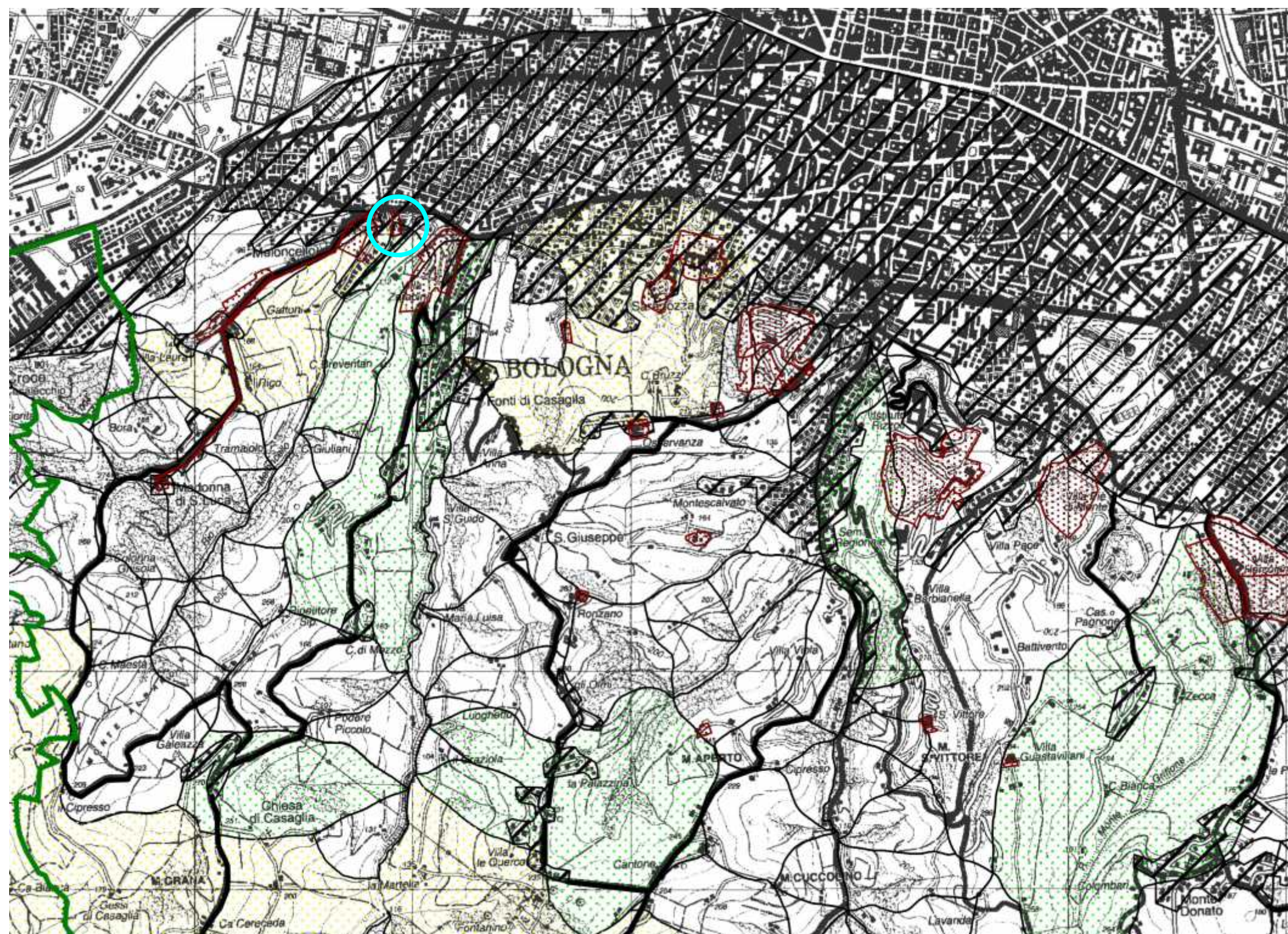
UBICAZIONE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

LAVORO: Relazione geologica, geotecnica e sismica preliminare

RIFERIMENTO PRATICA: A 1608 - GF 816

Autorità di Bacino del Reno - PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO

PSAI - Tavole 1.2, 1.4 Rischio da frana e assetto dei versanti



LEGENDA:

-  R4 - RISCHIO MOLTO ELEVATO (ART.11)
-  R3 - RISCHIO ELEVATO (ART.11)
-  R2 - RISCHIO MEDIO (ART.11)
-  R1 - RISCHIO MODERATO (ART.11)

 Area indagine

Non in scala



Studio Tecnico Associato Consulenze di Geologia e Ambiente del Dott. Geol. F. Barbieri e del Dott. Geol. M. Ropa
Via E. Fermi n° 11/A - 40017 SAN GIOVANNI IN PERSICETO (BO) Tel. +39 051 - 6871113 Fax +39 051 6874328
C.F. e Partita IVA 04112290376
Email: cgastudio@cgstudio.eu

APPENDICE 2

- MODELLAZIONE GEOLOGICA

- Certificato indagine sismica MASW
- Certificato indagine sismica HVSR
- Modello geologico



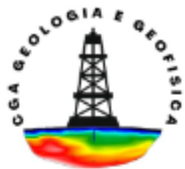
COMMITTENTE: Comune di Bologna

CANTIERE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

UBICAZIONE PROVA A1608GF816MaswL1





COMMITTENTE: Comune di Bologna

CANTIERE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

PROVA: MASW a 1 Shot

CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

DATA DI ESECUZIONE: 13/01/2022

CERTIFICATO N°: A1608GF816MaswL1

Vs e Vp (m/s) Poisson γ din. (kN/mc) E (MPa) G0 (MPa)

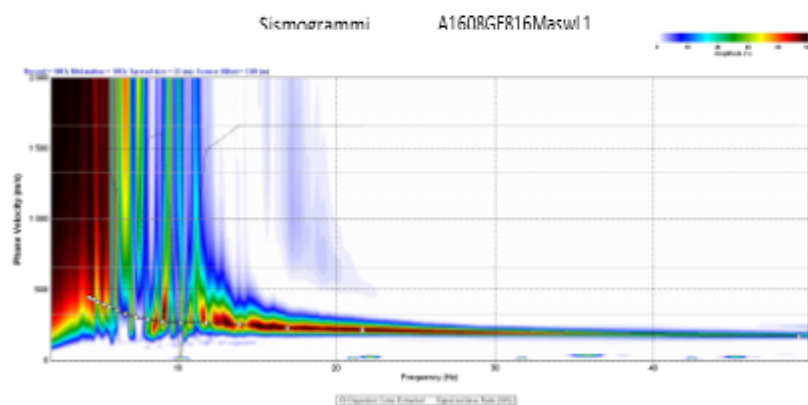
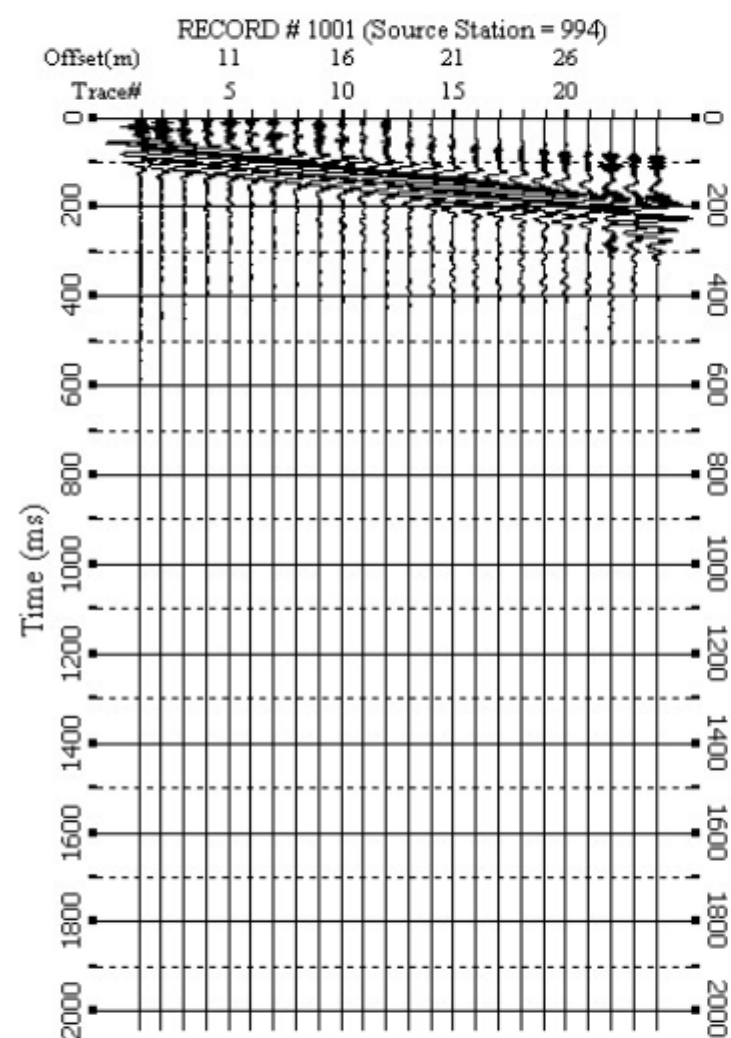
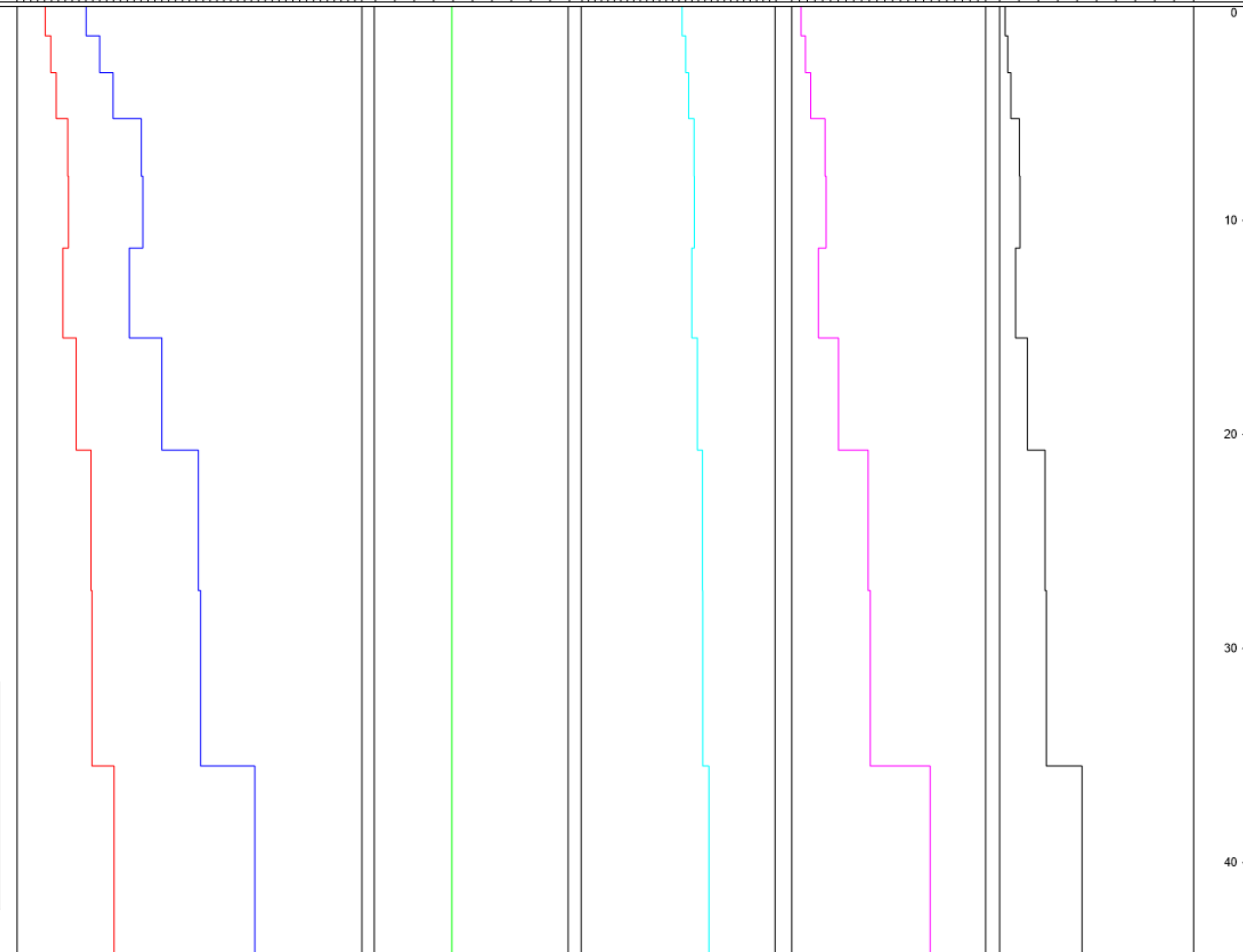


Immagine di dispersione A1608GF816MaswL1





COMMITTENTE: Comune di Bologna
CANTIERE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna
PROVA: MASW a 1 Shot
DATA DI ESECUZIONE: 13/01/2022

REPERTORIO FOTOGRAFICO





COMMITTENTE: Comune di Bologna

CANTIERE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

UBICAZIONE PROVAA1608GF816Hvsr

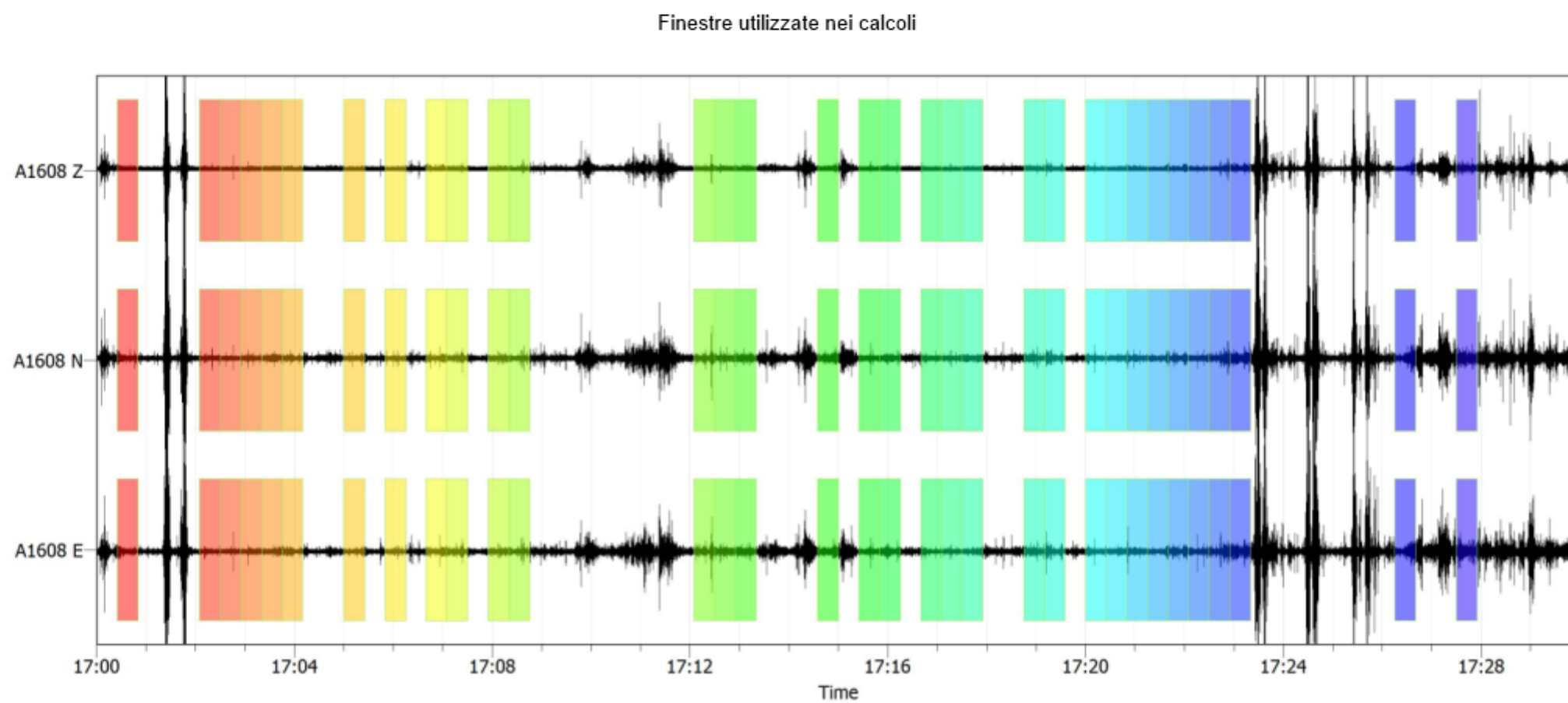
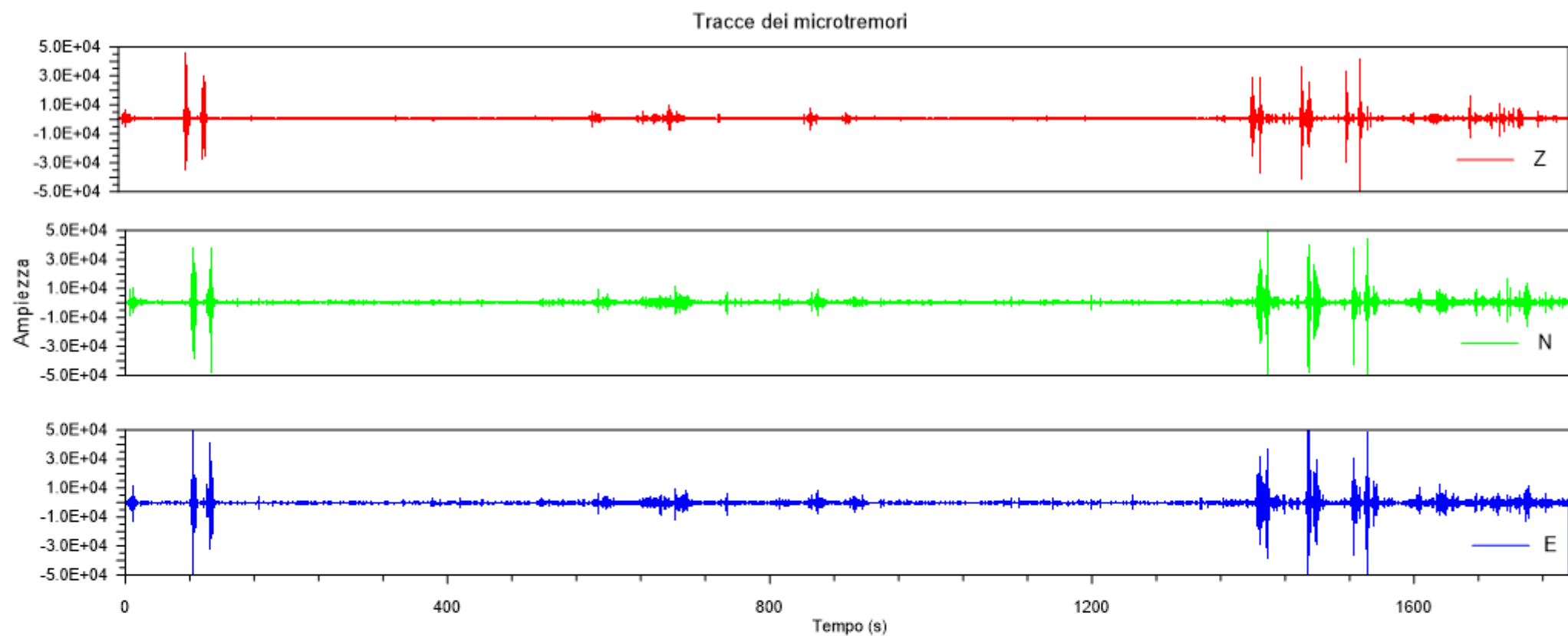




Committente: Comune di Bologna

Prova: HVSR1 Località: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna Data: 20 gennaio 2022

Segnale acquisito e "finestre" utilizzate nei calcoli



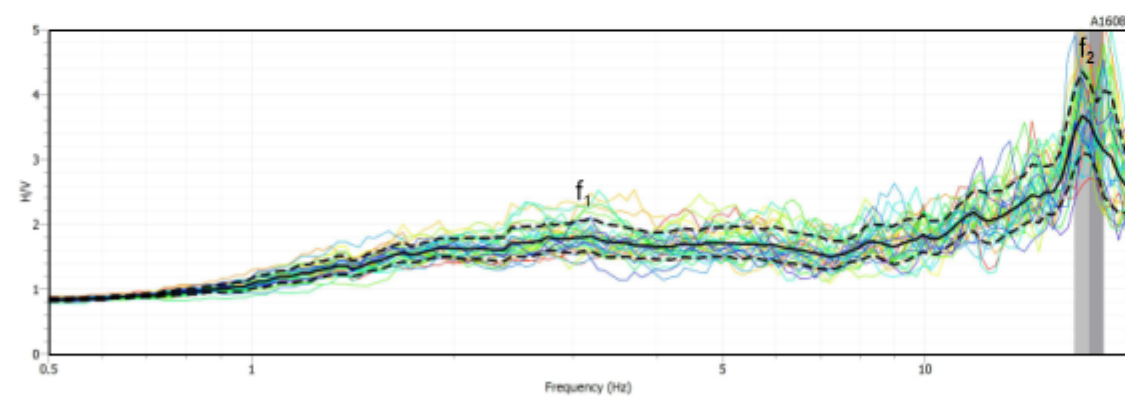


Committente: Comune di Bologna

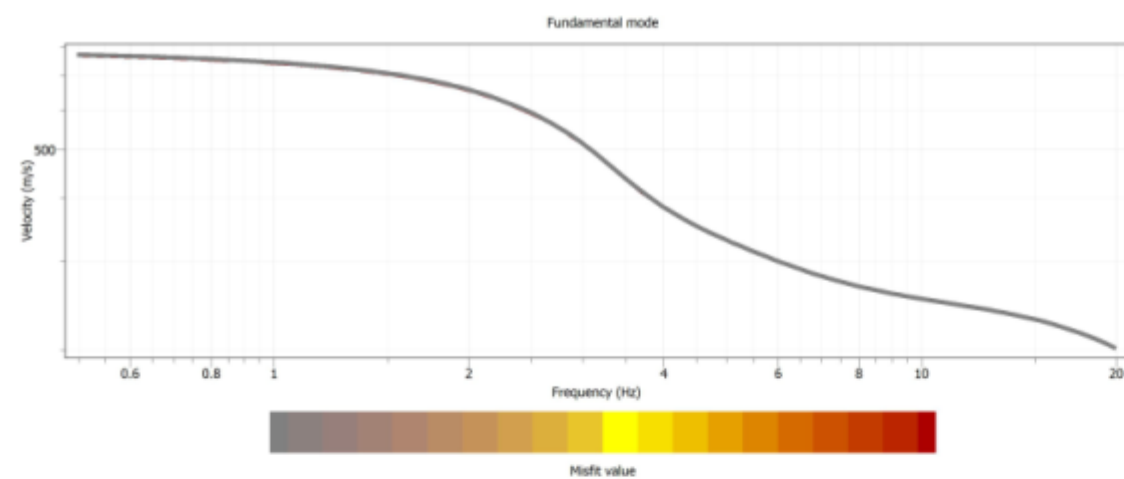
Prova: HVSR1 Località: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna Data: 20 gennaio 2022

Analisi del segnale

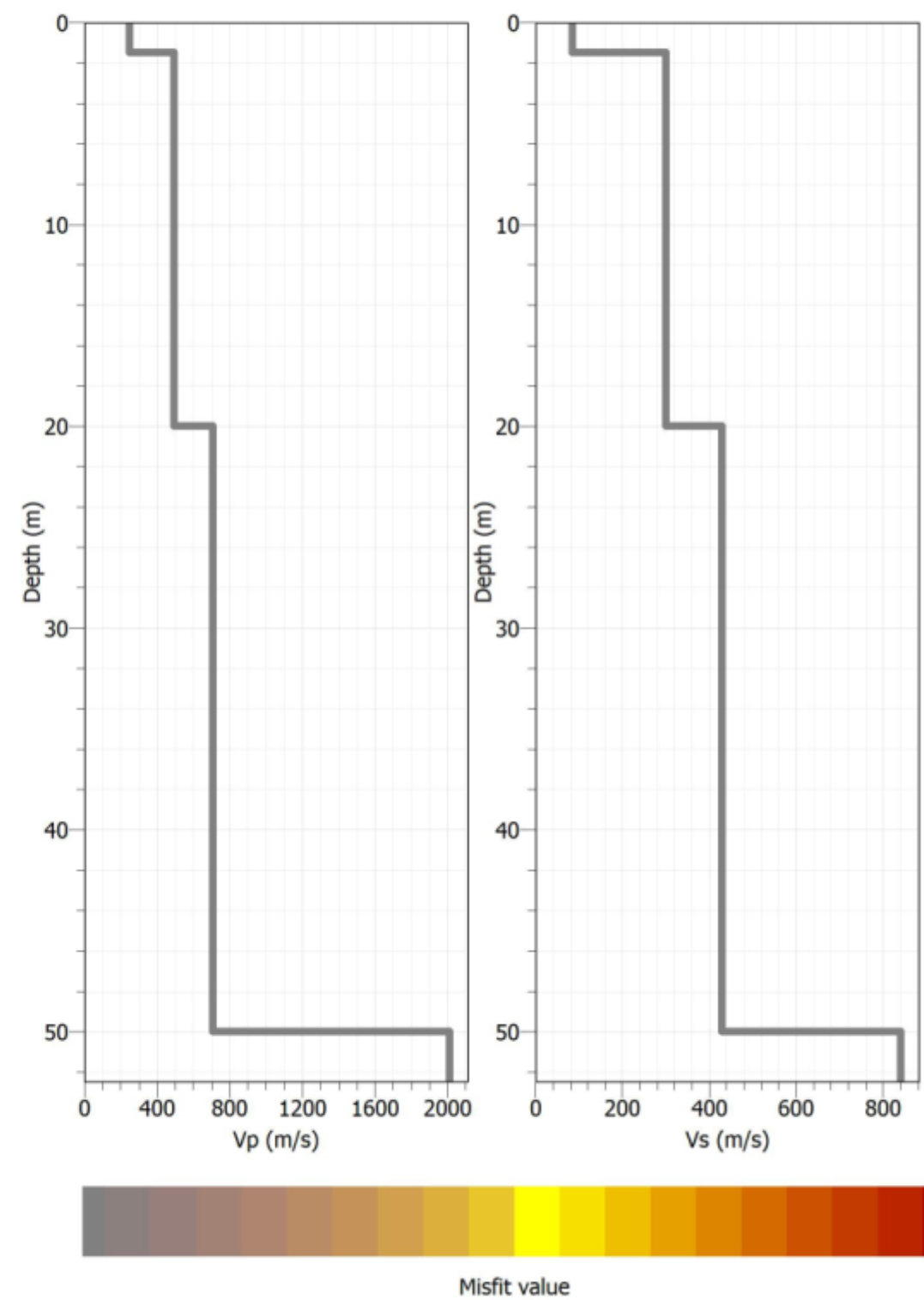
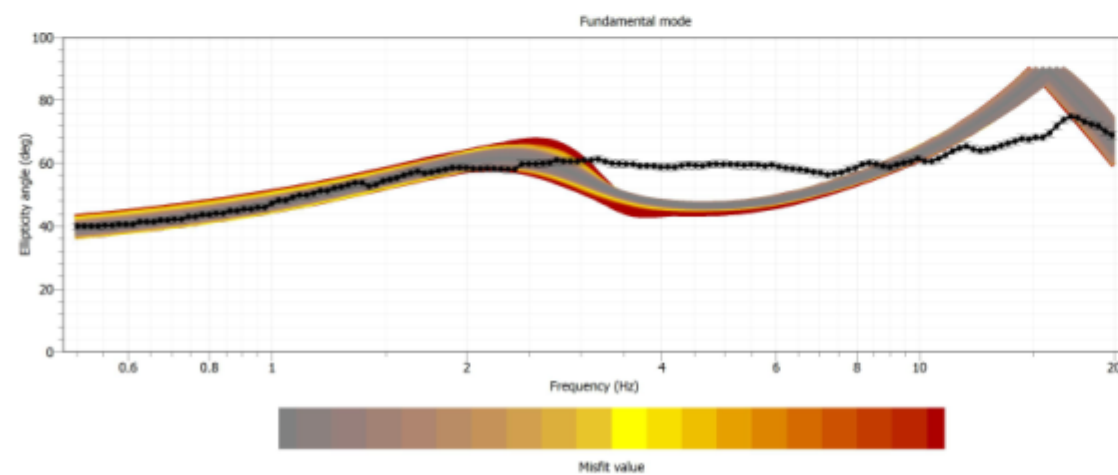
Curva HVSR



Dispersione Onde di Rayleigh



Elitticità



Interpretazione sismostratigrafica



COMMITTENTE: Comune di Bologna
CANTIERE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna
PROVA: HVSR
DATA DI ESECUZIONE: 20/01/2022

REPERTORIO FOTOGRAFICO

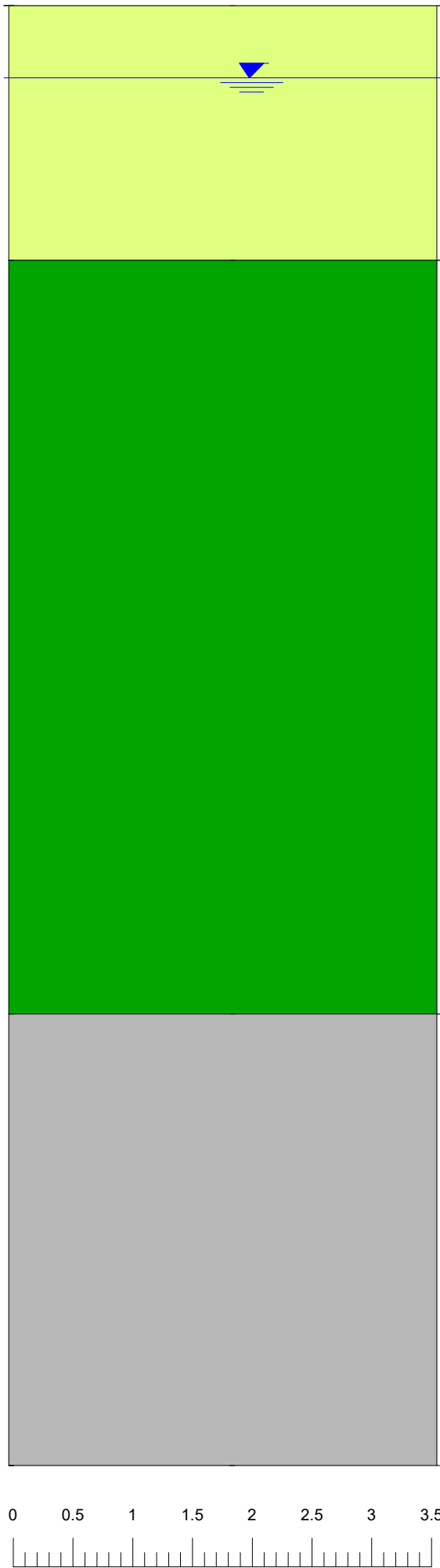




Progetto: Scuole Avogli - Nuovo plesso scolastico Committente: Comune di Bologna - Bologna D.L.Geologica: CGA Studio

Ubicazione: Via Saragozza 238- Bologna

MODELLO GEOLOGICO SU BASE SISMOSTRATIGRAFICA



- Unità 1 - Terreni superficiali -Limi da sabbiosi ad argillosi
- Unità 2 - Formazione detensionata e alterara - Limi sabbiosi ad argillosi con rare ghiaie
- Unità 3 - Formazione detensionata - argille e marne



Studio Tecnico Associato Consulenze di Geologia e Ambiente del Dott. Geol. F. Barbieri e del Dott. Geol. M. Ropa
Via E. Fermi n° 11/A - 40017 SAN GIOVANNI IN PERSICETO (BO) Tel. +39 051 - 6871113 Fax +39 051 6874328
C.F. e Partita IVA 04112290376
Email: cgastudio@cgstudio.eu

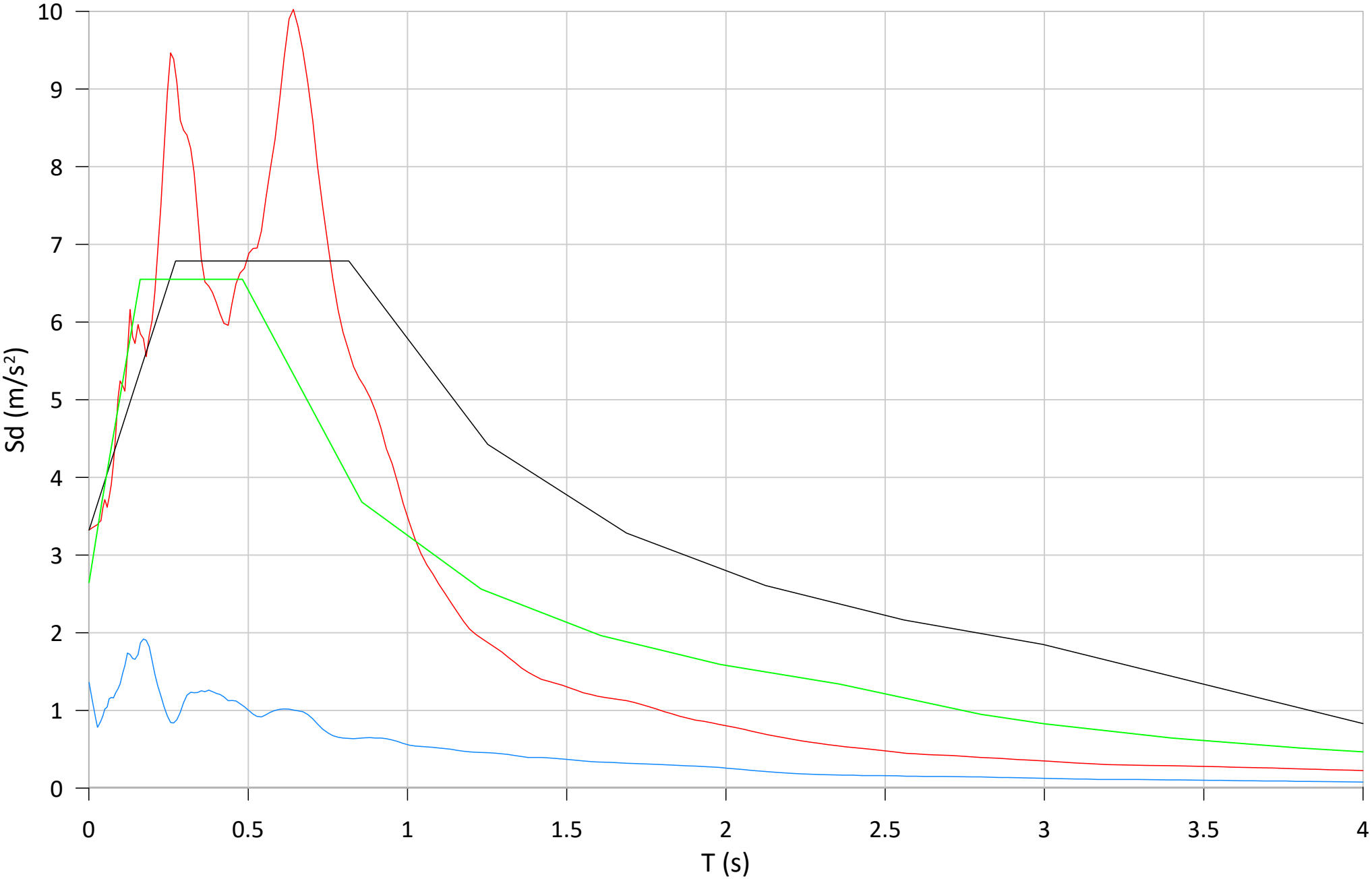
APPENDICE 3

- ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE

- Spettri di output - Suolo C - SLV



Spettri di OutPut - Suolo C - SLV



Legenda

Spettro medio alla superficie

Spettro medio al BedRock

Spettro normalizzato alla superficie

Spettro di normativa

Fattori di amplificazione di Housner

Simbologia adottata
Hi Intensità di Housner in ingresso, espressa in [m]
Ho Intensità di Housner in uscita, espressa in [m]
Ti Periodo iniziale di riferimento, espresso in sec.
Tf Periodo finale di riferimento, espresso in sec.
FA Fattore di amplificazione

H _i (m)	H _o (m)	T _i (s)	T _f (s)	FA
0.035	0.133	0.1	0.5	3.798
0.054	0.386	0.5	1	7.198
0.054	0.386	1	2.5	7.198

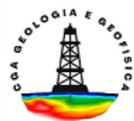


Studio Tecnico Associato Consulenze di Geologia e Ambiente del Dott. Geol. F. Barbieri e del Dott. Geol. M. Ropa
Via E. Fermi n° 11/A - 40017 SAN GIOVANNI IN PERSICETO (BO) Tel. +39 051 - 6871113 Fax +39 051 6874328
C.F. e Partita IVA 04112290376
Email: cgastudio@cgstudio.eu

APPENDICE 4

- MODELLAZIONE GEOTECNICA

- Modello geotecnico



Progetto: Scuole Avogli - Nuovo plesso scolastico

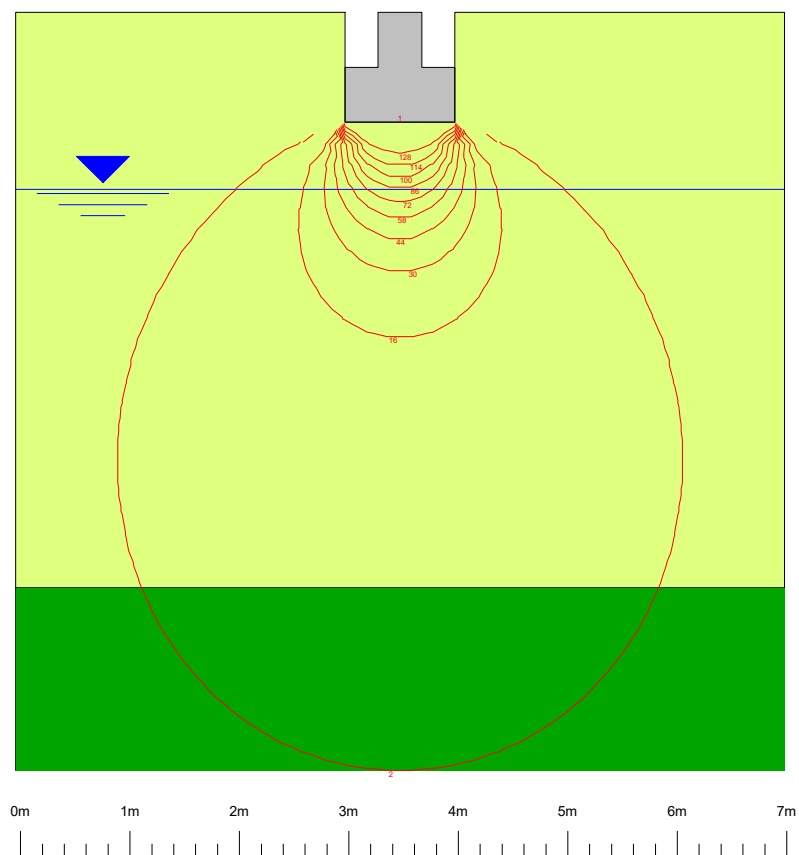
Committente: Comune di Bologna - Bologna

Ubicazione: Via Saragozza 238- Bologna

D.L.Geologica: CGA Studio

MODELLO GEOTECNICO

Diffusione dei carichi verticali



PROPRIETA' GEOTECNICHE Da letteratura e da stime da dati sismici (Necessitano di verifica)

	ϕ' (°)	C' (kPa)	ϕ_u (°)	C_u (kPa)	γ' (kN)	E (kPa)
	22.06	4.40	-	-	15.46	3031
	36.51	2.27	-	90.2	17.02	68347



COMMITTENTE: Comune di Bologna

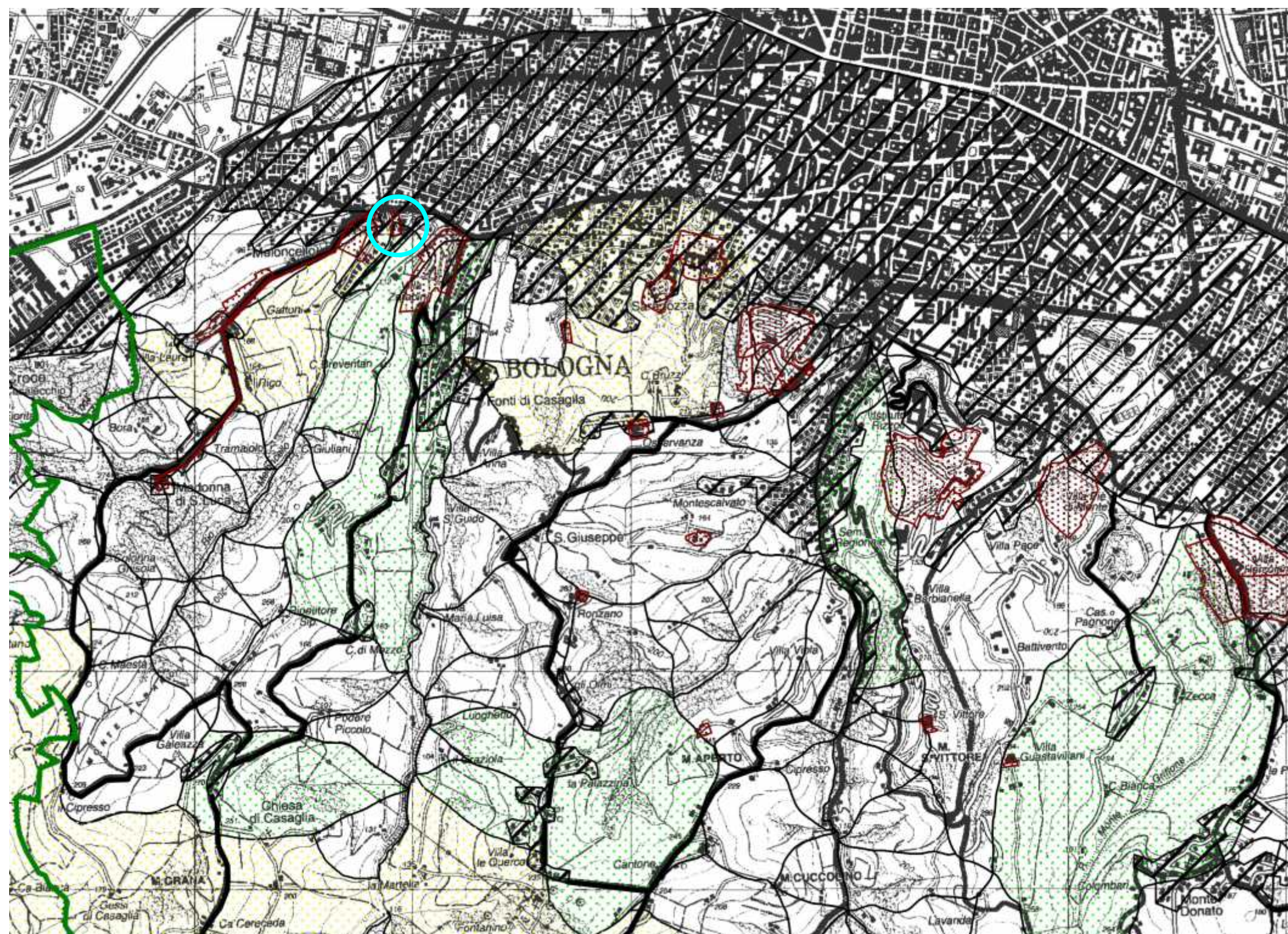
UBICAZIONE: Scuole Avogli - Via Saragozza 238 - Bologna

LAVORO: Relazione geologica, geotecnica e sismica preliminare

RIFERIMENTO PRATICA: A 1608 - GF 816

Autorità di Bacino del Reno - PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO

PSAI - Tavole 1.2, 1.4 Rischio da frana e assetto dei versanti



LEGENDA:

- R4 - RISCHIO MOLTO ELEVATO (ART.11)
- R3 - RISCHIO ELEVATO (ART.11)
- R2 - RISCHIO MEDIO (ART.11)
- R1 - RISCHIO MODERATO (ART.11)

Area indagine

Non in scala