

Comune di Bologna

NUOVO OSPEDALE
PRIVATO ACCREDITATO
VILLA ERBOSA S.P.A



Progetto Preliminare

Committente

Ospedale Privato Accreditato "Villa Erbosa" S.p.a
Via dell'Arcoveggio 50/2
40129 Bologna (BO)

Raggruppamento temporaneo progettisti

Progetto Architettonico e coordinamento

Mario Cucinella Architects Srl
via F. Flora, 6 40129 Bologna Italia
T +39 051 631 3381 F +39 051 631 3316
mca@mcarchitects.it
www.mcarchitects.it
Certif. UNI EN ISO 9001:2008 n°91580

mario-cucinella - architects

MC A

Progetto Strutture

Bosi e associati - Studio di ingegneria
via H.C. Andersen 8, 24128 Bergamo

Progetto Impianti meccanici

Studio Tecnico Associato Parenti
via Fratelli Solari 17, 29027 Gariga di Podenzano (PC)



Progetto Impianti elettrici e speciali

Ing. Franco Palù
Galleria C. Levi 1, 42020 San Polo d'Enza (RE)

Progetto Botanico e pratiche R.I.E.

Riccardo Rigolli_agronomo
via Begatto 1, 40125 Bologna

Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione

Dott. Ing. Giuseppe Safina

Titolo tavola

STUDIO DI COMPATIBILITA' AMBIENTALE - ALLEGATO B SISMICA DI TERZO LIVELLO

Codice consegna				Dis.	Contr.	Appr.
HVE_V_G_RT				CR	MD	MC
Data	Scala	Tipo	Rev	N. tavola		
27/09/2019	----	G	01	0003B		



COMUNE DI BOLOGNA

STUDIO GEOLOGICO E SISMICO DEI
TERRENI DEL PRIMO SOTTOSUOLO DI
UN'AREA SITA IN VIA DELL'ARCOVEGGIO
N. 48 PER LA QUALE È RICHIESTA UNA
VARIANTE AL POC. (LOTTI A+B).

Committente:

– Villa Erbosa S.p.A.



Codice Lavoro: 2018.095/RG

Revisione 1.0 Settembre 2019

GEO-PROBE

– **Studio Geologico Associato** –

Via Cimarosa, 119 – Casalecchio di Reno (BO) – Telefono 051.613.51.18

email: geoprobe@geo-probe.com

INDICE

1. PREMESSA	1
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3. SITUAZIONE MORFOLOGICA E GEO-LITOLOGICA GENERALE	4
4. INDAGINE GEOGNOSTICA	9
5. LITOLOGIA E CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEI TERRENI.....	12
6. MODELLAZIONE GEOTECNICA DEL SITO.....	14
7. PERICOLOSITÀ E CLASSIFICAZIONE SISMICA	15
8. MICROZONAZIONE SISMICA	17
9. PARAMETRI SISMICI DEL SITO	19
10. DEFINIZIONE DELLA RSL MEDIANTE ANALISI NUMERICA	21
10.1 Dati generali	21
10.2 Elaborazione.....	22
11. RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI.....	34
12 VALUTAZIONE INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE.....	37
13. STIMA DEI CEDIMENTI INDOTTI DALL' AZIONE SISMICA	38
14.A. SCHEDA DI SINTESI LOTTO A.....	39
14.B. SCHEDA DI SINTESI LOTTO B	41

ALLEGATI:

- diagrammi penetrometrie con punta elettrica e piezocono;
- stratigrafie sondaggi a carotaggio continuo;
- indagine sismica;
- classificazione orientativa dei terreni attraversati
(Robertson, 1990);
- procedure di calcolo RSL;
- schema riassuntivo indice di liquefazione;
- schema riassuntivo cedimenti post-sismici.

* * *

1. PREMESSA

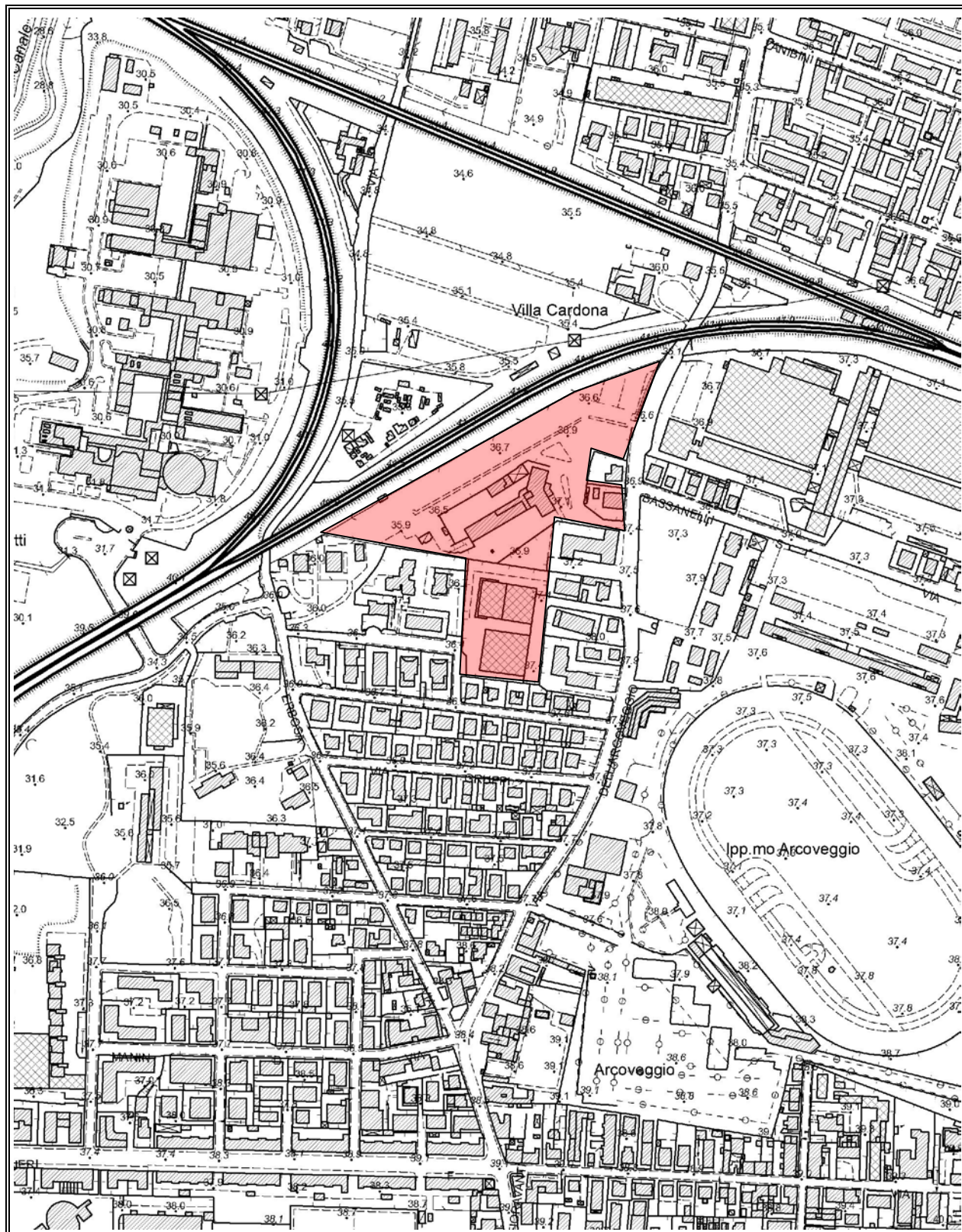
A seguito dell'incarico ricevuto dall'Ospedale privato Villa Erbosa S.p.A., si trasmette, in conformità con le normative vigenti, la seguente relazione geologica e sismica riguardante lo studio dei terreni del primo sottosuolo di un'area per la quale è richiesta la variante al P.O.C.

L'area in esame si ubica in via dell'Arcoveggio n. 48, nella prima periferia Nord di Bologna, nel Comune omonimo (TAV. 1: estratto C.T.R. Scala 1:5.000; elemento n. 221053 – Bologna Nord).

Il presente studio è stato articolato nei seguenti punti:

- a) analisi e descrizione della situazione morfologica e geo-litologica generale;
- b) determinazione della natura dei terreni costituenti il primo sottosuolo;
- c) determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche degli stessi;
- d) caratterizzazione e modellazione geologico-geotecnica del sito;
- e) modellazione sismica dei terreni di fondazione;
- f) analisi della risposta sismica locale;
- g) scheda di sintesi.

TAV. 1 - UBICAZIONE AREA IN ESAME



Area in esame

Scala 1:5.000

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La stesura della seguente relazione è stata compiuta in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento di seguito elencate:

- "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". D.M. 11 Marzo 1988.
- Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". Circ. Min. LL. PP. n. 30483, 24 Settembre 1988.
- AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977.
- AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio, Maggio 1990 (edizione provvisoria).
- Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, Settembre 1988.
- ISRM International Society for Rock Mechanics: Rock characterization testing and monitoring suggested methods - Commission on Testing Methods; 1981.
- "Norme tecniche per le costruzioni". D.M. 14 Gennaio 2008 (G.U. n. 29 del 04/02/08, supplemento ordinario n. 30).
- Delibera della Giunta della Regione Emilia Romagna progr. N. 1661/2009 del 2 novembre 2009.
- Ordinanza del Commissario Delegato per la Ricostruzione n. 70 del 13/11/2012.
- "Raccomandazioni per la redazione della relazione geologica ai sensi delle N.C.T." a cura del Centro Studi del C.N.G.
- "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni". D.M. 17 Gennaio 2018 (G.U. n. 42 del 20/02/18, supplemento ordinario n. 8).
- Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17/01/2018. Circolare Cons. Sup. LL.PP. n. 7/2019.
- Delibera della Giunta della Regione Emilia Romagna progr. N. 630/2019 del 29 aprile 2019.

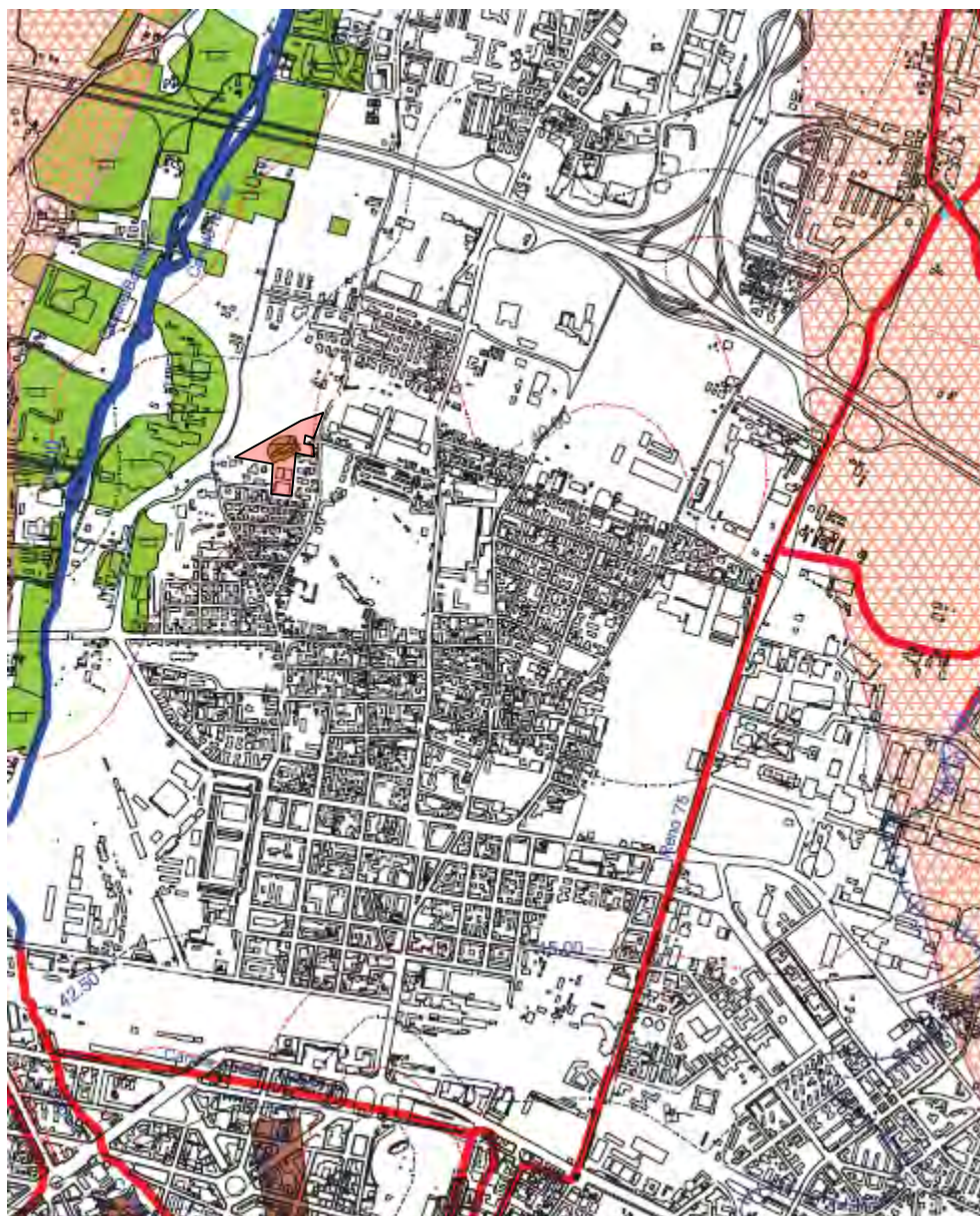
3. SITUAZIONE MORFOLOGICA E GEO-LITOLOGICA GENERALE

3.1. Lineamenti geomorfologici

L'area in esame si ubica nella fascia Nord della città di Bologna, caratterizzata morfologicamente da leggere ondulazioni che degradano progressivamente in direzione dell'alta Pianura Padana.

Più esattamente si ubica ad una quota media di 38,00 m s.l.m., in un'area fortemente antropizzata e soggetta a discreti rimaneggiamenti della morfologia originaria, che si può comunque considerare pressoché pianeggiante o di bassissima acclività.

Come riportato nell'estratto della Carta Geomorfologica di Pianura – TAV. 3.2 del QC del PSC di Bologna di cui si riporta uno stralcio, per l'area in esame, sotto l'aspetto morfodinamico non si segnalano processi in atto; l'attuazione dell'intervento non determinerà modifiche all'assetto morfologico dell'area.

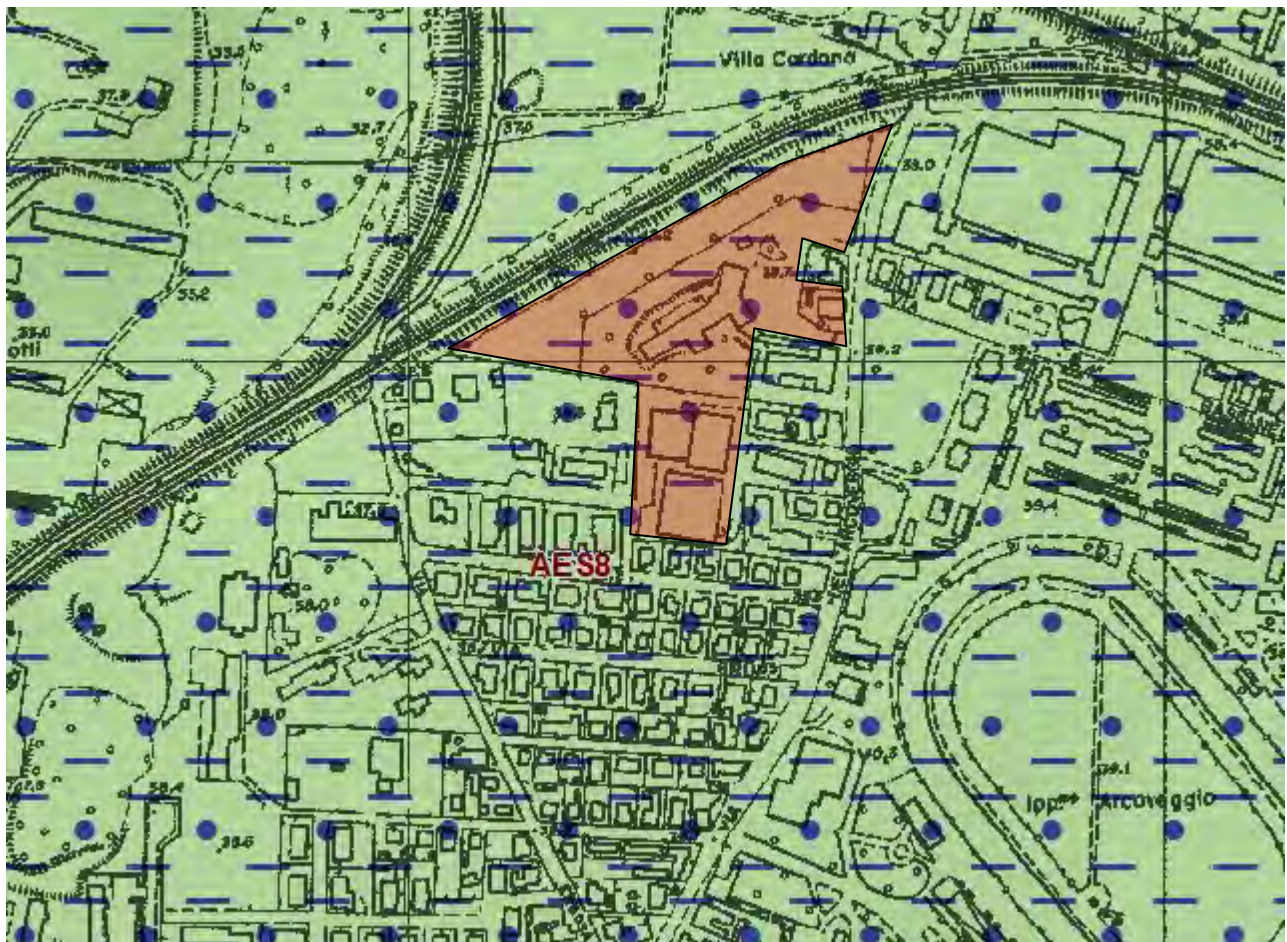


3.2. Assetto geolitologico

Dal punto di vista geo-litologico, l'area ricade in un ambiente deposizionale di facies di conoide caratterizzato dall'alternanza sia in senso verticale che orizzontale di sedimenti alluvionali fini (argille limose e/o argille sabbiose) e grossolani (ghiaie e sabbie ghiaiose), raccordabili alle zone terrazzate di età quaternaria; la litologia principale è caratterizzata da depositi a matrice sabbiosa e ghiaiosa ricoperti da uno spessore variabile di materiali fini.

Con riferimento alla Carta Geologica della Regione Emilia Romagna, nella zona di studio affiorano terreni appartenenti al Subsistema di Ravenna (AES8), che rappresenta la porzione sommitale del Sistema Emiliano Romagnolo Superiore e comprende la maggior parte dei depositi quaternari affioranti.

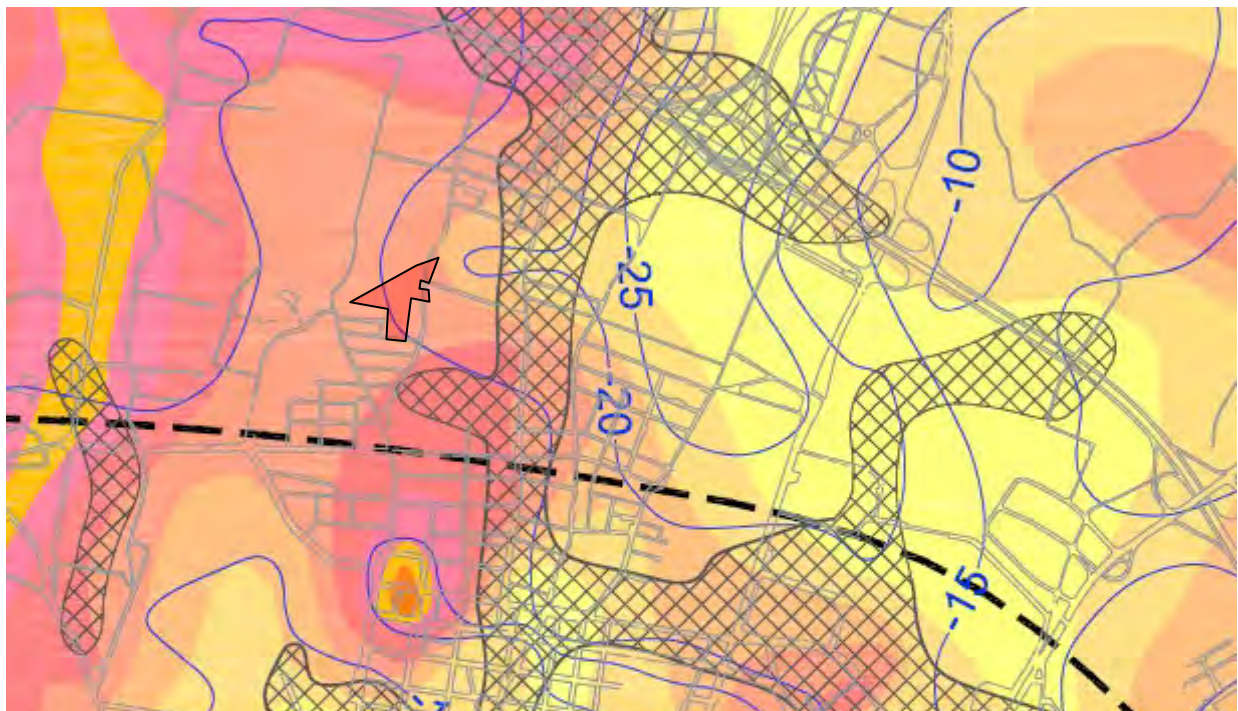
Nell'area in esame, la parte sommitale è costituita da depositi limosi sabbiosi di piano alluvionale, con transazioni laterali a sedimenti prevalentemente sabbiosi.



La litologia superficiale dell'area in esame, con riferimento alla TAV. 2 – Litologia superficiale del Qc del PSC di Bologna, risulta rappresentata dalla presenza di limi da argillosi a sabbiosi alternati a limi e sabbie fini (DL).



La carta E1 – Carta del sottosuolo del QC del PSC di Bologna, individua per l'area in esame una profondità del tetto delle ghiaie tra 15,00 m e 20,00 m dal piano campagna, quota confermata anche dalle indagini eseguite

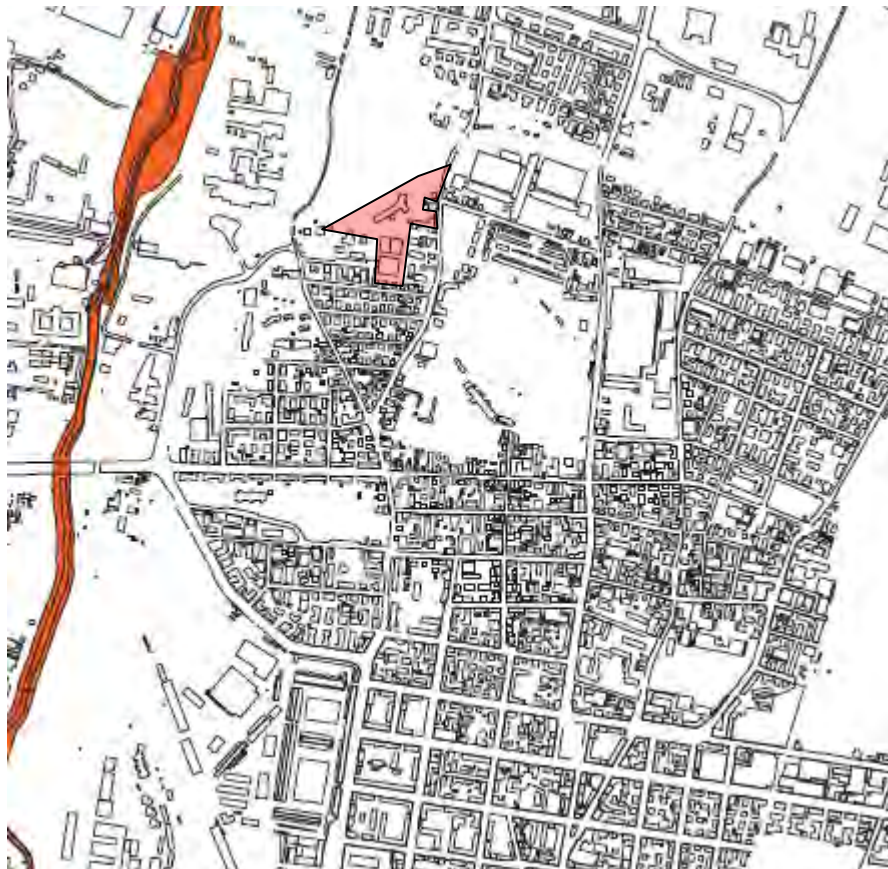


3.3. Idrografia

L'idrografia primaria superficiale, in gran parte occultata dagli interventi di urbanizzazione, è rappresentata dallo scolo Savena Abbandonato e dal Canale Navile Battiferro che sviluppano il proprio corso rispettivamente ad Est e Ovest dell'area in esame.

La naturale idrografia ed idrologia superficiale si è venuta completamente a modificare per la disposizione dei terreni circostanti adibiti ad uso residenziale, industriale e di viabilità; gli originali fossi di scolo sono stati abbandonati o deviati per necessità legate alle opere di urbanizzazione.

Con riferimento alla TAV 10 – Rischio idraulico del QC del PSC di Bologna di cui si riporta uno stralcio, non si evidenziano criticità idrauliche o problemi di esondabilità.



3.4. Condizioni idrogeologiche

Il sottosuolo è caratterizzato da un'alternanza litologica che individua una struttura idrogeologica schematizzabile in un acquifero multifalda costituito da orizzonti sovrapposti e separati da corpi litologici dotati di bassa conducibilità idraulica.

Lo spessore del primo acquifero (A1) è dell'ordine di 40,00÷50,00 m e poggia su un acquitrando a bassa conducibilità idraulica costituito da argille prevalenti.

Il primo acquifero è sede di una prima falda libera, il cui livello statico si attesta ad una profondità media di 6,00÷8,00 m dal p.c. attuale e da una serie di falde in pressione a profondità comprese tra 15,00 m e 25,00 m

L'acquifero A2 è sede di una falda profonda confinata, caratterizzata da livelli piezometrici differenziati che nell'area in esame si attestano a profondità superiori ai 45,00 m dal p.c. attuale.



4. INDAGINE GEOGNOSTICA

Per il lotto A, allo scopo di verificare la successione stratigrafica che caratterizza i terreni del primo sottosuolo e valutare le caratteristiche fisico meccaniche degli stessi, sono state eseguite indagini geognostiche in sito e un'indagine sismica locale; per il lotto B sono state utilizzate indagini pregresse.

4.1. Indagine geognostica in sito

L'indagine geognostica in sito, eseguita dalla Geo-Probe S.r.l sul lotto A, è consistita nell'esecuzione di n. 2 penetrometrie con punta elettrica e piezocono (CPTU) che rispetto al p.c. attuale hanno raggiunto la profondità di 20,00 m e 14,80 m.

Per il lotto B vengono utilizzati i dati dell'indagine eseguita nel 2014 consistita in n. 3 penetrometrie statiche con punta elettrica (CPTE) che, rispetto al p.c. attuale, hanno raggiunto profondità comprese tra 16,40 m e 18,20 m.

L'ubicazione di tutti i punti indagati viene riportata di seguito nella TAV.

2.

Per l'esecuzione delle prove con punta elettrica e piezocono è stato utilizzato un penetrometro statico montato su Unimog Mercedes 400L con cella di carico da 200 kN, che impiega una punta conica con apertura di 60° e superficie di 10 cm² per la misurazione della resistenza alla punta ed un manicotto di frizione (*friction jacket*) della superficie di 150 cm² per la misurazione dell'attrito laterale locale.

In aggiunta alla suddetta strumentazione si utilizza un filtro poroso situato immediatamente sopra alla estensione presente sulla punta conica, che permette di misurare la pressione dell'acqua interstiziale (pp) durante l'avanzamento.

Poiché tale pressione è legata al tipo di terreno e alla sua consistenza, il valore misurato permette di ottenere una descrizione dettagliata del profilo stratigrafico e, se combinato con la resistenza alla penetrazione misurata alla punta, anche un indice della storia tensionale del deposito.

I risultati delle penetrometrie statiche con punta elettrica e piezocono vengono rappresentati in forma diagrammatica nelle apposite tavole allegate, dove viene riportato il valore q_c (resistenza alla punta) il valore f_s (resistenza attrito laterale locale), espressi rispettivamente in MPa e kPa, il rapporto R_f (rapporto fra la resistenza laterale locale e la resistenza alla punta, espresso in %), che orientativamente ci permette una classificazione dei terreni attraversati, la pressione interstiziale dei pori (pp), espressa in kPa, la velocità di avanzamento (F) e l'angolazione della strumentazione (Tilt) nel corso dell'avanzamento riferita alla verticale.

Le suddette letture vengono eseguite per avanzamenti di 1,0 cm.

4.2. Indagine sismica

Al fine di determinare il parametro V_{seq} , necessario a classificare il suolo di fondazione del sito e la profondità del bedrock sismico, per il lotto A da parte dello Studio Associato CGA è stata eseguita un'indagine sismica locale mediante metodologia MASW e misurazione del rumore sismico ambientale HVSR.

Per il lotto B vengono utilizzati i dati dell'indagine sismica locale eseguita nel 2011 da parte del Dr. Mirko Sita; la metodologia di indagine e l'elaborazione dei dati ottenuti viene riportata nelle apposite relazioni allegate.

TAV. 2 - UBICAZIONE INDAGINE GEOGNOSTICA



- ▼ Penetrometrie statiche con punta elettrica e piezocono
- ▼ Penetrometrie statiche con punta elettrica

5. LITOLOGIA E CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEI TERRENI

L'indagine geognostica eseguita ci consente di ricostruire con discreta precisione la litologia del primo sottosuolo e di valutare le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati.

Schematicamente possiamo ricostruire la seguente successione stratigrafica:

Lotto A

al tetto, al disotto di un orizzonte di terreno di riporto e/o di alterazione dello spessore medio di 1,00÷2,00 m, sino ad una profondità media di 5,30÷5,50 m, si alternano delle sabbie variabilmente limose di addensamento da medio a medio buono ($q_c = 1,9 \div 7,0$ MPa; $R_f = 1,1 \div 2,0$ %), di umidità da medio scarsa a media, e dei limi sabbiosi e/o argillose di consistenza da plastico tenera a plastica ($q_c = 0,8 \div 1,9$ MPa; $R_f = 4,0 \div 7,6$ %), a plastico dura - dura ($q_c = 2,0 \div 5,8$ MPa; $R_f = 4,2 \div 5,6$ %), dove i valori più elevati sono dovuti a processi di sovraconsolidamento per essiccazione.

Sotto si evidenziano delle argille limose e/o viceversa, di consistenza da plastico tenera a plastica ($q_c = 0,6 \div 1,9$ MPa; $R_f = 4,0 \div 7,6$ %), di umidità da medio scarsa a medio elevata, inglobanti localmente sottili lenti sabbiose di addensamento da medio scarso a medio elevato ($q_c = 2,1 \div 11,2$ MPa; $R_f = 1,2 \div 2,0$ %).

A partire da 10,50÷11,10 m, e sino alla profondità indagata, si evidenziano delle argille limose e/o viceversa di consistenza da plastica a plastico dura ($q_c = 1,0 \div 2,2$ MPa; $R_f = 3,8 \div 5,6$ %) e delle sabbie variabilmente limose di addensamento da medio scarso a medio ($q_c = 2,2 \div 6,4$ MPa; $R_f = 1,0 \div 1,9$ %) ed umidità medio elevata, che localmente inglobano sottili lenti ghiaiose di addensamento medio elevato ($q_c = 7,5 \div 26,3$ MPa; $R_f = 0,4 \div 0,8$ %) su cui si è arrestata la penetrometria n. 2.

Al termine dell'indagine all'interno dei fori di prova non è stata rilevata la presenza di falde freatiche di superficie e/o circolazioni idriche significative, anche se in passato indagini eseguite nella stessa area hanno evidenziato la presenza di acqua a partire da una profondità media di 5,80÷6,80 m.

Lotto B

al tetto, al disotto di un orizzonte di terreno di riporto e/o di alterazione dello spessore di 0,50÷1,00 m, sino ad una profondità variabile da 3,50 m a 4,40 m, sono presenti delle sabbie variabilmente limose di addensamento da medio a medio buono ($q_c = 1,9 \div 6,8$ MPa; $R_f = 1,1 \div 2,0$ %), di umidità da medio scarsa a media, inglobanti, specie nella fascia Est (CPTE 3), sottili lenti limo sabbiose e/o argillose di consistenza da plastico tenera a plastica ($q_c = 0,8 \div 2,0$ MPa; $R_f = 2,6 \div 7,2$ %).

Sotto si evidenziano delle argille limose e/o viceversa, di consistenza da plastico tenera a plastica ($q_c = 0,5 \div 1,9$ MPa; $R_f = 3,0 \div 7,6$ %), di umidità da medio scarsa a medio elevata, inglobanti localmente al letto dell'intervallo sottili lenti sabbiose di addensamento medio scarso ($q_c = 2,0 \div 2,3$ MPa; $R_f = 1,8 \div 2,0$ %).

Da una profondità variabile da 15,50 m a 16,90 m, e sino alla profondità indagata, si evidenziano delle sabbie variabilmente limose di addensamento da medio scarso a medio ($q_c = 2,3 \div 6,1$ MPa; $R_f = 1,2 \div 1,9$ %) ed umidità medio elevata, che da una profondità variabile da 16,30 m a 17,50 m, e per circa 2,00 m, sono sostituite da ghiaie in matrice sabbiosa a tratti prevalente, di addensamento da medio scarso a medio elevato ($q_c = 5,4 \div 46,4$ MPa; $R_f = 0,3 \div 0,8$ %) ed umidità da media ad elevata.

Al termine dell'indagine all'interno dei fori di prova e di sondaggio non è stata rilevata la presenza di falde freatiche di superficie e/o circolazioni idriche significative, anche se in passato indagini eseguite in aree limitrofe hanno evidenziato la presenza di acqua a partire da una profondità media di 7,50÷8,50 m.

Per un maggior dettaglio in allegato viene riportata la litologia dei terreni del primo sottosuolo rilevata in corrispondenza delle penetrometrie statiche e ricostruita mediante la teoria di Robertson (1990).

6. MODELLAZIONE GEOTECNICA DEL SITO

La caratterizzazione geotecnica del sito viene fatta ricostruendo un modello in termini di unità geotecniche del volume significativo del terreno inteso come la parte di sottosuolo influenzata direttamente o indirettamente dalla costruzione dell'opera e che influenza l'opera stessa.

Ciascuna unità geotecnica (U.G.) è ottenuta correlando i dati stratigrafici e i dati di resistenza misurati nel corso dell'indagine geognostica in modo da suddividere il volume significativo in elementi omogenei.

Sulla base dei risultati dell'indagine geognostica, con riferimento il p.c. attuale, è possibile distinguere il terreno secondo le unità geotecniche indicate nelle tabelle successive.

Lotto A

U.G.	Profondità m da p.c.		Litologia prevalente	qc MPa	γ (kN/mc)	Cu (kPa)	φ (°)	Dr (%)
	da	a						
0	0,00	1,00÷2,00	R/A	-	-	-	-	-
A	2,20÷2,80	5,30÷5,50	S/SL	1,9÷7,0	18,0÷18,5	0	36÷41	30÷65
A1	1,00÷2,00	5,00÷5,50	LSA	0,8÷5,8	18,9÷19,7	40÷230	-	0
B	5,30÷5,50	10,50	AL/LA	0,6÷1,9	18,8÷19,3	30÷95	-	0
B1	8,40	11,10	S/SL	2,1÷11,2	18,0÷18,5		34÷37	26÷49
C	10,50÷11,10	fine indag.	AL/LA	1,0÷2,2	19,0÷19,3	50÷107	-	0
C1	16,00	fine indag.	S/SL	2,2÷6,4	18,0÷18,5	0	34÷35	24÷30
C2	14,60	fine indag.	G/GS	7,5÷26,3	18,5÷18,6	0	34÷41	28÷74

Lotto B

U.G.	Profondità m da p.c.		Litologia prevalente	qc MPa	γ (kN/mc)	Cu (kPa)	φ (°)	Dr (%)
	da	a						
0	0,00	0,50÷1,00	R/A	-	-	-	-	-
A	0,50÷1,00	3,50÷4,40	S/SL	1,9÷6,8	18,5÷18,6	0	32÷36	32÷62
A1	1,10÷1,20	1,80÷3,70	LSA	0,8÷2,0	18,9÷19,2	40÷100	-	0
B	3,50÷4,40	15,50÷16,90	AL/LA	0,5÷1,9	18,8÷19,2	25÷95	-	0
C	15,50÷16,90	16,30÷17,50	S/SL	2,3÷6,1	18,5÷18,6	0	28÷32	20÷34
D	16,30÷17,50	fine indag.	G/GS	5,4÷46,4	18,5÷18,7	0	35÷39	59÷89

R/A = terreno di riporto e/o di alterazione;

AL/LA = argille limose e/o viceversa;

LSA = limi sabbiosi localmente argillosi;

S/SL = sabbie localmente limose;

G/GS = ghiaie in matrice sabbiosa

7. PERICOLOSITÀ E CLASSIFICAZIONE SISMICA

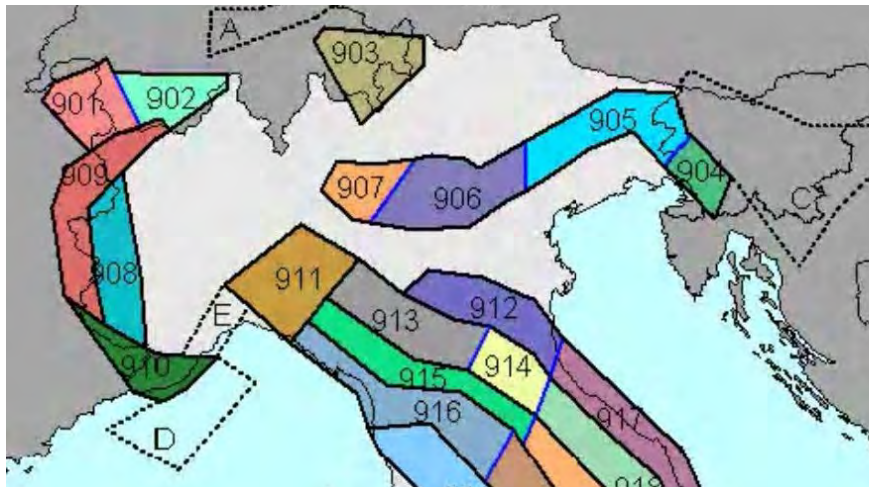
La pericolosità e il rischio sismico del territorio nazionale sono stati affrontati dal Servizio Sismico Nazionale utilizzando il calcolo probabilistico di Cornell, in grado di considerare tutte le possibili sorgenti influenzanti di un sisma.

La pericolosità sismica di base è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni ideali di sito di riferimento con superficie topografica orizzontale di categoria A.

Il Comune di Bologna (TAV. 3 – Mappa di pericolosità sismica) presenta un'accelerazione al suolo tipo A con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni $PGA = 0,150 - 0,175g$.

La Magnitudo dell'area si ottiene, come riportato negli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica – Gruppo di Lavoro MS 2008" sulla base della zonazione sismogenetica ZS 9, secondo la quale la sismicità può essere distribuita in 36 zone, a ciascuna delle quali è associata una magnitudo massima.

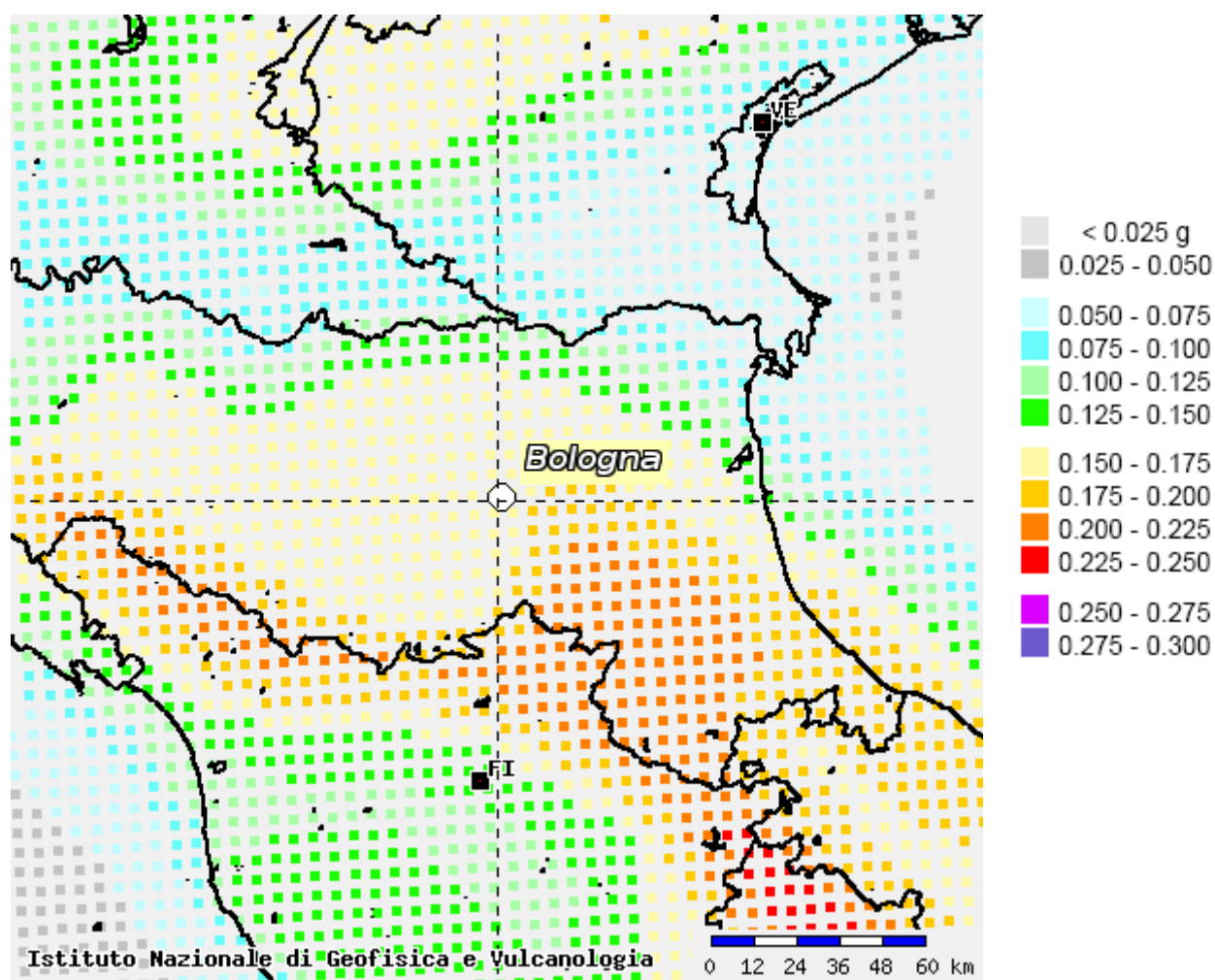
Come evidenziato dalla mappa delle zone sismogenetiche di cui si riporta uno stralcio, l'Emilia Romagna ricade nelle zone 911-914 alle quali è attribuito un valore di M pari a 6,14.



La pericolosità sismica in un generico sito viene definita in termini di valori di accelerazione orizzontale massima e di spettri di risposta nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale, in corrispondenza dei punti di un reticolo e per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno ricadenti in un intervallo di riferimento compreso tra 30 e 2475 anni.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presenti nel sito in esame e della morfologia di superficie.

TAV. 3 – MAPPA DI PERICOLOSITÀ SISMICA

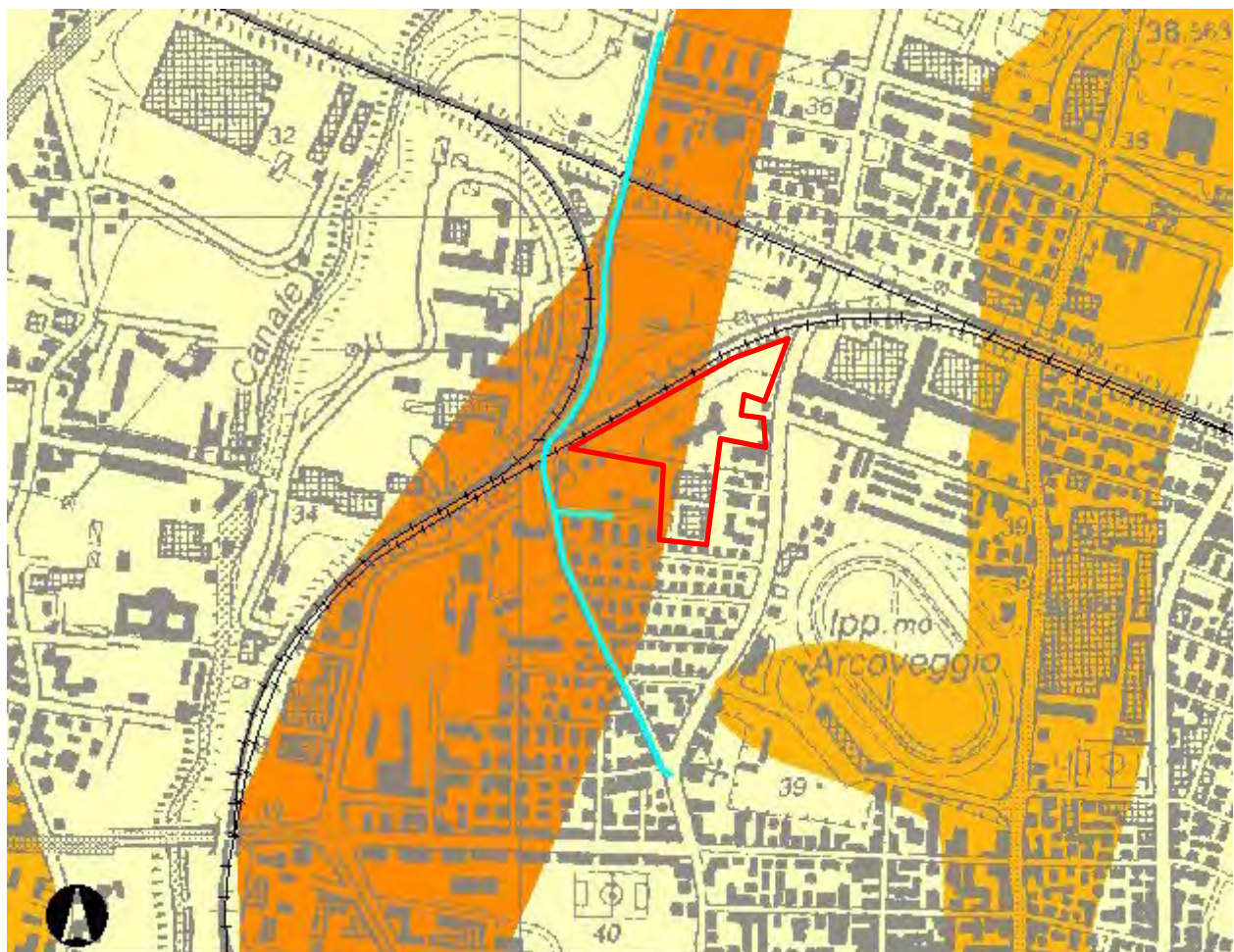


8. MICROZONAZIONE SISMICA

Nella Tavola 2C del PTCP della Provincia di Bologna “Rischio Sismico – Carta provinciale degli effetti locali attesi”, l’area in esame è classificata in parte come L1 “Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale presenza di terreni predisponenti la liquefazione” e in parte come A – “Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche.

Per tali aree la normativa provinciale (Art. 6.14) richiede approfondimenti con studi geologici finalizzati alla definizione della risposta sismica locale e alla verifica dei caratteri predisponenti la liquefazione, da espletarsi nelle fasi di POC e/o PUA.

STRALCIO TAVOLA 2C PTCP



- A - Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche
- L1 - Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale presenza di terreni predisponenti la liquefazione

Scala 1:10.000

Per la quantificazione della risposta sismica locale, il D.G.R. 630/2019 propone la definizione semi quantitativa degli effetti di amplificazione locale semplificata (secondo livello di approfondimento); l'amplificazione è quantificata secondo i parametri FA PGA, FA SA e FA SI che sono desunti dagli abachi riportati nell'Allegato A2 della suddetta delibera riferiti a grandi situazioni morfologiche stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche, e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Le variabili da inserire negli abachi per la stima dell'amplificazione locale sono la velocità equivalente delle onde di taglio nel sottosuolo (V_{S30} o V_{SH}) e gli spessori dei sedimenti superficiali che possono amplificare il moto sismico e/o la profondità del bedrock sismico.

I dati del sottosuolo permettono di attribuire l'area di studio al macro contesto geologico "Pianura 2" caratterizzato dalla presenza di sedimenti alluvionali prevalentemente fini e dalla presenza di un'importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100,00 m dal p.c. e dal tetto del substrato rigido a circa 150,00 m.

Le indagini sismiche eseguite hanno evidenziato per il lotto A una V_{S30} di 269 m/sec e per il lotto B di 218 m/sec

I parametri della microzonazione sismica semplificata sono riportati nelle tabelle seguenti:

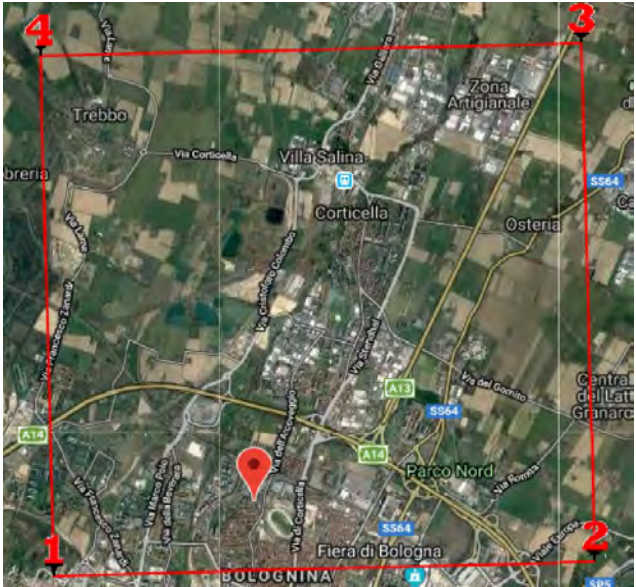
Lotto	Macroambito	V_{S30}	FA PGA
A	Pianura 2	269 m/sec	1,7
B	Pianura 2	218 m/sec	1,7

Lotto	Macroambito	V_{S30}	FA SA1 (0,1<T<0,5s)	FA SA2 (0,4<T<0,8s)	FA SA3 (0,7<T<1,1s)	FA SA4 (0,5<T<1,5s)
A	Pianura 2	269 m/sec	1,8	2,4	2,8	2,7
B	Pianura 2	218 m/sec	1,8	2,7	3,2	3,1

Lotto	Macroambito	V_{S30}	FA SI1 (0,1<T<0,5s)	FA SI2 (0,5<T<1,0s)	FA SI3 (0,5<T<1,5s)
A	Pianura 2	269 m/sec	1,9	2,7	2,9
B	Pianura 2	218 m/sec	2,0	3,0	3,3

9. PARAMETRI SISMICI DEL SITO

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono. Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di categoria A, definito al § 3.2.2 NTC18).

Coordinate del sito (WGS84)	Latitudine 44.5230 Longitudine 11.3444	
Strategia di progettazione	Vita nominale (Vn): 50 anni	
	Classe d'uso: II	
	Coefficiente d'uso (Cu): 1,0	
	ag: 0,166g	

Pericolosità sismica di base

Periodo di riferimento (Vr):	50	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLO:	30	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLD:	50	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLV:	475	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLC:	975	[anni]
Tipo di interpolazione:	Media ponderata	

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame.

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]	Distanza [m]
1	16730	44.5150	11.3175	2319.702
2	16731	44.5163	11.3875	3497.296
3	16509	44.5662	11.3858	5814.870
4	16508	44.5650	11.3157	5191.411

Parametri di pericolosità sismica.

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.052	2.478	0.258
SLD	50	0.065	2.490	0.272
SLV	475	0.166	2.418	0.303
SLC	975	0.214	2.438	0.306

10. DEFINIZIONE DELLA RSL MEDIANTE ANALISI NUMERICA

La procedura di calcolo adoperata per la valutazione della funzione di trasferimento utilizzando il software RSLIII della GeoStru, presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi 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;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Le procedure di calcolo utilizzate dal software della Geostru sono riportate in allegato.

10.1 Dati generali

La stratigrafia che caratterizza il modello per i primi 30 metri deriva dagli esiti delle prove geognostiche eseguite mentre per l'attribuzione della velocità delle onde sismiche di taglio V_s relativa ai differenti strati della colonna sismica, si sono considerati gli esiti delle indagini sismiche eseguite.

Stratigrafia Lotto A

n.	Prof.tà [m]	Spess. [m]	Terreno	Gmax [MPa]	γ . [kN/m ³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	15.4	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	99.97	19.2	226.0	147.8
2	15.4	33.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	234.99	18.5	353.0	439.1
3	48.4	12.0	Seed et al. (1986) Gravel	434.50	18.5	480.0	634.6
4	60.4	54.4	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	352.86	21.0	406.0	991.1
5	114.4	oo	Idriss (1990) Rock	2878.81	22.0	1133.0	1295.5

Stratigrafia Lotto B

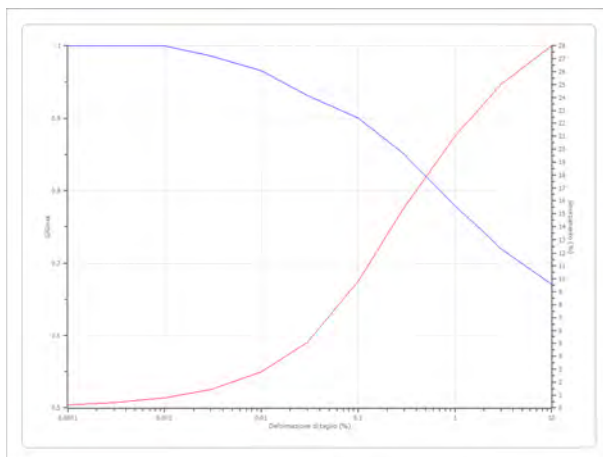
n.	Prof.tà [m]	Spess. [m]	Terreno	Gmax [MPa]	γ . [kN/m ³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	13.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	50.10	19.2	160.0	124.8
2	13.0	17.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	169.72	18.5	300.0	323.5
3	30.0	18.0	Seed et al. (1986) Gravel	234.99	18.5	353.0	475.5
4	48.0	66.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	352.86	21.0	406.0	923.0
5	114.4	oo	Idriss (1990) Rock	2878.81	22.0	1133.0	1292.3

Strato con falda: 1

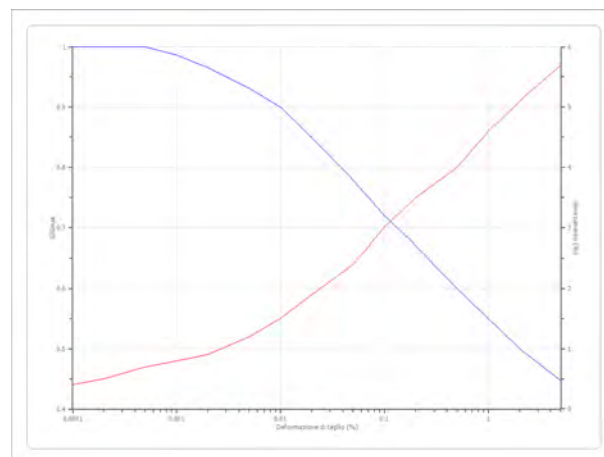
Strato rilevamento accelerogramma: 5 *Bedrock* – Affiorante (*outcrop*)

Ai singoli strati sono state applicate le curve di smorzamento riprodotte di seguito.

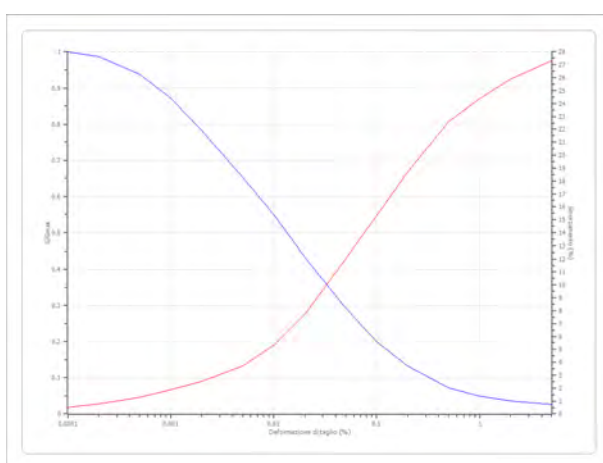
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)



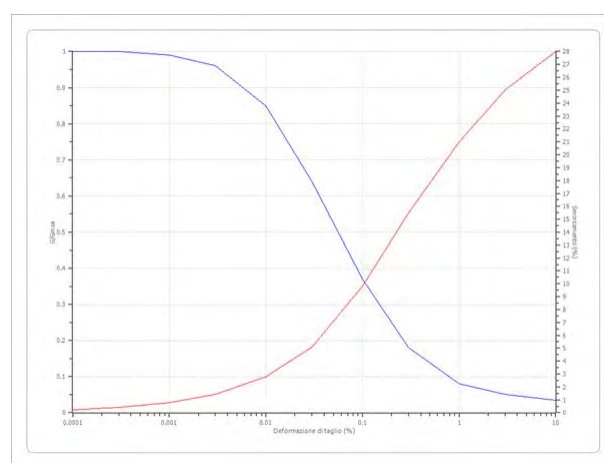
Idriss (1990) Rock



Seed et al. (1986) Gravel -



Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)



10.2 Elaborazione

Al fine di effettuare la modellazione numerica per la valutazione degli effetti di sito è necessario avere a disposizione accelerogrammi da utilizzare come input sismici nella modellazione stessa.

In questo senso si sono utilizzati i tre segnali di riferimento relativi ad un sito in roccia (A) forniti dalla regione Emilia Romagna e identificati dalle sigle 046, 126 e 354.

Gli input selezionati sono stati scalati in funzione dell'ag massima attesa sul bedrock rigido (Categoria A) per il periodo di ritorno definito dalla strategia di progettazione considerata ($a_g = 0,166g$).

Le impostazioni di analisi adottate sono le seguenti.

Numero di iterazioni	50
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima: $[(M-1)/10]$	0.5
Tipo di modulo elastico	Shake 91
Massimo errore percentuale di convergenza – Lotto A	7.76×10^{-5}
Massimo errore percentuale di convergenza – Lotto B	1.55×10^{-4}

Determinazione del rapporto P_{ga}/P_{ga0} allo SLV

Dall'analisi si sono ottenuti i valori riassunti in tabella e in forma grafica.

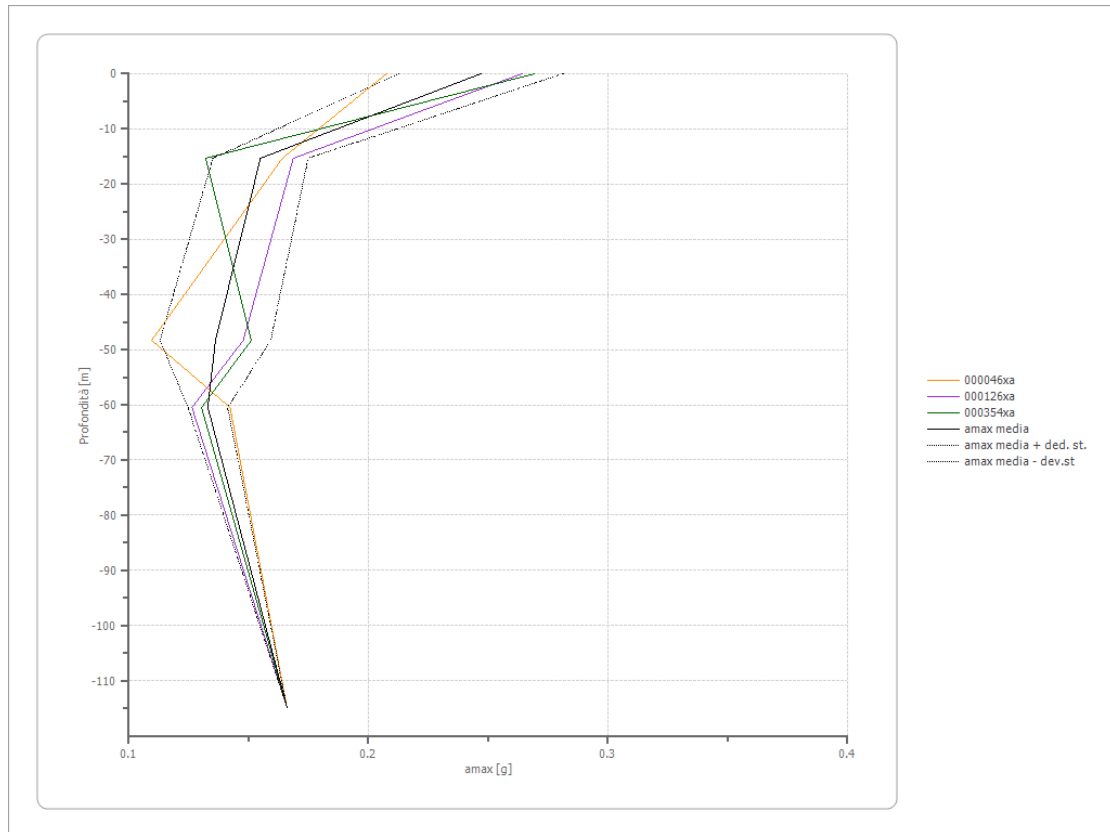
Lotto A

Profondità	0	15.4	48.4	60.4	114.8	--
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	--
Accelerogramma	P_{ga}				P_{ga0}	P_{ga}/P_{ga0}
046 [g]	0.208	0.164	0.110	0.142	0.166	1.250
0126 [g]	0.264	0.169	0.148	0.126	0.166	1.591
0354 [g]	0.269	0.132	0.151	0.130	0.166	1.623
media [g]	0.247	0.155	0.136	0.133	0.166	1.48

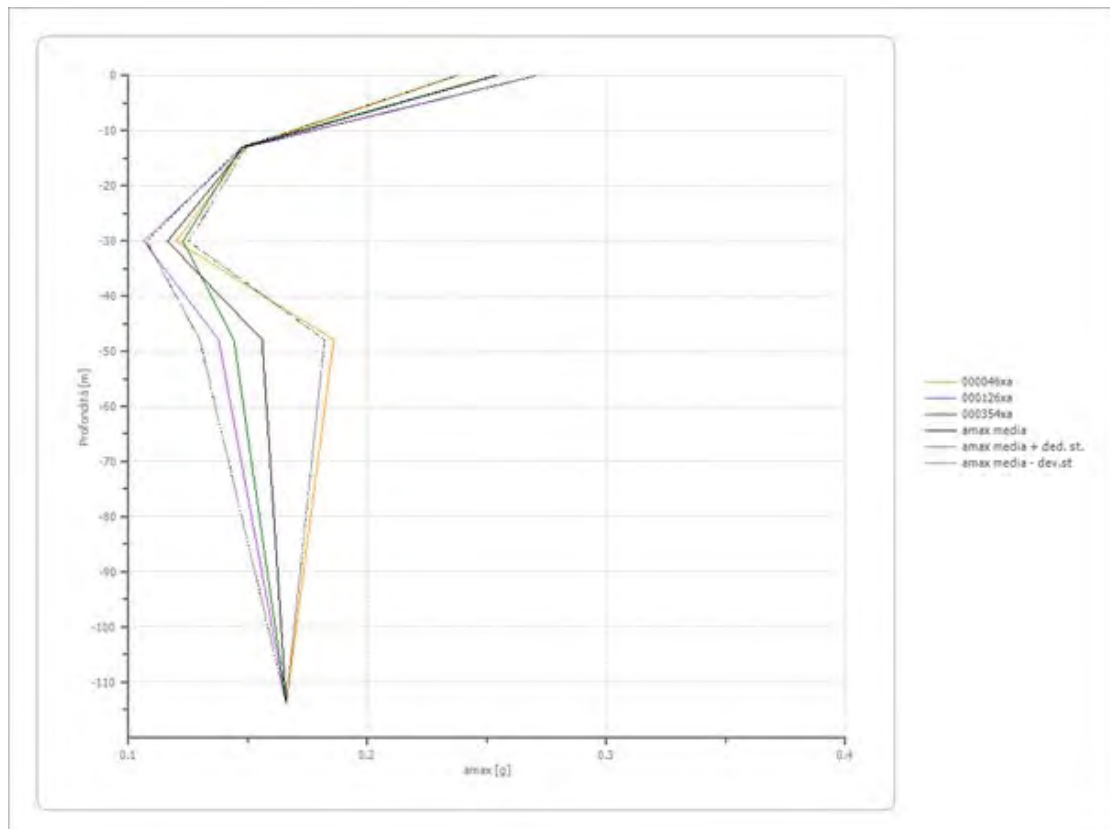
Lotto B

Profondità	0	13.0	30.0	48.0	114.0	--
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	--
Accelerogramma	P_{ga}				P_{ga0}	P_{ga}/P_{ga0}
046 [g]	0.237	0.149	0.120	0.186	0.166	1.431
0126 [g]	0.271	0.148	0.106	0.138	0.166	1.630
0354 [g]	0.253	0.147	0.123	0.144	0.166	1.526
media [g]	0.254	0.148	0.116	0.156	0.166	1.53

Lotto A



Lotto B



SLV

Fattori di amplificazione ICMS 2008

Lotto A			Lotto B		
Tai	0.150	[s]	Tai	0.150	[s]
Tvi	0.700	[s]	Tvi	0.700	[s]
Tao	0.280	[s]	Tao	0.270	[s]
Tvo	1.150	[s]	Tvo	1.150	[s]
Sami	3.677	[m/s ²]	Sami	3.677	[m/s ²]
Svmi	0.196	[m/s]	Svmi	0.196	[m/s]
Samo	5.854	[m/s ²]	Samo	5.649	[m/s ²]
Svmo	0.346	[m/s]	Svmo	0.373	[m/s]
Fa	1.592	[-]	Fa	1.537	[-]
Fv	1.764	[-]	Fv	1.901	[-]
TB	0.124	[s]	TB	0.138	[s]
TC	0.371	[s]	TC	0.414	[s]
TD	2.264	[s]	TD	2.264	[s]
SA(0)	0.264	[g]	SA(0)	0.255	[g]
SA(TB)	0.597	[g]	SA(TB)	0.576	[g]

Fattori di amplificazione di intensità spettrale di velocità

LOTTO A		
Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SI Housner
0.100	0.500	1.649
0.400	0.800	1.762
0.700	1.100	1.681
0.500	1.000	1.784
0.500	1.500	2.009
0.100	2.500	1.942

LOTTO B		
Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SI Housner
0.100	0.500	1.556
0.400	0.800	1.884
0.700	1.100	2.079
0.500	1.000	1.988
0.500	1.500	2.203
0.100	2.500	2.080

Fattori di amplificazione di intensità spettrale di accelerazione

LOTTO A		
Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SA
0.100	0.500	1.62
0.400	0.800	1.85
0.700	1.100	1.95
0.500	1.500	1.92

LOTTO B		
Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SA
0.100	0.500	1.55
0.400	0.800	1.90
0.700	1.100	2.16
0.500	1.500	2.12

Scuotimento in accelerazione LOTTO A

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	ASI/ Δt [cm/s ²]	FA	Hs [cm/s ²]
0.100	0.500	345.9	1.62	516.0
0.400	0.800	154.1	1.85	285.5
0.700	1.100	53.1	1.95	103.5
0.500	1.500	51.8	1.92	99.2

Scuotimento in accelerazione LOTTO B

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	ASI/ Δt [cm/s ²]	FA	Hs [cm/s ²]
0.100	0.500	345.9	1.55	535.2
0.400	0.800	154.1	1.90	293.5
0.700	1.100	53.1	2.16	114.6
0.500	1.500	51.8	2.12	110.0

Spettro di accelerazione medio SLV – Lotto A

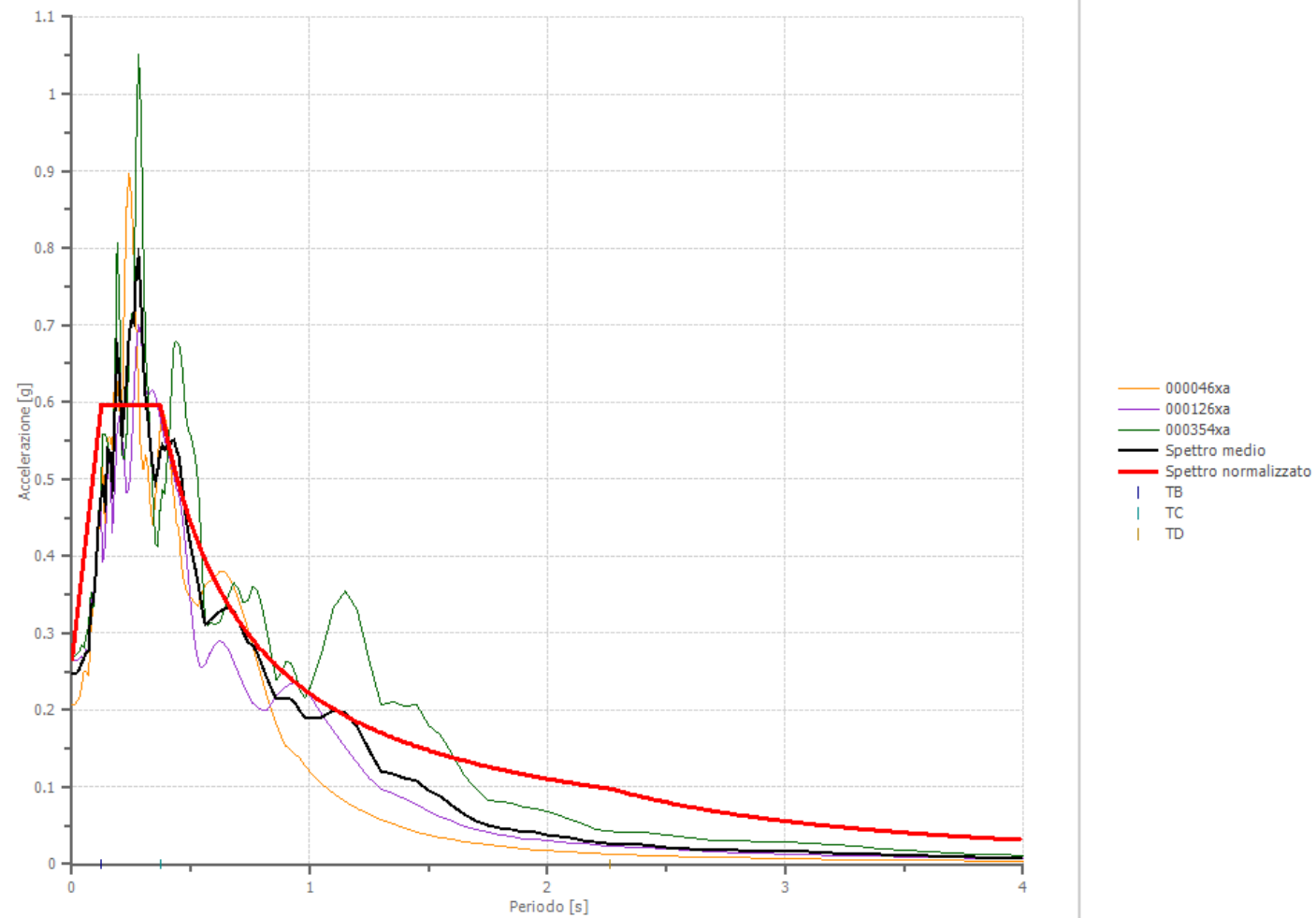
Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2470	0.26	0.7028	0.52	0.3817	0.98	0.1910	2.25	0.0266
0.01	0.2470	0.27	0.7680	0.53	0.3647	1.00	0.1898	2.30	0.0259
0.02	0.2489	0.28	0.7882	0.54	0.3473	1.05	0.1907	2.35	0.0253
0.03	0.2524	0.29	0.7350	0.55	0.3264	1.10	0.1994	2.40	0.0245
0.04	0.2613	0.30	0.6539	0.56	0.3118	1.15	0.1960	2.50	0.0223
0.05	0.2660	0.31	0.6019	0.57	0.3135	1.20	0.1778	2.60	0.0202
0.06	0.2757	0.32	0.5755	0.58	0.3175	1.25	0.1469	2.70	0.0187
0.07	0.2771	0.33	0.5424	0.60	0.3231	1.30	0.1205	2.80	0.0177
0.08	0.3375	0.34	0.5139	0.62	0.3280	1.35	0.1176	2.90	0.0170
0.09	0.3407	0.35	0.4970	0.64	0.3318	1.40	0.1119	3.00	0.0163
0.10	0.3777	0.36	0.5103	0.66	0.3337	1.45	0.1088	3.10	0.0154
0.11	0.4361	0.37	0.5344	0.68	0.3298	1.50	0.0956	3.20	0.0143
0.12	0.4711	0.38	0.5446	0.70	0.3173	1.55	0.0881	3.30	0.0132
0.13	0.4877	0.39	0.5383	0.72	0.2999	1.60	0.0764	3.40	0.0120
0.14	0.4676	0.40	0.5434	0.74	0.2887	1.65	0.0648	3.50	0.0109
0.15	0.5376	0.41	0.5417	0.76	0.2837	1.70	0.0563	3.60	0.0099
0.16	0.5340	0.42	0.5490	0.78	0.2729	1.75	0.0497	3.70	0.0090
0.17	0.4912	0.43	0.5511	0.80	0.2575	1.80	0.0475	3.80	0.0083
0.18	0.5814	0.44	0.5361	0.82	0.2405	1.85	0.0452	3.90	0.0078
0.19	0.6660	0.45	0.5291	0.84	0.2262	1.90	0.0422	4.00	0.0074
0.20	0.6323	0.46	0.5025	0.86	0.2134	1.95	0.0407		
0.21	0.5546	0.47	0.4754	0.88	0.2137	2.00	0.0385		
0.22	0.5935	0.48	0.4472	0.90	0.2154	2.05	0.0361		
0.23	0.6308	0.49	0.4278	0.92	0.2146	2.10	0.0337		
0.24	0.6856	0.50	0.4125	0.94	0.2083	2.15	0.0309		
0.25	0.7057	0.51	0.3968	0.96	0.1980	2.20	0.0284		

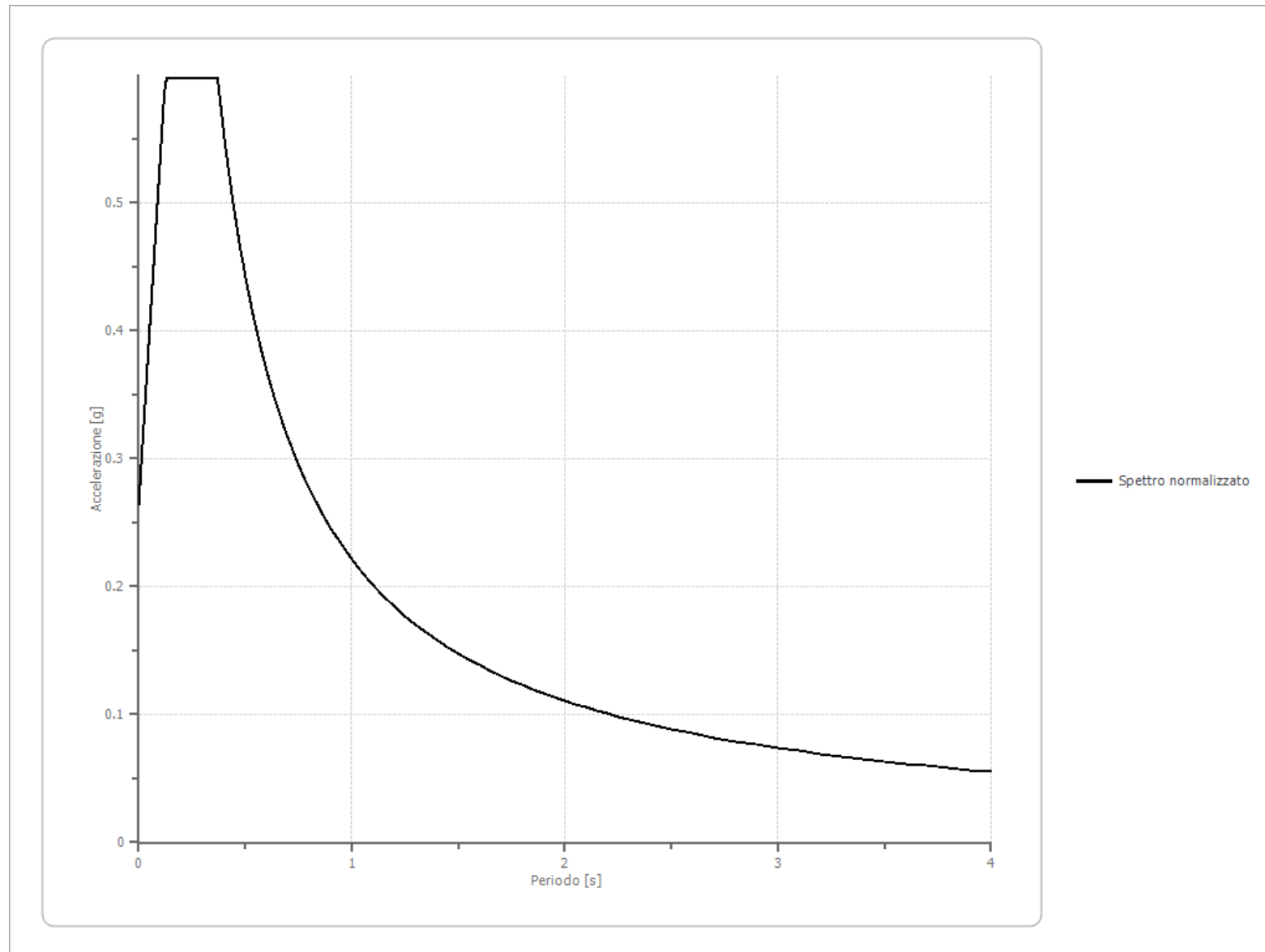
Spettro normalizzato SLV – Lotto A

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2643	0.26	0.5967	0.52	0.4259	0.98	0.2260	2.25	0.0984
0.01	0.2912	0.27	0.5967	0.53	0.4179	1.00	0.2215	2.30	0.0963
0.02	0.3180	0.28	0.5967	0.54	0.4101	1.05	0.2109	2.35	0.0942
0.03	0.3449	0.29	0.5967	0.55	0.4027	1.10	0.2013	2.40	0.0923
0.04	0.3718	0.30	0.5967	0.56	0.3955	1.15	0.1926	2.50	0.0886
0.05	0.3987	0.31	0.5967	0.57	0.3886	1.20	0.1846	2.60	0.0852
0.06	0.4255	0.32	0.5967	0.58	0.3819	1.25	0.1772	2.70	0.0820
0.07	0.4524	0.33	0.5967	0.60	0.3691	1.30	0.1704	2.80	0.0791
0.08	0.4793	0.34	0.5967	0.62	0.3572	1.35	0.1641	2.90	0.0764
0.09	0.5061	0.35	0.5967	0.64	0.3461	1.40	0.1582	3.00	0.0738
0.10	0.5330	0.36	0.5967	0.66	0.3356	1.45	0.1527	3.10	0.0714
0.11	0.5599	0.37	0.5967	0.68	0.3257	1.50	0.1477	3.20	0.0692
0.12	0.5867	0.38	0.5828	0.70	0.3164	1.55	0.1429	3.30	0.0671
0.13	0.5967	0.39	0.5679	0.72	0.3076	1.60	0.1384	3.40	0.0651
0.14	0.5967	0.40	0.5537	0.74	0.2993	1.65	0.1342	3.50	0.0633
0.15	0.5967	0.41	0.5402	0.76	0.2914	1.70	0.1303	3.60	0.0615
0.16	0.5967	0.42	0.5273	0.78	0.2839	1.75	0.1266	3.70	0.0599
0.17	0.5967	0.43	0.5151	0.80	0.2768	1.80	0.1230	3.80	0.0583
0.18	0.5967	0.44	0.5034	0.82	0.2701	1.85	0.1197	3.90	0.0568
0.19	0.5967	0.45	0.4922	0.84	0.2637	1.90	0.1166	4.00	0.0554
0.20	0.5967	0.46	0.4815	0.86	0.2575	1.95	0.1136		
0.21	0.5967	0.47	0.4712	0.88	0.2517	2.00	0.1107		
0.22	0.5967	0.48	0.4614	0.90	0.2461	2.05	0.1080		
0.23	0.5967	0.49	0.4520	0.92	0.2407	2.10	0.1055		
0.24	0.5967	0.50	0.4430	0.94	0.2356	2.15	0.1030		
0.25	0.5967	0.51	0.4343	0.96	0.2307	2.20	0.1007		

Parametri spettro normalizzato SLV – Lotto A

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.264	2.258	--	0.124	0.371	2.264	0.264	0.597

Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLV –Lotto A

Spettro normalizzato SLV – Lotto A

Spettro di accelerazione medio SLV – Lotto B

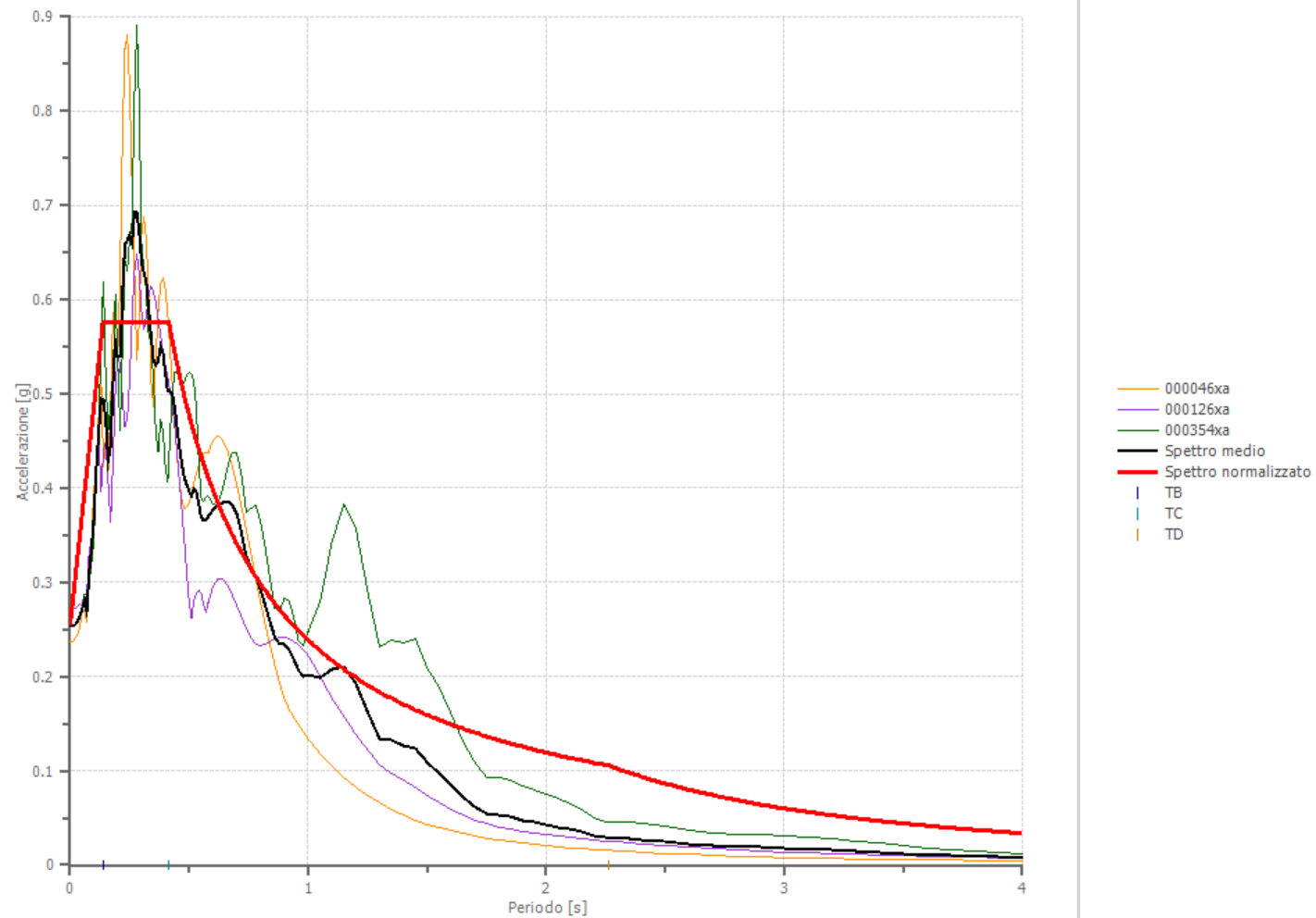
Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2538	0.26	0.6606	0.52	0.3992	0.98	0.2007	2.25	0.0291
0.01	0.2538	0.27	0.6928	0.53	0.3970	1.00	0.2017	2.30	0.0282
0.02	0.2554	0.28	0.6918	0.54	0.3826	1.05	0.1994	2.35	0.0276
0.03	0.2581	0.29	0.6726	0.55	0.3698	1.10	0.2083	2.40	0.0267
0.04	0.2639	0.30	0.6394	0.56	0.3658	1.15	0.2108	2.50	0.0244
0.05	0.2704	0.31	0.6295	0.57	0.3656	1.20	0.1930	2.60	0.0221
0.06	0.2812	0.32	0.6184	0.58	0.3695	1.25	0.1617	2.70	0.0204
0.07	0.2702	0.33	0.5907	0.60	0.3765	1.30	0.1346	2.80	0.0193
0.08	0.3112	0.34	0.5617	0.62	0.3812	1.35	0.1319	2.90	0.0185
0.09	0.3360	0.35	0.5356	0.64	0.3844	1.40	0.1264	3.00	0.0178
0.10	0.3701	0.36	0.5309	0.66	0.3862	1.45	0.1232	3.10	0.0168
0.11	0.4214	0.37	0.5353	0.68	0.3831	1.50	0.1088	3.20	0.0157
0.12	0.4596	0.38	0.5507	0.70	0.3725	1.55	0.0979	3.30	0.0145
0.13	0.4944	0.39	0.5434	0.72	0.3526	1.60	0.0851	3.40	0.0132
0.14	0.4939	0.40	0.5212	0.74	0.3267	1.65	0.0722	3.50	0.0121
0.15	0.4717	0.41	0.5022	0.76	0.3162	1.70	0.0625	3.60	0.0110
0.16	0.4295	0.42	0.5023	0.78	0.3067	1.75	0.0551	3.70	0.0101
0.17	0.4453	0.43	0.4987	0.80	0.2919	1.80	0.0531	3.80	0.0092
0.18	0.5092	0.44	0.4844	0.82	0.2749	1.85	0.0509	3.90	0.0085
0.19	0.5537	0.45	0.4629	0.84	0.2576	1.90	0.0475	4.00	0.0081
0.20	0.5392	0.46	0.4412	0.86	0.2414	1.95	0.0449		
0.21	0.5388	0.47	0.4236	0.88	0.2349	2.00	0.0427		
0.22	0.6068	0.48	0.4112	0.90	0.2340	2.05	0.0402		
0.23	0.6578	0.49	0.4031	0.92	0.2282	2.10	0.0376		
0.24	0.6622	0.50	0.3960	0.94	0.2183	2.15	0.0347		
0.25	0.6685	0.51	0.3922	0.96	0.2059	2.20	0.0312		

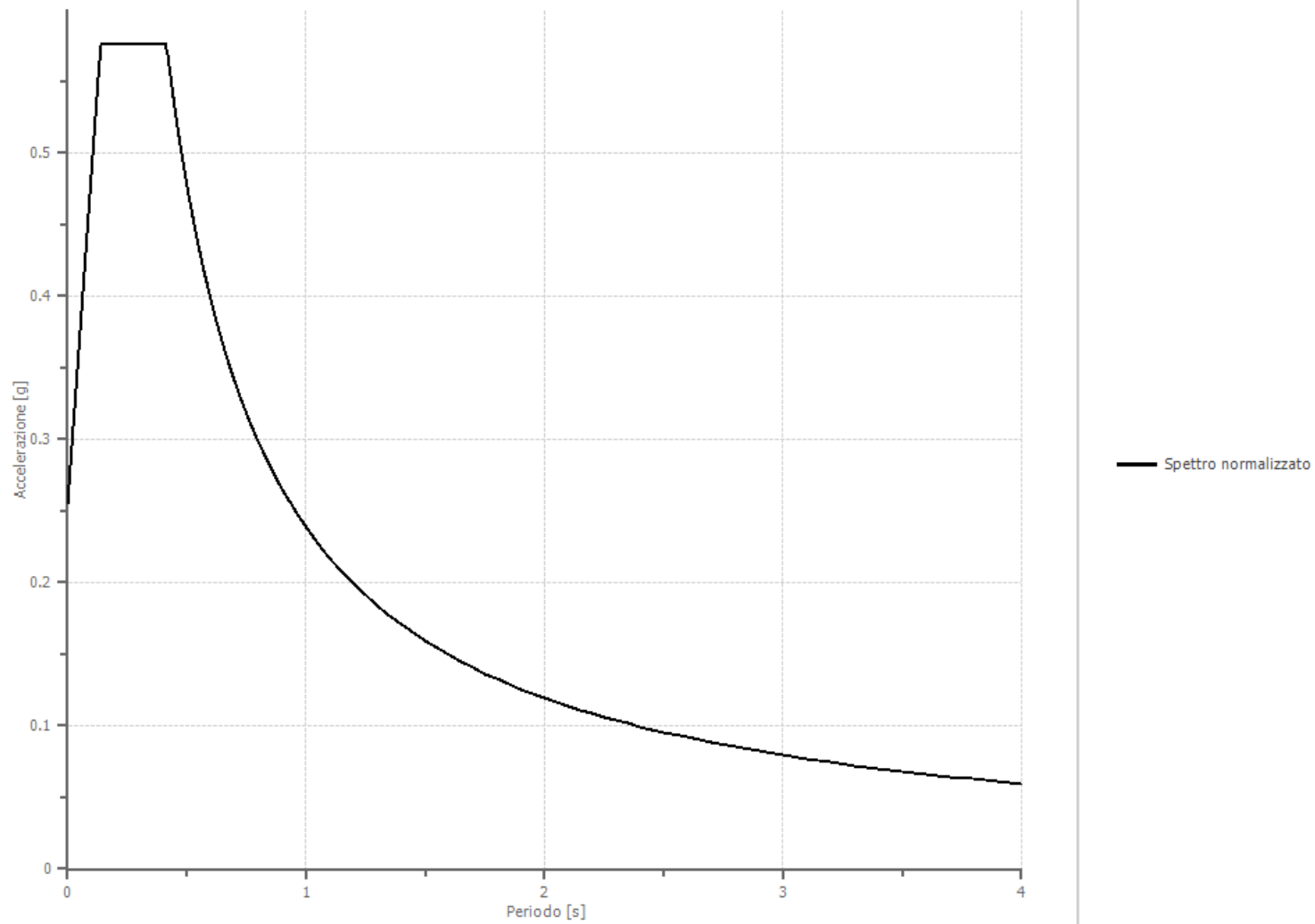
Spettro normalizzato SLV – Lotto B

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2551	0.26	0.5759	0.52	0.4590	0.98	0.2435	2.25	0.1061
0.01	0.2783	0.27	0.5759	0.53	0.4503	1.00	0.2387	2.30	0.1038
0.02	0.3015	0.28	0.5759	0.54	0.4420	1.05	0.2273	2.35	0.1016
0.03	0.3247	0.29	0.5759	0.55	0.4339	1.10	0.2170	2.40	0.0994
0.04	0.3479	0.30	0.5759	0.56	0.4262	1.15	0.2075	2.50	0.0955
0.05	0.3712	0.31	0.5759	0.57	0.4187	1.20	0.1989	2.60	0.0918
0.06	0.3944	0.32	0.5759	0.58	0.4115	1.25	0.1909	2.70	0.0884
0.07	0.4176	0.33	0.5759	0.60	0.3978	1.30	0.1836	2.80	0.0852
0.08	0.4408	0.34	0.5759	0.62	0.3849	1.35	0.1768	2.90	0.0823
0.09	0.4641	0.35	0.5759	0.64	0.3729	1.40	0.1705	3.00	0.0796
0.10	0.4873	0.36	0.5759	0.66	0.3616	1.45	0.1646	3.10	0.0770
0.11	0.5105	0.37	0.5759	0.68	0.3510	1.50	0.1591	3.20	0.0746
0.12	0.5337	0.38	0.5759	0.70	0.3409	1.55	0.1540	3.30	0.0723
0.13	0.5569	0.39	0.5759	0.72	0.3315	1.60	0.1492	3.40	0.0702
0.14	0.5759	0.40	0.5759	0.74	0.3225	1.65	0.1446	3.50	0.0682
0.15	0.5759	0.41	0.5759	0.76	0.3140	1.70	0.1404	3.60	0.0663
0.16	0.5759	0.42	0.5682	0.78	0.3060	1.75	0.1364	3.70	0.0645
0.17	0.5759	0.43	0.5550	0.80	0.2983	1.80	0.1326	3.80	0.0628
0.18	0.5759	0.44	0.5424	0.82	0.2910	1.85	0.1290	3.90	0.0612
0.19	0.5759	0.45	0.5303	0.84	0.2841	1.90	0.1256	4.00	0.0597
0.20	0.5759	0.46	0.5188	0.86	0.2775	1.95	0.1224		
0.21	0.5759	0.47	0.5078	0.88	0.2712	2.00	0.1193		
0.22	0.5759	0.48	0.4972	0.90	0.2652	2.05	0.1164		
0.23	0.5759	0.49	0.4871	0.92	0.2594	2.10	0.1136		
0.24	0.5759	0.50	0.4773	0.94	0.2539	2.15	0.1110		
0.25	0.5759	0.51	0.4680	0.96	0.2486	2.20	0.1085		

Parametri spettro normalizzato SLV – Lotto B

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.255	2.258	--	0.138	0.414	2.264	0.255	0.576

Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLV –Lotto B

Spettro normalizzato SLV – Lotto B

11. RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

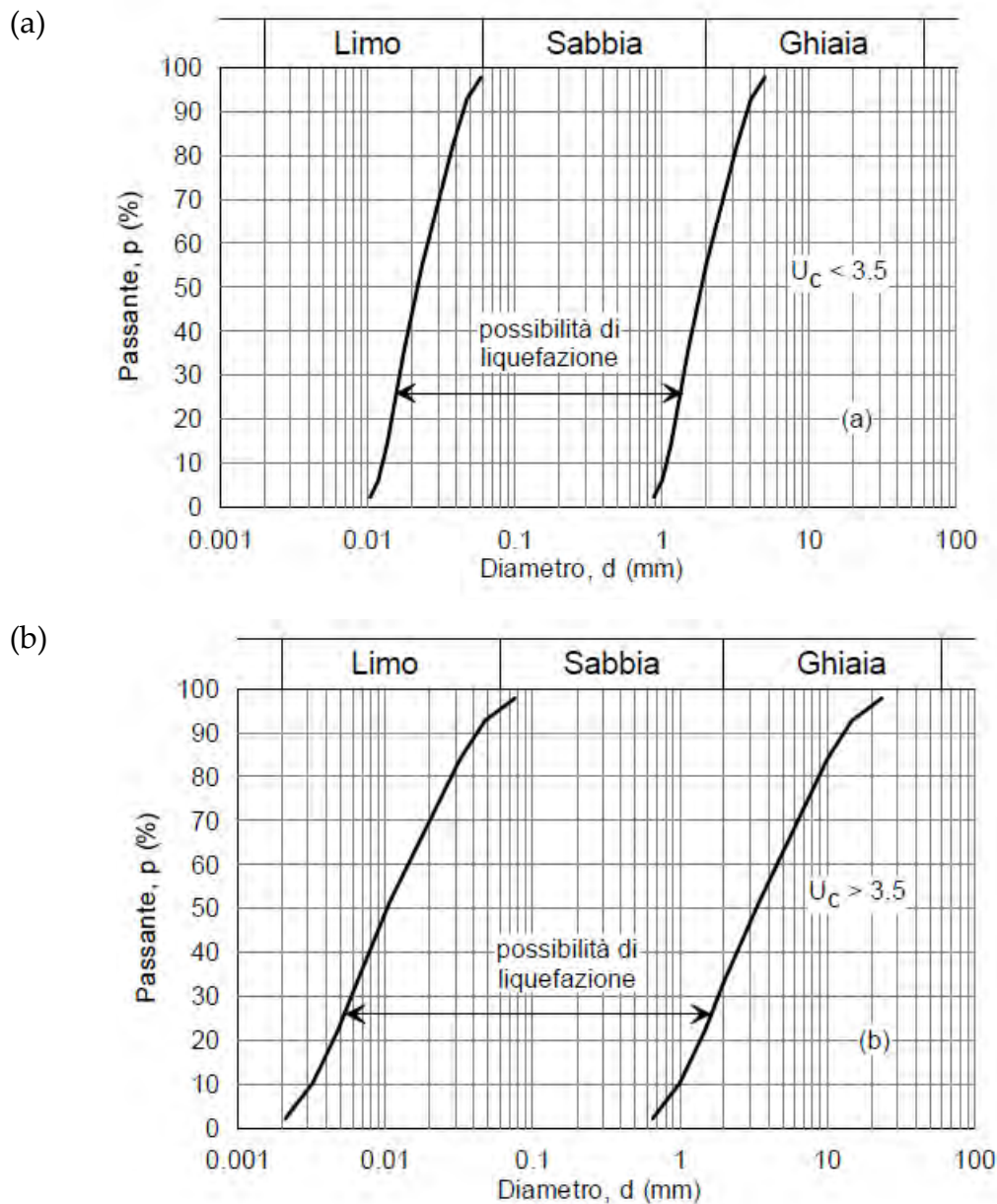
In occasione di un evento sismico particolare attenzione deve essere posta nella liquefazione dei terreni, ovvero la fluidificazione degli stessi con perdita improvvisa della resistenza al taglio, tendenza all'addensamento e conseguente riduzione di volume.

La verifica alla liquefazione può essere omessa quando risulta soddisfatta almeno uno delle seguenti circostanze come da N.T.C. 7.11.3.4.2:

1. Accelerazioni massime attese al p.c. in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g; nel nostro caso $a_{maxs} = 0,255 \div 0,264g$ (*non soddisfatta*).

Quando la condizione 1 non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle successive condizioni:

2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15,00 m dal p.c., per p.c. suborizzontale e strutture con fondazioni superficiali; Al termine dell'indagine all'interno dei fori di prova non è stata rilevata la presenza di falde freatiche di superficie e/o circolazioni idriche significative, anche se in passato indagini eseguite nella stessa area hanno evidenziato la presenza di acqua a partire da una profondità media di 5,80÷6,80 m (lotto A) e 7,50÷8,50 (lotto B) (*non soddisfatta*).
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $(q_{c1N}) > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa; dalle prove penetrometriche eseguite la litologia di superficie è rappresentata da terreni limosi e argillosi con lenti sabbiose di addensamento da scarso a medio (*non soddisfatta*).
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura (a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in figura (b) per terreni con $U_c > 3,5$; a livello operativo l'applicazione di questo criterio implica l'esecuzione di un sondaggio con prelievo di campioni di sabbia satura.



Non essendo soddisfatta alcuna delle precedenti circostanze previste dalle N.T.C. 7.11.3.4.2, si è proceduto ad eseguire la verifica alla liquefazione.

Il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) è espresso attraverso il rapporto fra la resistenza ciclica normalizzata (CRR) e lo sforzo ciclico normalizzato (CSR); Se il rapporto (FSL) è maggiore di 1,2 il terreno è non liquefacibile, mentre diventa liquefacibile in caso contrario.

Lo sforzo ciclico normalizzato può essere valutato nell'ipotesi di mezzo perfettamente rigido, in cui si propagano solo onde di taglio, con la seguente espressione semplificata che tiene conto del mezzo deformabile:

$$CSR = \frac{\tau_{hm}}{\sigma'_z} = 0,65 \times a_{maxs} \times \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} \times \frac{r_d}{g} \times \frac{1}{MSF}$$

dove:

τ_{hm} = tensione tangenziale media indotta dal sisma di progetto;

a_{maxs} = accelerazione massima al sito = $S \cdot a_g = 0,26g$;

σ_z e σ'_z = valori della tensione litostatica totale ed effettiva alla profondità z dal p.c.;

r_d = coefficiente funzione della profondità dal p.c.;

MSF = coefficiente correttivo funzione della magnitudo massima attesa $M = 6,14$, per le zone sismogenetiche 911÷914.

La resistenza ciclica normalizzata (CRR) da prove CPTE/CPTU in accordo con quanto prescritto al punto A2.2 dell'All. A2 del D.G.R 2193/2015 viene valutata mediante il metodo di Boulanger e Idriss (2014) che permette di correlare la resistenza al taglio mobilitata nel terreno con i risultati della prova penetrometrica statica.

La procedura di calcolo si basa sulla seguente equazione:

$$CRR = \exp \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{113} \right] + \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right]^2 - \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{140} \right]^3 + \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{137} \right]^4 - 2,80$$

dove $(q_{c1n})_{cs}$ è funzione della resistenza alla punta normalizzata e corretta per tenere conto della percentuale di fine presente FC determinata sulla base dell'indice di classificazione del terreno I_c .

Il dettaglio della procedura di calcolo della resistenza alla liquefazione (Boulanger & Idriss 2014) eseguito mediante il software Cliq della Geologismiki, viene riportato nel diagramma di flusso in allegato.

Le procedure di calcolo applicate alle prove eseguite hanno evidenziato la presenza di sottili lenti caratterizzate da un coefficiente di sicurezza $F_s < 1,2$.

12. VALUTAZIONE INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

La verifica alla liquefazione ha evidenziato la presenza di terreni potenzialmente liquefacibili, pertanto occorre effettuare la stima dell'indice di liquefazione IL in termini quantitativi.

Iwasaki et al., (1978) hanno introdotto il parametro "Indice del potenziale di Liquefazione IL", esplicabile mediante le seguenti relazioni:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \times w(z) \cdot dz$$

dove:

$$\begin{aligned} F(z) &= 0 && \text{per } FSL \geq 1,2 \\ F(z) &= 2 \cdot 10^6 \exp(-18,427 \cdot FSL) && \text{per } 1,2 > FSL > 0,95 \\ F(z) &= 1-FSL && \text{per } FSL \leq 0,95 \\ w(z) &= 10 - 0,5 \times z \\ z &= \text{profondità dal piano campagna;} \\ z_{crit} &= \text{profondità critica pari a 15 m.} \end{aligned}$$

In base al valore di IL è possibile fornire un'indicazione del rischio di liquefazione attraverso la seguente tabella (Sonmez 2003):

Valore IL	Potenziale di liquefazione
IL = 0	Non liquefacibile (FSL ≥ 1,2)
0 < IL ≤ 2	Basso
2 < IL ≤ 5	Moderato
5 < IL ≤ 15	Alto
IL > 15	Molto alto

Nel lotto A le valutazioni analitiche hanno espresso un Indice del potenziale di Liquefazione IL variabile da 0,3 a 1,3, e per il lotto B da 0,0 a 0,4, traducibile in altri termini in un rischio di liquefazione "Basso".

Un quadro riepilogativo dei valori ottenuti viene riportato in allegato.

13. STIMA DEI CEDIMENTI INDOTTI DALL'AZIONE SISMICA

La stima dei cedimenti permanenti indotti dall'azione sismica, è stata condotta per i sedimenti fini coesivi a comportamento argilloso e per i terreni granulari saturi e insaturi evidenziati fino ad una profondità di 20,00 m, utilizzando gli esiti delle prove penetrometriche e basandosi sulla classificazione di comportamento dei terreni proposta da Robertson (1990; 2009).

Nei sedimenti non saturi a comportamento granulare la stima dei cedimenti è stata effettuata utilizzando la metodologia proposta da Robertson e Shao (2010).

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare la stima dei cedimenti è stata effettuata utilizzando la metodologia di Zhang et al. (2002) in accordo con Robertson (2009), con il cedimento ottenuto mediante la valutazione della deformazione volumetrica post sismica indotta, calcolata in funzione della resistenza penetrometrica normalizzata e del fattore di sicurezza a liquefazione.

Il calcolo in entrambi i casi è stato effettuato con l'ausilio del programma CLiq della Geologismiki Geotechnical Software; i diagrammi di flusso delle procedure impiegate sono riportate in allegato.

Per i sedimenti fini coesivi a comportamento argilloso (zone B e C della carta di Robertson) il cedimento dovuto sia a fenomeni di riconsolidazione che a deformazioni di taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche è stato stimato sulla base del metodo proposto da Robertson (2009) che si basa sulla valutazione del fattore di sicurezza alla deformazione post sismica, considerando il rapporto di resistenza ciclica del terreno (CRR) corrispondente al raggiungimento di una deformazione di taglio pari al 3% per un terremoto di riferimento di magnitudo pari a 7.5.

Per le condizioni suddette i cedimenti post sismici ottenuti variano da 1,8 a 2,6 cm per il lotto A e da 0,0 a 1,8 per il lotto B

Un quadro riepilogativo dei valori ottenuti viene riportato in allegato.

14.A. SCHEDA DI SINTESI LOTTO A

- CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO GEOTECNICA PRELIMINARE

Inquadramento geologico generale	Settore deposizionale della media Pianura Padana; ambito di conoide di rotta; assenza di processi morfodinamici.
Indagine geognostica e prove di riferimento	2 CPTU della lunghezza di 20,00 m e 14,80 m.
Interferenza con falda	Al termine dell'indagine all'interno dei fori di prova non è stata rilevata la presenza di falde freatiche di superficie e/o circolazioni idriche significative, anche se in passato indagini eseguite nella stessa area hanno evidenziato la presenza di acqua a partire da una profondità media di 5,80÷6,80 m
Liquefazione	La presenza di una falda superficiale e di lenti sabbiose di scarso addensamento rappresentano fattori predisponenti fenomeni di liquefazione.
Classificazione geotecnica dei sedimenti	Zona caratterizzata da terreni dotati di qualità meccaniche normali ($1,0 < q_c < 1,5$ kPa) fino a 5,00 m dal p.c. e da qualità scadente ($q_c < 1,0$ kPa) da 5,00 m a 10,00 m.
Condizioni di fattibilità e prescrizioni	<p>Terreni che consentono normali tecniche costruttive (fondazioni superficiali); nel caso di edifici di particolare impegno costruttivo vi possono essere limitazioni dovute a pressioni di esercizio elevate o all'ammissibilità dei cedimenti.</p> <p>Gli eventuali scavi e il riutilizzo dei materiali scavati sono subordinati al rispetto delle normative vigenti.</p>

CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Indagini sismiche	Masw abbinata a misura del Rumore Sismico Passivo (microtremori).
Pericolosità sismica PTCP e PSC	Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche.
Modellazione sismica	Ag = 0,166g; Categoria Topografica T1; coefficiente di amplificazione topografica 1; Vseq = 269 m/s; Categoria di sottosuolo C.
Microzonazione sismica II Livello	Macrocontesto: Pianura 2; Vs30 = 269 m/sec; FA PGA = 1,7; FA SI1 = 1,9; FA SI2 = 2,7; FA SI3 = 2,9; PGA = 0,282g; FA SA1 = 1,8; FA SA2 = 2,4; FA SA3 = 2,8; FA SA4 = 2,7
Analisi sismica III Livello	FA PGA = 1,6; FA SI1 = 1,6; FA SI2 = 1,7; FA SI3 = 1,7; PGA = 0,264g FA SA1 = 1,6; FA SA2 = 1,9; FA SA3 = 2,0; FA SA4 = 1,9 HS1 = 516; HS2 = 285,5; HS3 = 103,5; HS4 = 99,2 [cm/s ²]
Liquefazione	0,2<IL<1,3 – Rischio Basso
Cedimenti post sismici (s)	1,8<s<2,6 cm
Condizioni di fattibilità e prescrizioni	Nessun elemento escludente o limitativo per gli interventi previsti.

14.B. SCHEDA DI SINTESI LOTTO B

- CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO GEOTECNICA PRELIMINARE

Inquadramento geologico generale	Settore deposizionale della media Pianura Padana; ambito di conoide di rotta; assenza di processi morfodinamici.
Indagine geognostica e prove di riferimento	3 CPTe di lunghezza compresa tra 16,40 m e 18,20 m.
Interferenza con falda	Al termine dell'indagine all'interno dei fori di prova e di sondaggio non è stata rilevata la presenza di falde freatiche di superficie e/o circolazioni idriche significative, anche se in passato indagini eseguite in aree limitrofe hanno evidenziato la presenza di acqua a partire da una profondità media di 7,50÷8,50 m.
Liquefazione	La presenza di una falda superficiale e di lenti sabbiose di scarso addensamento rappresentano fattori predisponenti fenomeni di liquefazione.
Classificazione geotecnica dei sedimenti	Zona caratterizzata da terreni dotati di qualità meccaniche normali ($1,0 < q_c < 1,5$ kPa) fino a 5,00 m e da 5,00 m a 10,00 m.
Condizioni di fattibilità e prescrizioni	<p>Terreni che consentono normali tecniche costruttive (fondazioni superficiali); nel caso di edifici di particolare impegno costruttivo vi possono essere limitazioni dovute a pressioni di esercizio elevate o all'ammissibilità dei cedimenti.</p> <p>Gli eventuali scavi e il riutilizzo dei materiali scavati sono subordinati al rispetto delle normative vigenti.</p>

CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Indagini sismiche	1 Masw
Pericolosità sismica PTCP e PSC	Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale presenza di terreni predisponenti la liquefazione
Modellazione sismica	$A_g = 0,166g$; Categoria Topografica T1; coefficiente di amplificazione topografica 1; $V_{seq} = 218 \text{ m/s}$; Categoria di sottosuolo C.
Microzonazione sismica II Livello	Macrocontesto: Pianura 2; $V_{s30} = 218 \text{ m/sec}$; FA PGA = 1,7; FA SI1 = 2,0; FA SI2 = 3,0; FA SI3 = 3,3; PGA = 0,282g FA SA1 = 1,8; FA SA2 = 2,7; FA SA3 = 3,2; FA SA4 = 3,1;
Analisi sismica III Livello	FA PGA = 1,5; FA SI1 = 1,6; FA SI2 = 1,8; FA SI3 = 2,0; PGA = 0,264g FA SA1 = 1,6; FA SA2 = 1,9; FA SA3 = 2,2; FA SA4 = 2,1 HS1 = 535,2; HS2 = 293,5; HS3 = 114,6; HS4 = 110,0 [cm/s ²]
Liquefazione	$0,0 < IL < 0,4$ – Rischio Basso
Cedimenti post sismici (s)	$0,0 < s < 1,8 \text{ cm}$
Condizioni di fattibilità e prescrizioni	Nessun elemento escludente o limitativo per gli interventi previsti.

Casalecchio di Reno, 15 Luglio 2019



[Handwritten signature in blue ink]

ALLEGATI

Indagine geognostica

40033 Casalecchio di Reno (BO)

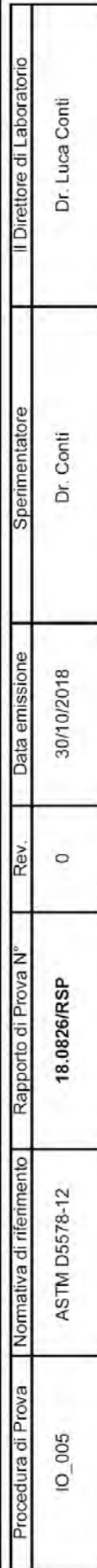
Via Cimara, 119 - Tel. 051/61.33.072

Rapporto di Prova N.

Cantiere: Villa Erbosa

Note:

Codice Lavoro: 2018.134



Indagini Geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

Punta Pagani Mod. MK386 - Penetrometro da 200 kN

Codice Lavoro: 2018.134

Preforo : 1.00 m

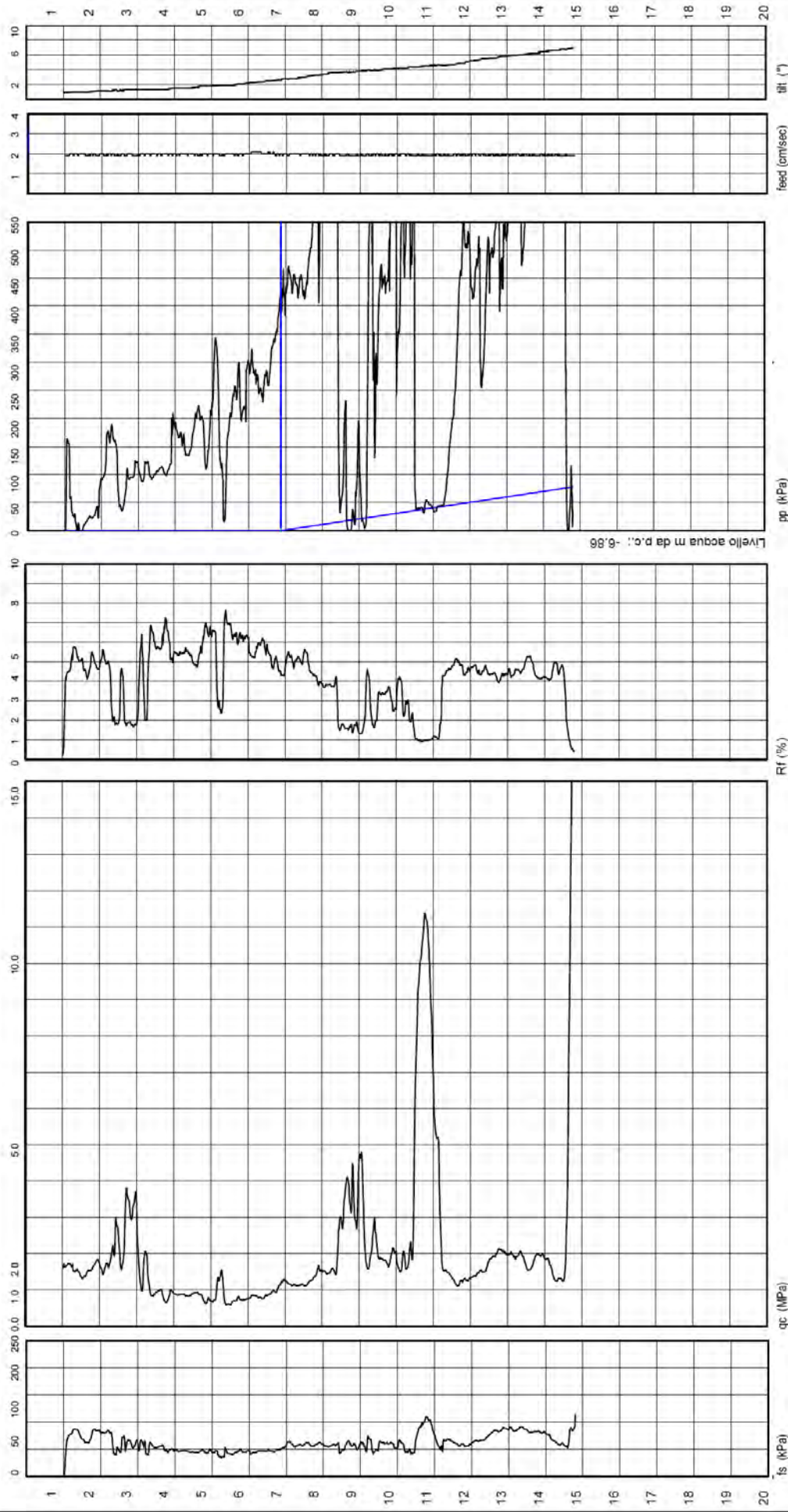
Quota : 1000

Preforo : 1.00 m

Date Printed: 2014/03/04

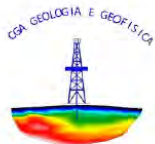
Data Prova : 30/10/2018

Codice Lavoro: 2018.134



Procedura di Prova	Normativa di riferimento	Rapporto di Prova N°	Rev.	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
IO_005	ASTM D5578-12	18.0827/RSP	0	30/10/2018	Dr. Conti	Dr. Luca Conti

Indagine sismica Lotto A



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

Committente:	Geoprobe S.r.l.
Prova:	HVSR
Località:	Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna
Data:	30-ott-18
Certificato:	A1305GF631 MASW



SOMMARIO

SOMMARIO	2
INTRODUZIONE	3
METODOLOGIA D'INDAGINE	4
INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW	4
MODALITÀ ESECUTIVE	4
ELABORAZIONE DATI	6
SISMICA CON METODOLOGIA MASW	6
<i>Analisi delle immagini di dispersione</i>	<i>6</i>
<i>Interpretazione</i>	<i>6</i>
Densità Dinamica:	7
Modulo di taglio:	7
Modulo di Young:	7
PRESENTAZIONE DEI RISULTATI	8
PROPRIETÀ GEOFISICHE DEI TERRENI	9
APPENDICE 1	10



INTRODUZIONE

Su incarico di Geoprobe S.r.l. è stato redatto questo rapporto di prova relativo all'esecuzione di una prova sismica MASW a uno shot in Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna.

L'ubicazione della zona di indagine è rappresentata in figura n° 1.

Lo studio ha seguito il seguente sviluppo:

- esecuzione di n° 1 prova sismica a shot singolo con metodo MASW;
- elaborazione dei dati raccolti.



METODOLOGIA D'INDAGINE

INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW

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 vengo 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 e, quando necessario, delle onde di Love.

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 stratigrafia 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:

- acquisizione delle onde superficiali;
- costruzione delle curve di dispersione (grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- 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) in questo caso 48, 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.

Ogni scoppio ed ogni registrazione per ogni distanza di offset se necessario vengono ripetuti tre volte.



Lo strumento utilizzato è il sismografo digitale X610S-S di produzione M.A.E. s.r.l. ad acquisizione digitale con dinamica a 24 bit.

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

Nel caso specifico la geometria dell'array di indagine è riassunta nella seguente tabella:

MASW	n° geofoni	Spacing [m]	Offset [m]	Lunghezza array [m]
L1	24	1.00	7.00	30.00

Tabella n° 1 - Array dello stendimento MASW.

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

SISMOGRAFO M.A.E. X610-S

Convertitori: risoluzione 24 bit, tecnologia sigma-delta
Range dinamico: 144 dB (teorico)
Numero di campioni per evento: impostabile da 1024 a 21800 con incrementi di 512
Interfacce disponibili: LAN, USB, VGA
Auto-calibrazione interna dei convertitori prima di ogni acquisizione
Intervalli di campionamento: 1/30, 1/15, 1/7.5, 1/3.75, 0.5, 1.0, 2.0, 10.0, 20.0 ms
Archiviazione dati: in memoria FLASH interna (fino a 3GB disponibili) e/o su USB pen-drive rimovibile
Alimentazione: 12V DC con assorbimento medio di 1.5A
Display: LCD 12.2" con touch-screen integrato optical bonding
Dimensioni e peso: 46x32,7x17 cm, 8 Kg (cavi e sensori esclusi)
Condizioni ambientali: -20/80°C

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

GEOFONI GEOSPACE GS-11D

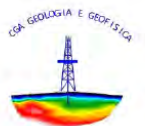
Natural Frequency	4,5 ± 0,75 Hz
Coil Resistance @ 25°C ± 5%	380 Ohms
Intrinsic Voltage Sensitivity with 380 Ohm Coil ± 10%	0,32 V/cm/s
Normalized Transduction Constant (V/in/sec)	0,42 (sq.root of R _c)
Open Circuit Damping	0,34 ± 20%
Damping Constant with 380 Ohm Coil	762
Optional Coil Resistances ± 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.



ELABORAZIONE DATI

SISMICA CON METODOLOGIA MASW

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.

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.



PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

I certificati delle indagini sismiche MASW eseguite sono riportate in appendice 1.

La stratigrafia sismica delle singole prove è riportata nelle seguenti tabelle:

Strato	Spessore medio (m)	Vs (m/s)
1	1.88	229.24
2	2.35	236.25
3	2.93	215.94
4	3.67	202.06
5	4.58	249.65
6	5.73	311.38
7	7.16	354.32
8	8.95	368.03
9	11.19	364.34
10	12.11	487.78

Tabella n° 4 – Stratigrafia da prova sismica e velocità di propagazione dell'onda sismica Linea L1

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;

$V_{s,i}$ = 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_{seq} , senza specifiche indicazioni dei progettisti, è calcolata per ogni shot di ogni linea sismica MASW eseguita a partire dal piano di campagna.

Veq [m/s]	269.18
------------------	---------------

Tabella n° 5 – Valore calcolato di V_{seq} Linea L1



PROPRIETÀ GEOFISICHE DEI TERRENI

In Appendice 1 sono rappresentate graficamente le colonne sismostratigrafiche relative ai parametri geofisici, di seguito riassunti in forma tabellare:

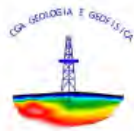
Profondità	Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ_{din} (kN/m ³)	E (Mpa)	G0 (Mpa)
0.00	561.52	229.24	16.65	249.86	89.23
1.88	561.52	229.24	16.65	249.86	89.23
4.22	578.70	236.25	16.75	266.90	95.32
7.16	528.94	215.94	16.46	219.20	78.29
10.82	494.93	202.06	16.26	189.51	67.68
15.41	611.50	249.65	16.92	301.15	107.56
21.14	762.72	311.38	17.65	488.60	174.50
28.30	867.90	354.32	18.09	648.37	231.56
37.25	901.48	368.03	18.22	704.58	251.63
48.44	892.44	364.34	18.18	689.19	246.14
60.55	1194.81	487.78	19.22	1305.76	466.34

Tabella n° 6 – Parametri geofisici

San Giovanni in Persiceto, 30 ottobre 2018

I Geologi :





APPENDICE 1

Figure ed elaborati grafici



COMMITTENTE: Geoprobe S.r.l.

CANTIERE: Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna

CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

UBICAZIONE PROVA A1305GF631 MASW





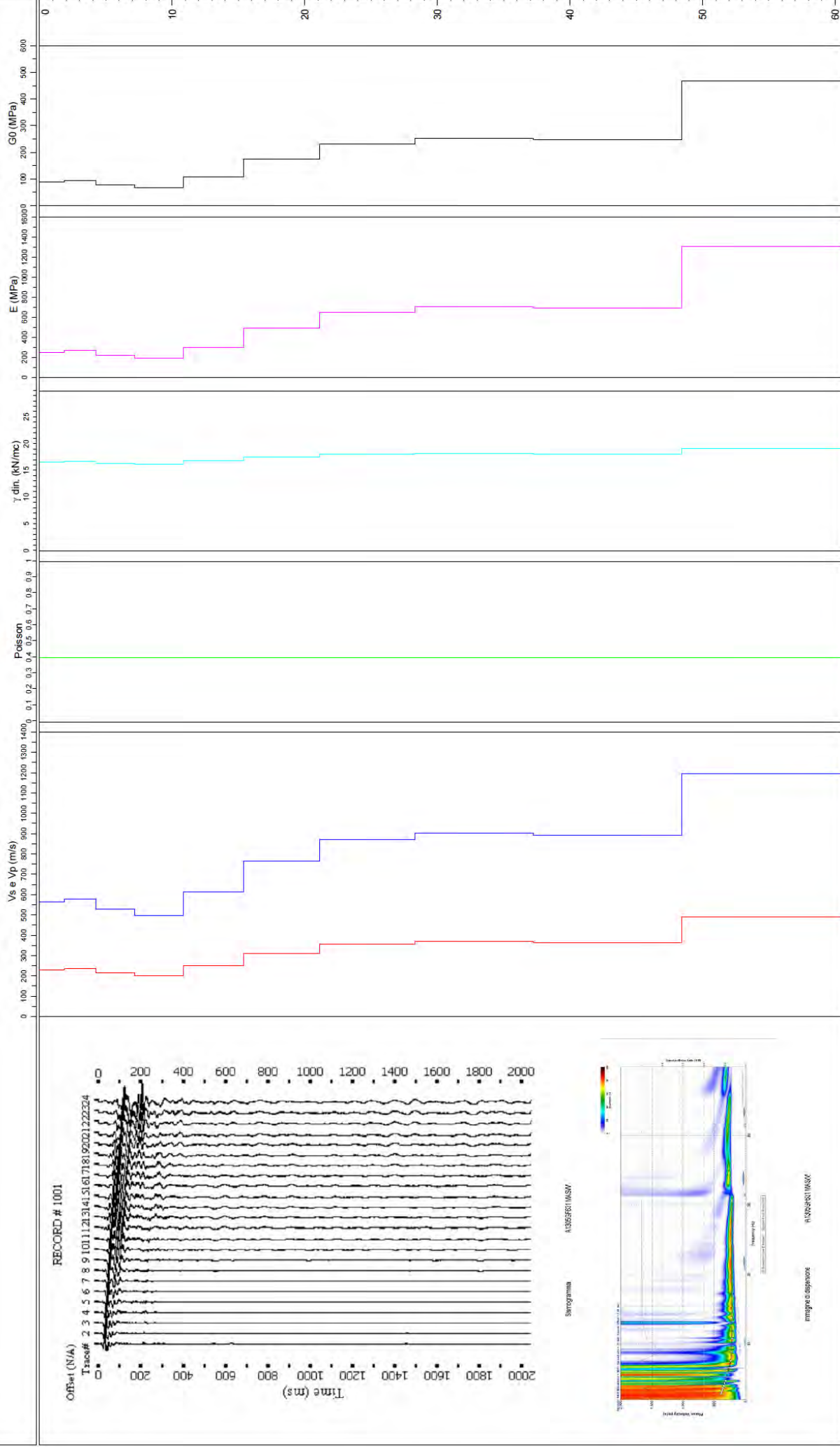
COMMITTENTE: Geoprobe S.r.l.

CANTIERE: Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna

PROVA: MASW a 1 Shot CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

CERTIFICATO N°: A1305GF631 MASW

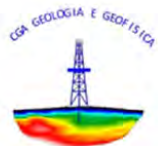
DATA DI ESECUZIONE: 30/10/2018





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

Committente:	Geoprobe S.r.l.
Prova:	HVSR
Località:	Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna
Data:	30-ott-18
Certificato:	A1305GF631



SOMMARIO

SOMMARIO	2
INTRODUZIONE	3
INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA HVSR.....	4
ELABORAZIONE DATI	4
INTERPRETAZIONE	5
Verifiche SESAME	5
Sismostratigrafia	5
Frequenza caratteristica di sito f_0	5
Ampiezza del picco H/V.....	6
Bedrock sismico	6
APPENDICE 1	7



INTRODUZIONE

Su incarico di Geoprobe S.r.l. è stato redatto questo rapporto di prova relativo all'esecuzione di una prova HVSR, eseguita in Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna.

Lo studio ha seguito il seguente sviluppo:

- esecuzione di n° 1 prova sismica HVSR;
- elaborazione dei dati raccolti.

L'ubicazione delle indagini è rappresentata in figura n° 1.



INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA HVSR

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** di fabbricazione **MAE**, modello **A6000S**.

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.

ELABORAZIONE DATI

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

1. Scomposizione dei segnali in finestre temporali, nel caso specifico di almeno 20 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.

INTERPRETAZIONE

I certificati delle indagini sismiche HVSR eseguite sono riportati in appendice 1.

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
$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco} > [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Tabella n° 1 – Verifiche SESAME

Sismostratigrafia

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

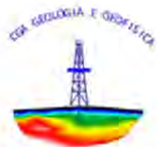
Profondità [m]	Vs [m/s]
15.41	226.00
48.44	353.00
114.94	406.00
Bedrock	1133.28

Tabella n° 2 – Dati della sismostratigrafia

Frequenza caratteristica di sito f_0

Frequenza f_0 [Hz]
0.70±0.6

Tabella n° 3 – Frequenza caratteristica di sito f_0



Ampiezza del picco H/V

Ampiezza del picco [H/V]
2.5±0.4

Tabella n° 4 –Profondità del bed rock sismico

Bedrock sismico

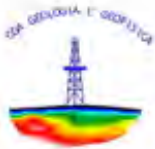
Profondità bedrock [m]	Vs bedrock [m/s]
114.94	1133.28

Tabella n° 5 –Profondità del bed rock sismico

San Giovanni in Persiceto, 30.10.2018

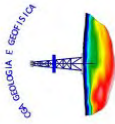
I Geologi :





APPENDICE 1

Figure ed elaborati grafici



COMMITTENTE: Geoprobe S.r.l.

CANTIERE: Via del Arcoveggio 48 - Bologna

CONSULENZA GEOFISICA: Studio Tec. Ass. CGA

UBICAZIONE PROVA A1305GF631

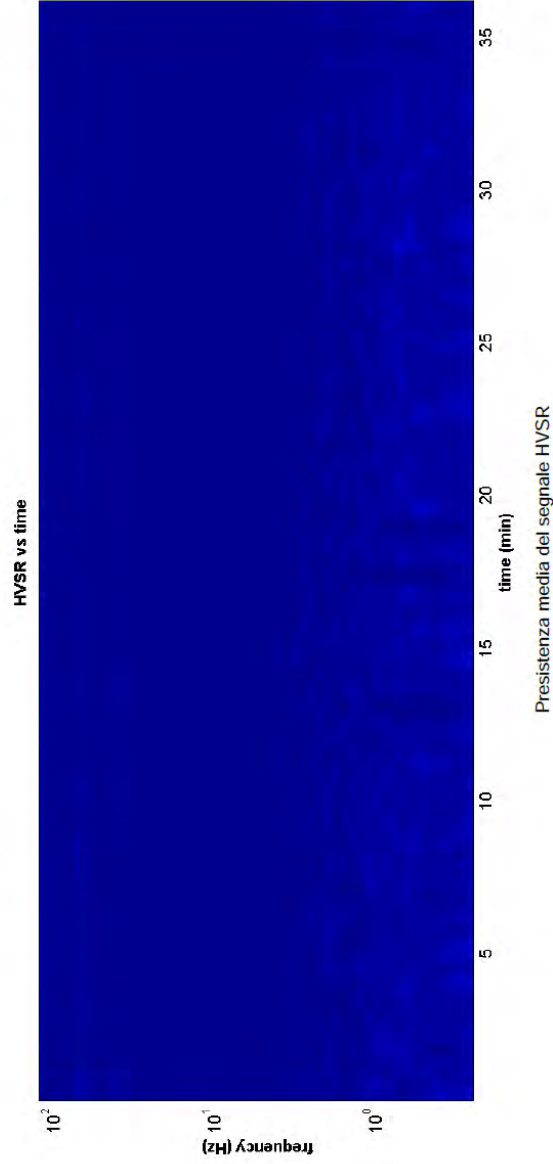
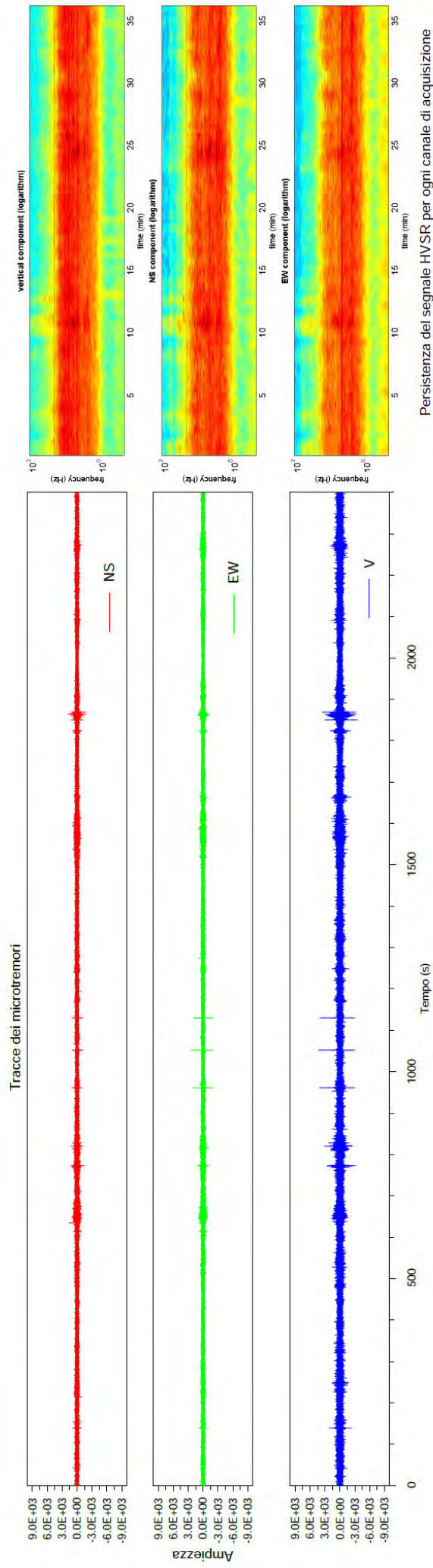


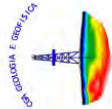


Committente: Geoprobe S.r.l.

Prova: HVSR Località: Via del Arcoveggio 48 - Bologna Data: Tuesday, October 30, 2018

Segnale acquisito e persistenza del segnale

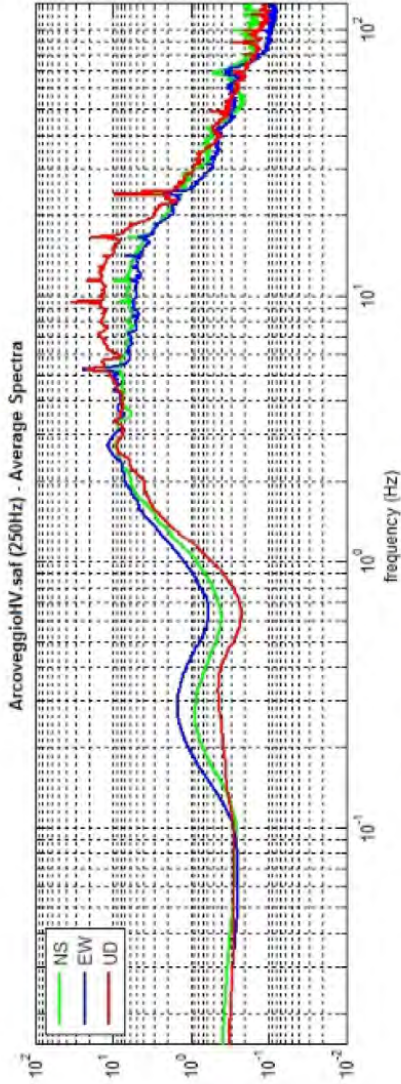




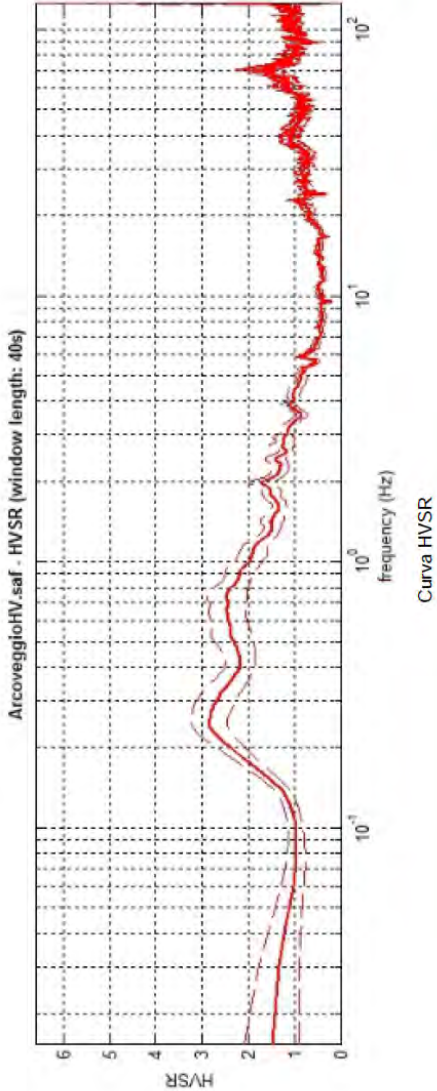
Committente: Geoprobe S.r.l.

Prova: HVSR Località: Via dell'Arcoveggio 48 - Bologna Data: Tuesday, October 30, 2018

Analisi del segnale



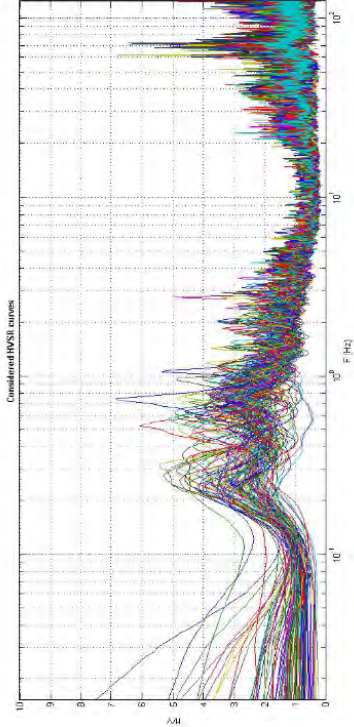
Spettri frequenza/ampiezza per ogni canale di acquisizione



RISULTATI DELL' ANALISI

Picco principale (maggior rapporto HV):
 $F_0 = 0.7$ Hz

Sismostatigrafia:	
Profondità [m]	V_s [m/s]
15.41	226.00
48.44	353.00
114.94	406.00
Bedrock	1135.26



Curva HVSR di ogni finestra utilizzata nel calcolo

Dataset: ArcoveggioHV.saf
Sampling frequency (Hz): 250
Window length (sec): 40
Length of analysed temporal sequence (min): 36.8
Tapering (%): 20

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 0.7 (a0.6)
Peak HVSR value: 2.5 (a0.4)

Criteria for a reliable H/V curve
#1. $f_0 > 10/Lw$: 0.7 > 0.25 (OK)
#2. $f_{inc} > 200$: 2928 > 200 (OK)
#3. $f_0 > 0.5$ Hz: sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0 (OK)

Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled)
#1. f_0 exists f- in the range $[f_0/4, f_0]$ | $AH/V(f-) < A0/2$: (NO)
#2. f_0 exists f+ in the range $[f_0, 4f_0]$ | $AH/V(f+) < A0/2$: yes, at frequency 2.6Hz (OK)
#3. $A0 > 2$: 2.5 > 2 (OK)
#4. $f_{peak}(Ah/v(f))$ a sigmaA(f) = f0 a 5%: (NO)
#5. $[\sigma_{max}] < \epsilon_{sigma}(f_0)$: 0.582 > 0.101 (NO)
#6. $[\sigma_{max}(f_0)] < \theta_{max}(f_0)$: 0.395 < 2 (OK)

Indagine sismica Lotto B

Comune di Bologna

RELAZIONE GEOFISICA

Committente: Geo-Probe S.r.l.

Indagine sismica con metodologia MASW per la valutazione del parametro V_{S30} e la determinazione della categoria del suolo di fondazione in un'area situata presso la Casa di Cura Villa Erbosa in Via dell'Arcoveggio n°50/2 a Bologna

Luglio 2011

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
Tel. 051.757378 Cell. 349.4515174
C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
2. METODOLOGIA MASW	3
2.1 DESCRIZIONE.....	3
2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E PARAMETRI DI ACQUISIZIONE DATI	3
2.3 ELABORAZIONE DATI.....	5
2.4 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	6
3. VALUTAZIONE DEL PARAMETRO V_{S30} E DETERMINAZIONE DELLA CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE	8
4. CONCLUSIONI.....	9

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa

Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174

C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

1. INTRODUZIONE

Su incarico della ditta Geo-Probe S.r.l. è stata redatta la presente relazione riportante i risultati ottenuti da un profilo sismico con metodologia MASW eseguito dallo scrivente in data 12 Luglio 2011 in un'area situata presso la Casa di Cura Villa Erbosa in Via dell'Arcoveggio n°50/2 a Bologna.

Lo scopo dell'indagine, su richiesta della stessa Geo-Probe S.r.l., è consistito nella ricostruzione delle velocità delle onde di taglio V_S in profondità e nella conseguente determinazione del parametro V_{S30} al fine di classificare il suolo di fondazione del sito in accordo con la normativa vigente:

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (14/01/2008): *Norme tecniche per le costruzioni* (G.U. n. 29 del 04/02/2008) – Suppl. Ordinario n° 30

L'area di intervento è ubicata nell'Elemento *Bologna Nord* n° 221053 della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000.

L'ubicazione dello stendimento è indicata in Tavola 1 di seguito riportata.

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

Indagine sismica con metodologia MASW per la valutazione del parametro V_{S30} e la determinazione della categoria del suolo di fondazione in un'area situata presso la Casa di Cura Villa Erbosa in Via dell'Arcoveggio n°50/2 a Bologna.
 Committente: Geo-Probe S.r.l.

Luglio 2011 - 078

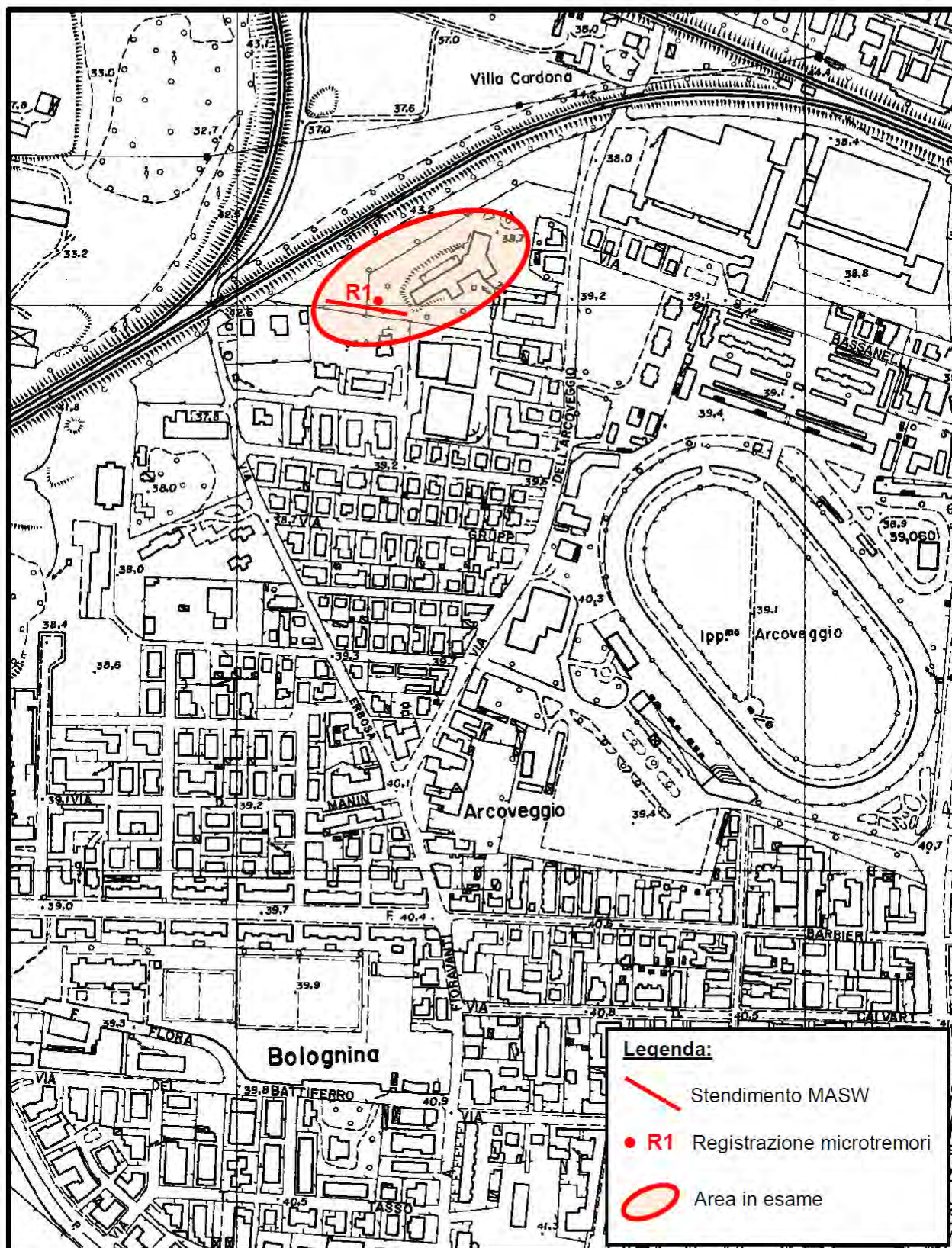


TAVOLA 1: Estratto dalla Carta Tecnica Regionale, Elemento *Bologna Nord* n° 221053
 Scala 1:5.000

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
 Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
 C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

2. METODOLOGIA MASW

2.1 DESCRIZIONE

L'indagine sismica di tipo MASW (*multichannel analysis of surface waves*) è una tecnica di analisi del sottosuolo che sfrutta la propagazione delle onde superficiali nel terreno per determinare l'andamento della velocità delle onde S.

La registrazione avviene utilizzando la strumentazione classica per le indagini sismiche a rifrazione, ovvero tramite uno stendimento lineare composto da geofoni posti a distanza fissa tra loro. Per il seguente lavoro è stato effettuato il metodo attivo, ovvero le onde superficiali sono state prodotte da una sorgente impulsiva sul piano campagna.

Per migliorare la qualità dei dati si è aumentato il rapporto segnale/rumore producendo più energizzazioni e sommandole tra loro in quel processo che viene comunemente chiamato *stacking*.

2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E PARAMETRI DI ACQUISIZIONE DATI

La strumentazione ed i parametri utilizzati per l'acquisizione dei dati in campagna vengono sinteticamente indicati di seguito:

- Sorgente: mazza da 8 kg su piattello metallico
- Numero di battute: 5
- Distanza sorgente dal primo geofono: 10 m
- Geofoni: verticali con frequenza propria di 4.5 Hz
- Numero di geofoni: 16
- Distanza intergeofonica: 3 m
- Lunghezza dello stendimento: 52 m
- Unità di acquisizione: notebook + sistema sismico digitale multicanale SoilSpy Rosina (caratteristiche tecniche nella pagina seguente)
- Software di acquisizione: SoilSpy Rosina Software
- Frequenza di campionamento: 512 Hz
- Tempo di registrazione: 2 sec

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

Caratteristiche tecniche di SoilSpy Rosina

Array-PC connection: via USB interface

Geophone-Array connection: bipolar, one for each module

Input impedance: 20 k Ω (12 k Ω attenuated mode)

Dynamic range: from ± 3.2 mV to ± 665 mV (8 options)

Resolution/Gain: from 0.1 μ V/digit to 20 μ V/digit (8 options)

Sampling rate: 89 kHz on each channel, sub-sampling through averaging

Data output: 256, 512, 1024 or 2048 Hz on each channel

Conversion: synchronized on each channel

Maximum continuous recording time: limited only by PC memory storage capability

Data transmission: asynchronous bidirectional serial, 1MBaud

Status indicators: LED

Average consumption: 120 mA @256Hz. 130 mA @512Hz. 150 mA @1024Hz

Power supply: 5V. Powered directly from the PC via USB. No external additional batteries

Internal Voltage: +3.3V

Number of channels: 1 for each module, analog band DC-360 Hz

Number of modules: 16 or 32 (16+16). Other combinations on demand

System Size: Single module: 0.053L x 0.063W x 0.022H meters.

Cable winder (external rim): 0.370L x 0.30W x 0.220H meters

Weight: ~5 kg included cable winder for the 24 module – 5 m interspace system

Operating environmental conditions: temperature 0-50°C, humidity 0-100%

Storage and transport conditions: temperature -20-60°C, humidity 0-95% without condensation

Impermeability: IP protection index 65 (dust proof, splash proof)

Manufacturer: Micromed S.p.A. - Via Giotto 2 - 31021 - Mogliano Veneto (TV) – Italy

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
 Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
 C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

2.3 ELABORAZIONE DATI

Lo *stacking* delle onde, effettuato con il software *SoilSpy Rosina*, ha permesso di ottenere il pacchetto dati mostrato in figura 1, in cui in ogni riga è visibile l'arrivo a ciascun geofono. Il geofono 1 è stato utilizzato come *trigger*.

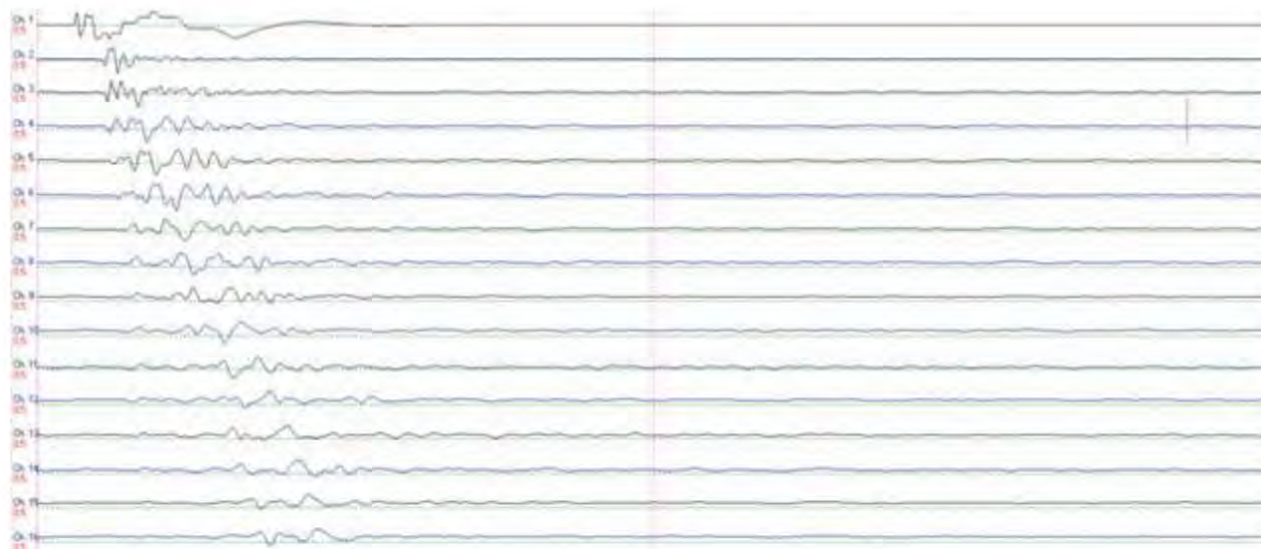


Figura 1: Arrivo delle onde ai vari geofoni a seguito del processo di *stacking*

L'elaborazione di questi dati prevede i seguenti passaggi ed è stata effettuata tramite software *Grilla*, in dotazione allo strumento, con cui è possibile effettuare analisi spettrali e analisi HVSR (in funzione del tempo ed in funzione della direzione):

1. Creazione degli spettri della velocità di fase: dell'intero arrivo delle onde viene scelta una finestra contenente le onde superficiali;
2. Determinazione dello spettro di velocità di fase della finestra scelta;
3. Individuazione della curva di dispersione;
4. Creazione del modello di inversione per la determinazione delle velocità delle onde S.

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
 Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
 C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

2.4 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

La figura 2 mostra lo spettro delle velocità di fase registrato nell'area in oggetto.

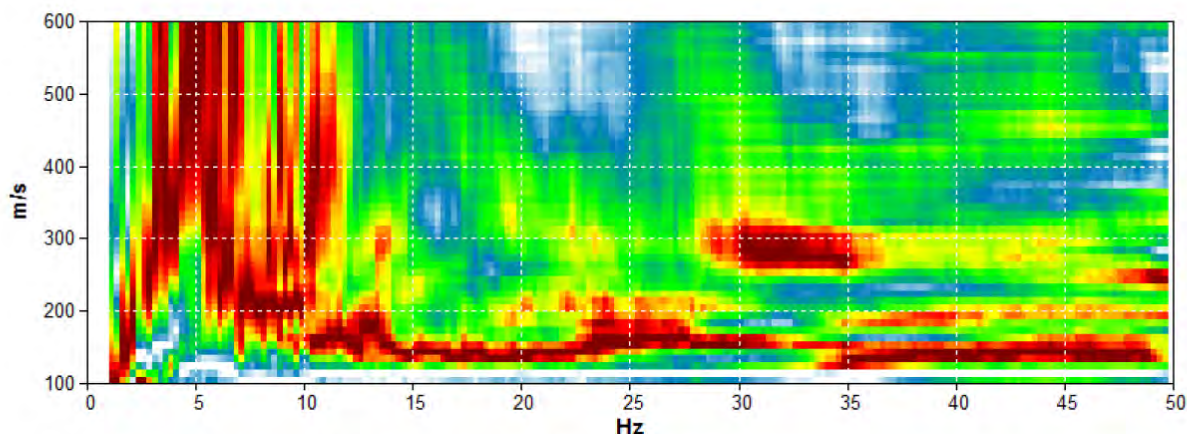


Figura 2: Spettro della velocità di fase rilevato dall'indagine MASW

Il processo di inversione effettuato per stimare la velocità delle onde S porta al tracciamento della curva a pallini azzurri di seguito esposta, la quale deve risultare il più possibile sovrapposta alla zona di massima intensità dello spettro, ovvero alla curva di dispersione.

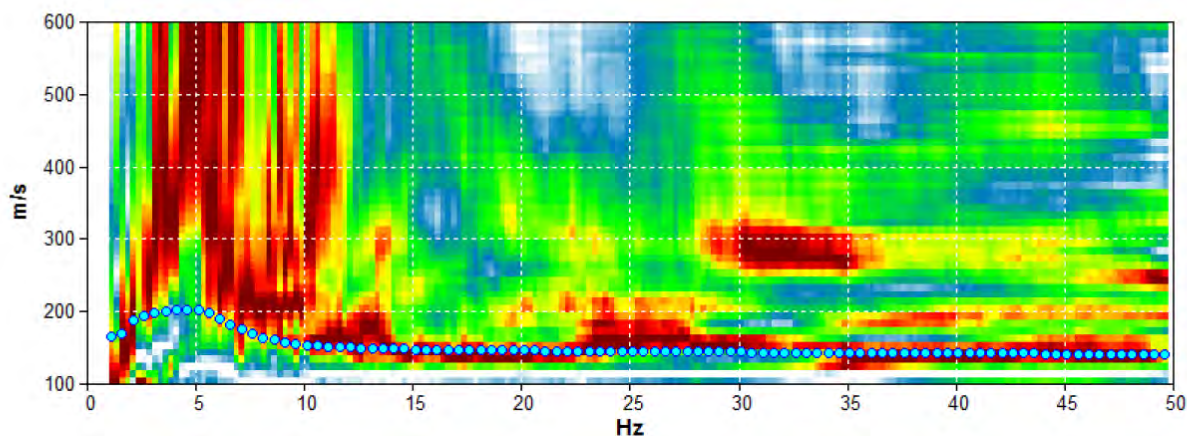


Figura 3: Spettro della velocità di fase rilevato dall'indagine MASW e curva del modello di inversione

Da tale modello di inversione sono state ricavate le velocità delle onde S di seguito esposte.

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa

Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174

C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

Non conoscendo l'esatta quota dell'intervento che verrà effettuato nell'area in esame, vengono indicate le profondità fino a 34 metri, in modo da poter calcolare i vari valori del parametro V_{S30} .

	Profondità (m)	V_S (m/sec)
Strato sismico 1	0.0 – 2.0	150
Strato sismico 2	2.0 – 7.0	160
Strato sismico 3	7.0 – 8.0	150
Strato sismico 4	8.0 – 13.5	170
Strato sismico 5	13.5 – 30.5	300
Strato sismico 6	30.5 – 34.0	170

L'individuazione della velocità degli strati sismici 5 e 6 è stata effettuata con il sismografo digitale Tromino in coppia alla tecnica MASW, in quanto la sola MASW applicata per il presente studio non permette di raggiungere profondità fino a 30 metri. È stato così possibile registrare la seguente curva H/V che, grazie al codice del software *Grilla* di elaborazione dati, ha permesso di creare una curva H/V sintetica e conseguentemente di stimare l'andamento della velocità nella verticale di indagine.

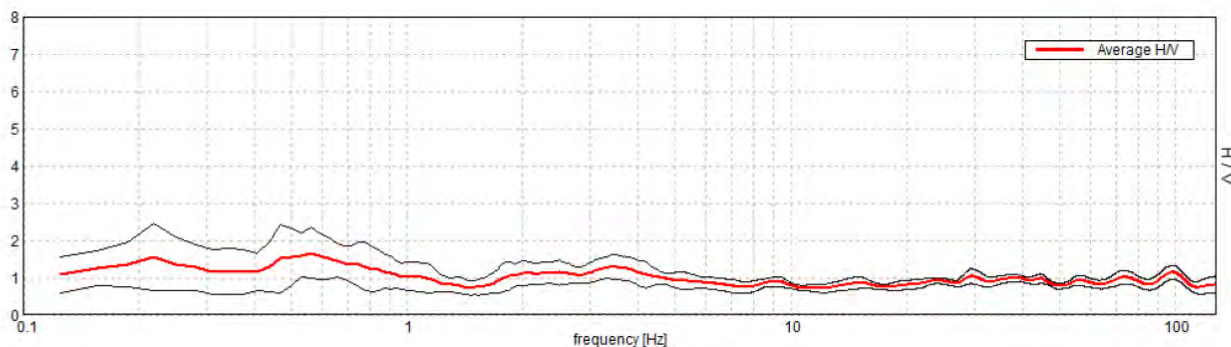


Grafico 1: Diagramma HVSR indicante lo spettro del moto del suolo rilevato nella registrazione R1.

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa

Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174

C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

3. VALUTAZIONE DEL PARAMETRO V_{S30} E DETERMINAZIONE DELLA CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE

Sulla base dei risultati ricavati nel paragrafo 2.4, ed in accordo con l'attuale normativa, viene calcolato il valore del parametro V_{S30} tramite la formula:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

Da cui, rispetto al piano campagna, si ottiene:

$$V_{S30} (0.0+30.0) = 216 \text{ m/sec}$$

Considerando invece varie possibili profondità dell'intervento che verrà effettuato nell'area in esame, si ricava:

$$V_{S30} (1.0+31.0) = 220 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (2.0+32.0) = 221 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (3.0+33.0) = 222 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (4.0+34.0) = 222 \text{ m/sec}$$

Per le velocità sopra elencate, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, viene associata una categoria di suolo di fondazione di tipo *C* definita:

C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 metri, 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 $15 < N_{SPT30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Geologo Mirko Sita

Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa
 Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174
 C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

4. CONCLUSIONI

I risultati dell'indagine sismica MASW vengono sinteticamente esposti di seguito:

1. A seconda della profondità dal piano campagna dell'intervento che verrà effettuato nell'area in esame si ottiene:

$$V_{S30} (0.0+30.0) = 216 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (1.0+31.0) = 220 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (2.0+32.0) = 221 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (3.0+33.0) = 222 \text{ m/sec}$$

$$V_{S30} (4.0+34.0) = 222 \text{ m/sec}$$

2. La categoria del suolo di fondazione per le velocità sopra elencate è pertanto di tipo C.

Lo scrivente resta a disposizione per qualsiasi ulteriore chiarimento o caso dubbio.

Zola Predosa, 13 Luglio 2011

Geologo Mirko Sita



Geologo Mirko Sita

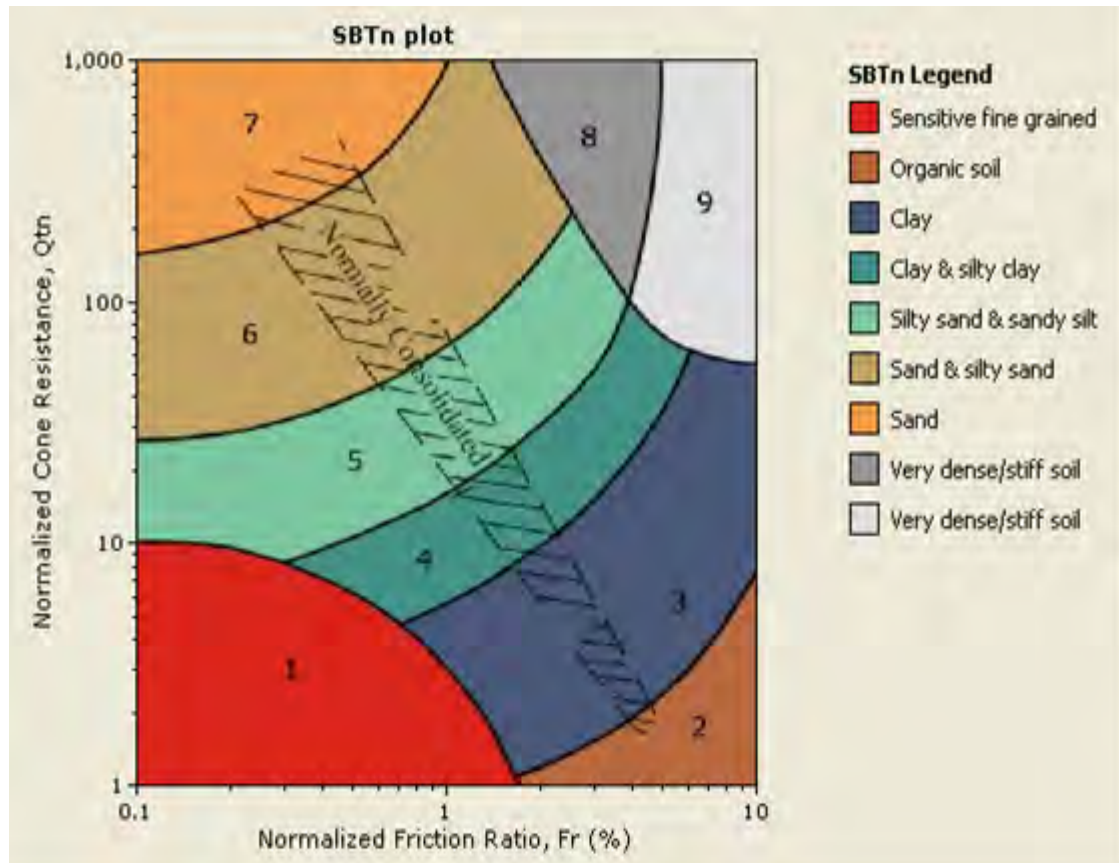
Via Leonardo da Vinci, 17 – 40069 Zola Predosa

Tel. 051-757378 Cell. 349-4515174

C.F. STIMRK74B15A944T – P.I. 02344551201

CLASSIFICAZIONE ORIENTATIVA DEI TERRENI IN BASE AI DATI PENETROMETRICI STATICI Q_{tn} e R_f

(Robertson, 1990)



2018.095-1/RG

GEO-PROBE S.r.l.

Indagini geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

via Cimarosa 119 - Tel. 051/613.30.72

CPT: 18.0826/RSP

Total depth: 20.00 m, Date: 30/10/2018

Cone Type: MK386

Cone Operator: Dr. Conti

Project: Villa Erbosa**Location:** Bologna - Villa Erbosa

Depth (m)	Elevation: 0.00 (m)	Description	qt (MPa)	Ksbt (m/s)	N60	Es (MPa)	Dr	Phi (°)	M (MPa)	Go (MPa)	Su (kPa)	Su ratio	OCR	Gamma (kN/m³)
0.5														
1														
1.5														
2		1.70 Silty sand & sandy silt	3.9	3.10E-6	12.2	50.9	51.8	40.0	57.5	59.2	-	-	-	18.7
2.5		2.32 Silty sand & sandy silt	5.4	1.10E-6	17.5	68.9	54.8	41.4	75.4	86.4	-	-	-	19.6
3		2.65 Silty sand & sandy silt	4.7	1.75E-6	14.6	55.6	47.5	39.0	83.8	70.2	-	-	-	18.9
3.5		3.01 Silty sand & sandy silt	6.2	5.40E-6	17.5	59.7	51.4	38.5	118.0	74.8	-	-	-	18.9
4		3.34 Clay & silty clay	3.9	3.86E-7	14.0	-	-	-	54.3	76.1	188.6	2.8	18.5	19.1
4		3.78 Clay & silty clay	2.5	6.07E-8	10.7	-	-	-	34.7	67.6	124.0	1.8	11.6	18.8
4.5		4.10 Clay	2.3	4.08E-8	10.4	-	-	-	31.6	67.6	112.9	1.5	9.6	18.7
5		4.66 Silty sand & sandy silt	4.4	1.09E-6	14.4	56.7	37.4	36.3	67.1	71.1	-	-	-	18.5
5.5		5.12 Clay	2.8	6.06E-8	12.2	-	-	-	37.7	78.6	132.2	1.4	9.3	18.9
6		5.47 Clay	1.8	6.69E-9	9.1	-	-	-	23.1	67.1	82.6	0.8	5.4	18.5
6		5.92 Clay	1.6	5.68E-9	8.6	-	-	-	20.3	63.5	75.7	0.7	4.5	18.2
6.5		6.46 Clay	1.3	2.21E-9	7.5	-	-	-	12.0	58.7	59.0	0.5	3.3	17.9
7		6.80 Clay	1.1	9.29E-10	6.8	-	-	-	7.3	55.4	47.3	0.4	2.5	17.8
7.5		7.18 Clay	1.3	1.14E-9	7.8	-	-	-	10.1	62.4	56.2	0.4	3.0	18.1
8		7.54 Clay	1.2	9.33E-10	7.5	-	-	-	8.7	62.0	53.2	0.4	2.7	18.0
8.5		8.20 Clay	1.3	1.23E-9	8.2	-	-	-	10.6	66.2	59.8	0.4	2.9	18.2
9		9.02 Clay	1.0	5.96E-10	6.6	-	-	-	4.6	55.9	40.1	0.3	1.9	17.7
9.5		9.38 Clay	0.9	5.31E-10	6.0	-	-	-	3.4	51.1	35.0	0.2	1.6	17.4
10		10.12 Clay	1.1	8.16E-10	7.1	-	-	-	5.8	58.5	46.4	0.3	2.0	17.7
11		10.61 Clay	1.3	9.91E-10	8.3	-	-	-	8.6	65.3	57.2	0.4	2.5	18.0
11.5		10.92 Clay	1.5	1.16E-9	9.0	-	-	-	10.7	71.5	64.5	0.4	2.7	18.2
11.5		11.30 Clay	1.4	9.19E-10	8.4	-	-	-	8.3	68.0	57.6	0.4	2.4	18.0
12		12.13 Clay	1.3	8.07E-10	8.6	-	-	-	7.2	68.3	55.1	0.3	2.2	18.0
13		13.26 Clay	1.6	1.23E-9	9.7	-	-	-	10.4	74.4	67.5	0.4	2.5	18.1
14		13.97 Clay	1.3	7.61E-10	8.4	-	-	-	6.0	65.8	51.9	0.3	1.9	17.8
14.5		14.58 Clay	1.2	6.40E-10	8.0	-	-	-	4.4	61.0	45.0	0.2	1.6	17.6
15		14.92 Clay	1.3	9.72E-10	8.5	-	-	-	5.8	64.3	52.4	0.3	1.8	17.6
16		15.90 Clay	2.2	1.01E-8	11.0	-	-	-	18.6	73.7	94.2	0.5	3.2	17.8
16.5		16.43 Clay	1.5	8.37E-10	9.6	-	-	-	7.1	74.7	59.2	0.3	2.0	18.0
17		16.75 Clay	2.3	2.05E-8	12.0	-	-	-	20.1	83.2	99.3	0.5	3.2	18.2
17.5		17.80 Silty sand & sandy silt	5.8	3.27E-7	21.2	91.1	29.8	34.8	77.3	111.7	-	-	-	18.8
18		17.80 Clay & silty clay	3.9	8.47E-9	16.4	89.7	28.1	34.6	49.2	95.7	176.8	0.9	5.7	18.3
18.5		18.98 Silty sand & sandy silt	5.6	2.49E-7	20.6	-	-	-	73.2	110.3	-	-	-	18.7
18.5		18.47 Clay & silty clay	4.2	9.33E-8	13.0	-	-	-	53.8	87.8	191.8	0.9	5.4	18.2
19		19.31 Clay	2.5	8.47E-9	13.6	-	-	-	21.1	97.3	106.9	0.5	3.1	18.5
20														

Tip resistance (MPa)

Ic

2018.095-1/RG

GEO-PROBE S.r.l.

Indagini geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

via Cimarosa 119 - Tel. 051/613.30.72

Project: Villa Erbosa**Location: Bologna - Villa Erbosa****CPT: 18.0827/RSP**

Total depth: 14.80 m, Date: 30/10/2018

Cone Type: MK386

Cone Operator: Dr. Conti

Depth (m)	Elevation: 0.00 (m)	Description	qt (MPa)	Ksbt (m/s)	N60	Es (MPa)	Dr	Phi (°)	M (MPa)	Go (MPa)	Su (kPa)	Su ratio	OCR	Gamma (kN/m³)
0.5														
1														
1.5		1.01 Clay & silty clay	1.7	1.59E-6	5.8	-	-	-	24.3	32.7	83.5	3.4	22.3	17.8
1.5		1.29 Clay & silty clay	1.5	1.00E-7	5.9	-	-	-	20.2	35.7	72.2	2.5	16.3	18.1
2		1.76 Clay & silty clay	1.7	7.72E-8	6.9	-	-	-	22.9	42.6	81.9	2.2	14.4	18.3
2.5		2.26 Silty sand & sandy silt	2.7	7.42E-7	9.1	38.4	38.7	37.0	36.8	47.1	-	-	-	18.0
3														
3.5		3.02 Clay	1.3	5.63E-8	5.8	-	-	-	16.9	40.2	54.5	0.9	6.2	17.7
4		3.70 Clay	0.9	2.97E-9	4.9	-	-	-	9.3	38.4	40.8	0.6	3.7	17.4
4.5														
5		4.78 Clay	0.8	3.35E-9	5.0	-	-	-	6.5	40.7	37.4	0.4	2.7	17.3
5.5														
6		6.06 Clay	0.9	1.18E-9	5.7	-	-	-	6.2	46.2	41.2	0.4	2.4	17.4
6.5		6.86 Clay	1.3	2.41E-9	7.1	-	-	-	10.8	55.7	57.1	0.5	3.1	17.8
7														
7.5		7.76 Clay	1.7	9.15E-9	8.5	-	-	-	18.2	60.7	76.5	0.6	4.0	17.8
8														
8.5		8.45 Silty sand & sandy silt	3.6	2.72E-7	13.4	62.0	30.0	34.9	48.3	72.9	-	-	-	18.1
9														
9.5		9.12 Clay	2.2	3.66E-8	10.2	-	-	-	27.2	65.9	102.2	0.7	4.9	17.9
10		9.58 Clay	2.0	1.22E-8	9.8	-	-	-	23.3	66.7	90.8	0.6	4.2	17.9
10.5		10.01 Clay	2.1	4.66E-8	9.9	-	-	-	23.6	65.0	87.5	0.6	4.0	17.8
11		10.50 Sand & silty sand	9.8	7.01E-6	26.8	89.0	45.5	36.5	176.4	111.5	-	-	-	19.1
11.5		10.92 Silty sand & sandy silt	6.1	1.65E-6	19.2	72.4	34.6	34.9	100.7	90.7	-	-	-	18.5
11.5		11.17 Clay	1.7	1.38E-8	9.3	-	-	-	15.1	67.4	73.3	0.5	3.1	18.0
12		11.54 Clay	1.4	1.44E-9	8.6	-	-	-	9.4	65.5	61.1	0.4	2.5	17.9
12.5														
13		12.46 Clay	2.1	4.37E-9	11.3	-	-	-	20.8	80.9	92.8	0.6	3.7	18.4
13.5		12.99 Clay	2.0	3.07E-9	10.9	-	-	-	17.8	81.4	86.9	0.5	3.4	18.4
14														
14.5		13.72 Clay	2.1	3.86E-9	11.1	-	-	-	18.7	80.7	90.6	0.5	3.4	18.3
15		14.19 Clay	1.6	2.99E-9	9.3	-	-	-	10.1	69.0	65.8	0.4	2.4	17.9
15		14.69 Silty sand & sandy silt	6.5	1.75E-6	21.0	87.2	36.4	35.2	111.5	101.7	-	-	-	18.6
15.5		Sand & silty sand	15.9	7.13E-5	35.8	100.3	55.2	37.7	200.5	125.6	-	-	-	19.2
16														
16.5														
17														
17.5														
18														
18.5														
19														
19.5														
20														

Tip resistance (MPa)

Ic

2018.095-1/RG

GEO-PROBE S.r.l.

Indagini geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

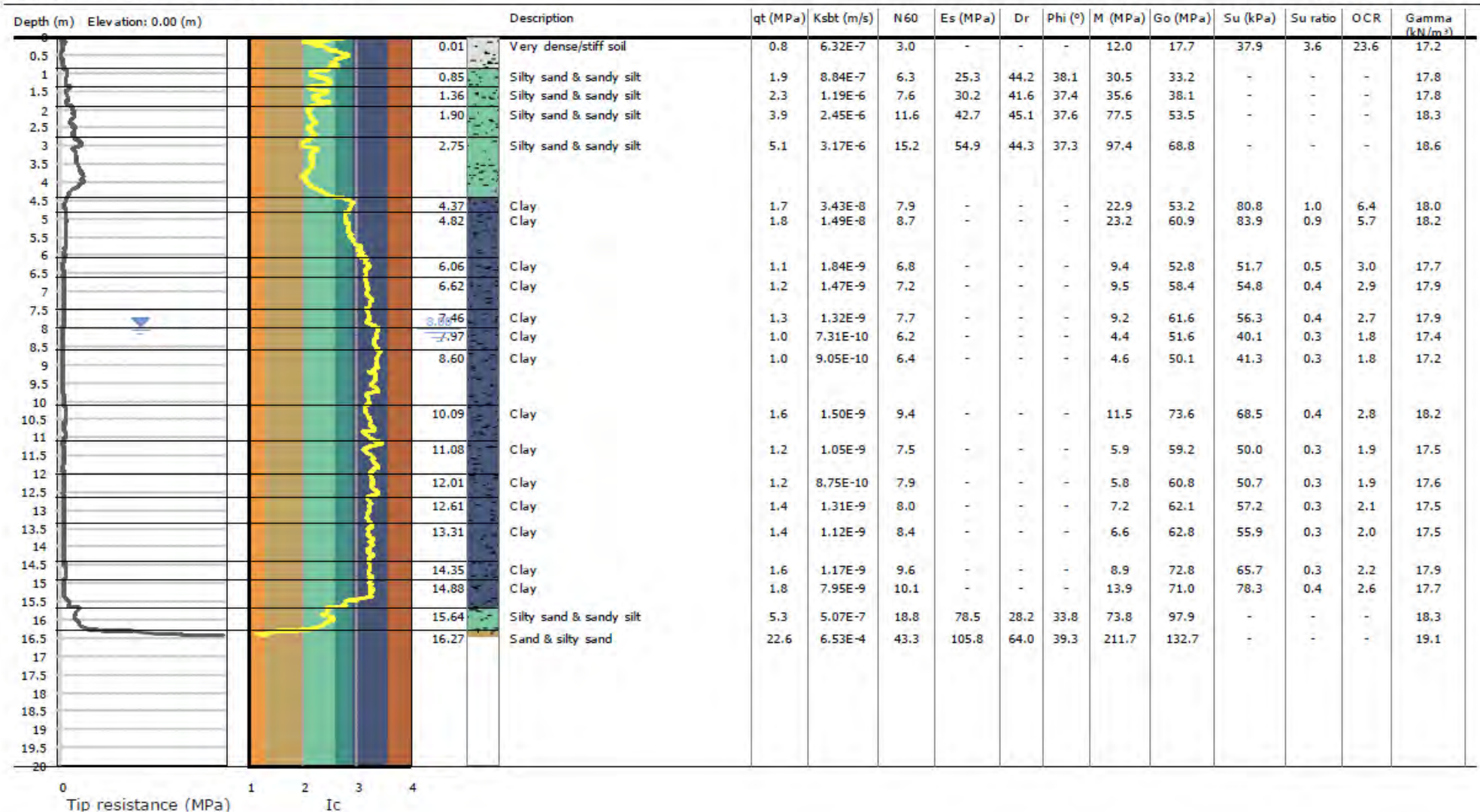
via Cimarosa 119 - Tel. 051/613.30.72

CPT: 14.0853/rsp

Total depth: 16.43 m, Date: 12/12/2014

Cone Type: MKJ386

Cone Operator: Dr. Conti

Project: Casa di Cura Villa Erbosa**Location: Bologna - via dell'Arcoveggio 50/2**

2018.095-1/RG

GEO-PROBE S.r.l.

Indagini geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

via Cimarosa 119 - Tel. 051/613.30.72

Project: Casa di Cura Villa Erbosa**Location:** Bologna - via dell'Arcoveggio 50/2**CPT: 14.0854/RSP**

Total depth: 18.23 m, Date: 12/12/2014

Cone Type: MKJ386

Cone Operator: Dr. Conti

Depth (m)	Elevation: 0.00 (m)	Description	qt (MPa)	Ksbt (m/s)	N60	Es (MPa)	Dr	Phi (°)	M (MPa)	Go (MPa)	Su (kPa)	Su ratio	OCR	Gamma (kN/m³)
0.0														
0.5		Very dense/stiff soil	3.8	5.36E-5	9.9	32.5	90.8	45.5	62.9	40.7	-	-	-	18.7
1.0		Silty sand & sandy silt	2.8	1.94E-6	8.6	35.3	49.2	38.9	51.6	41.8	-	-	-	18.2
1.5														
2.0		Clay & silty clay	2.5	5.67E-7	9.1	-	-	-	34.9	50.0	111.1	2.4	15.5	18.3
2.5		Silty sand & sandy silt	3.1	8.12E-7	10.4	43.5	38.7	37.0	45.0	53.6	-	-	-	18.2
3.0														
3.5		Clay	1.1	1.09E-8	5.6	-	-	-	12.6	40.7	50.6	0.7	4.5	17.4
4.0														
4.5		Clay	0.9	1.82E-9	5.3	-	-	-	6.8	41.4	38.9	0.4	2.8	17.3
5.0														
5.5		Clay	0.7	8.60E-10	4.0	-	-	-	2.9	34.0	27.9	0.3	1.7	16.5
6.0														
6.5		Clay	0.9	1.28E-9	5.9	-	-	-	5.5	46.0	40.8	0.3	2.2	17.2
7.0														
7.5		Clay	1.2	1.27E-9	7.0	-	-	-	7.6	55.4	50.6	0.4	2.5	17.6
8.0														
8.5		Clay	1.0	9.18E-10	6.4	-	-	-	5.4	51.8	43.5	0.3	2.0	17.4
9.0														
9.5		Clay	0.9	8.38E-10	5.8	-	-	-	3.7	44.7	36.5	0.2	1.6	16.9
10.0														
10.5		Clay	1.1	1.11E-9	7.1	-	-	-	6.3	54.8	48.5	0.3	2.1	17.4
11.0														
11.5		Clay	1.3	1.09E-9	8.1	-	-	-	8.0	63.5	55.5	0.3	2.3	17.8
12.0														
12.5		Clay	1.4	1.20E-9	8.8	-	-	-	8.6	67.5	60.3	0.4	2.3	17.9
13.0														
13.5		Clay	1.4	1.32E-9	8.2	-	-	-	7.1	62.2	56.5	0.3	2.1	17.5
14.0														
14.5		Clay	1.3	1.25E-9	8.1	-	-	-	6.2	58.8	53.5	0.3	1.9	17.3
15.0														
15.5		Clay	1.5	1.35E-9	9.1	-	-	-	8.0	67.5	62.3	0.3	2.1	17.7
16.0														
16.5		Clay	1.8	4.04E-9	9.9	-	-	-	11.1	69.4	73.3	0.4	2.4	17.6
17.0														
17.5		Clay & silty clay	3.5	5.81E-8	14.8	-	-	-	43.0	88.3	155.0	0.8	5.0	18.1
18.0		Sand & silty sand	28.7	1.92E-4	58.4	149.3	72.2	41.0	296.8	187.1	-	-	-	20.2
18.5														
19.0														
19.5														
20.0														

Tip resistance (MPa)

Ic

2018.095-1/RG

GEO-PROBE S.r.l.

Indagini geognostiche

40033 Casalecchio di Reno (BO)

via Cimarosa 119 - Tel. 051/613.30.72

CPT: 14.0855/RSP

Total depth: 17.82 m, Date: 12/12/2014

Cone Type: MKJ386

Cone Operator: Dr. Conti

Project: Casa di Cura Villa Erbosa**Location:** Bologna - via dell'Arcoveggio 50/2

Depth (m)	Elevation: 0.00 (m)	Description	qt (MPa)	Ksbt (m/s)	N60	Es (MPa)	Dr	Phi (°)	M (MPa)	Go (MPa)	Su (kPa)	Su ratio	OCR	Gamma (kN/m³)
0														
0.5		Veri dense/stiff soil	0.8	2.98E-6	2.9	-	-	-	11.2	17.1	34.4	3.1	20.5	17.1
1		Silty sand & sandy silt	1.4	4.62E-7	5.0	21.7	36.7	36.9	19.1	26.9	-	-	-	17.1
1.5		Silty sand & sandy silt	2.0	5.11E-7	7.1	31.0	36.0	36.4	28.1	38.1	-	-	-	17.6
2		Silty sand & sandy silt	2.0	5.11E-7	7.1	31.0	36.0	36.4	28.1	38.1	-	-	-	17.6
2.5		Clay & silty clay	1.5	1.10E-7	6.4	-	-	-	20.5	39.6	68.6	1.1	7.3	17.4
3		Clay	1.0	5.44E-9	5.6	-	-	-	11.1	41.8	47.4	0.6	3.9	17.5
3.5		Clay	0.8	1.37E-9	5.0	-	-	-	5.4	38.6	35.7	0.4	2.5	17.1
4		Clay	0.9	1.54E-9	5.2	-	-	-	5.8	41.3	38.8	0.4	2.5	17.1
4.5		Clay	1.0	1.92E-9	6.0	-	-	-	7.2	47.6	45.6	0.4	2.6	17.4
5		Clay	1.2	1.42E-9	7.1	-	-	-	8.7	56.5	52.6	0.4	2.7	17.7
5.5		Clay	1.0	9.47E-10	6.1	-	-	-	5.2	48.5	41.5	0.3	2.0	17.2
6		Clay	1.0	1.46E-9	6.3	-	-	-	5.6	48.4	43.8	0.3	2.1	17.2
6.5		Clay	1.3	1.29E-9	7.6	-	-	-	8.0	59.8	54.6	0.4	2.4	17.7
7		Clay	1.1	9.93E-10	7.1	-	-	-	5.4	53.6	45.9	0.3	1.9	17.3
7.5		Clay	1.4	1.52E-9	8.8	-	-	-	9.6	65.9	62.0	0.4	2.5	17.9
8		Clay	1.4	1.40E-9	8.4	-	-	-	8.0	62.4	57.3	0.3	2.3	17.7
8.5		Clay	1.4	1.83E-9	8.4	-	-	-	8.6	61.8	60.6	0.4	2.3	17.5
9		Clay	1.4	1.81E-9	8.3	-	-	-	7.8	60.7	59.2	0.3	2.2	17.4
9.5		Clay	1.6	2.52E-9	9.2	-	-	-	10.0	66.3	68.5	0.4	2.4	17.6
10		Clay	1.9	8.24E-9	9.8	-	-	-	14.1	65.0	81.6	0.4	2.8	17.4
10.5		Clay	2.4	2.04E-8	11.7	-	-	-	22.6	76.4	105.4	0.5	3.5	17.8
11		Silty sand & sandy silt	5.7	3.50E-7	20.4	86.4	29.3	34.6	75.5	107.3	-	-	-	18.7
11.5		Sand & silty sand	12.3	5.44E-5	30.9	104.6	50.3	37.1	161.8	123.6	-	-	-	19.0
12														
12.5														
13														
13.5														
14														
14.5														
15														
15.5														
16														
16.5														
17														
17.5														
18														
18.5														
19														
19.5														
20														

This software is licensed to: Graziano Grimandi

Presented below is a list of formulas used for the estimation of various soil properties. The formulas are presented in SI unit system and assume that all components are expressed in the same units.

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

$$g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where g_w = water unit weight

:: Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

:: N_{SPT} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

:: Young's Modulus, E_s (MPa) ::

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

:: Relative Density, D_r (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

:: State Parameter, ψ ::

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$$

:: Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

If $I_c > 2.20$

$$\alpha = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$\alpha = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

If $I_c \leq 2.20$

$$M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::

$$V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_{u(rem)}$ (kPa) ::

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to SBT}_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \text{ or } I_c > I_{c_cutoff})$$

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

$$k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Soil Sensitivity, S_t ::

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Effective Stress Friction Angle, ϕ' (°) ::

$$\phi' = 29.5^\circ \cdot B_q^{0.121} \cdot (0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t)$$

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

References

- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5th Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337-1355 (2009)

Procedura di calcolo RSL

Funzione di trasferimento

La procedura di calcolo adoperata per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi 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;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma;
2. Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
 - 2.1. Stima della funzione di trasferimento;
 - 2.2. Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - 2.3. Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1 - 2.2 - 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane sotto a una soglia ritenuta accettabile.
3. Trasformazione inversa di Fourier dello spettro in precedenza calcolato e opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato è corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

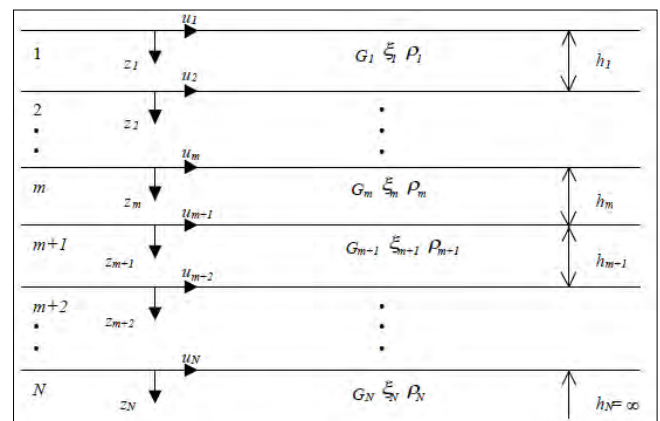
$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, si considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l' N -esimo è il letto di roccia (*bedrock*).

Ponendo come ipotesi che ciascuno strato si comporti come un solido di Kelvin-Voigt

$\tau = G\gamma + \mu \frac{\partial \gamma(z,t)}{\partial z \partial t}$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:



$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; μ la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\mu) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (3)$$

Dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\mu$, ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\mu = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice $*$ indichi la natura complessa delle variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (7)$$

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto ($-z$) e verso il basso ($+z$), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{du}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* [E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)}] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato m di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità ($z = 0$) e al fondo ($z = h_m$), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = (E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità e al fondo dell' m -esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

Dove α_m^* rappresenta il rapporto di impedenza complesso all'interfaccia tra i piani m ed $m+1$, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \sqrt{\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*}} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

Da cui $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere poi applicate agli strati successivi da 2 ad m . La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità dei piani m ed n è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

La velocità $u'(z, t)$ e l'accelerazione $u''(z, t)$ sono legati allo spostamento dalle relazioni

$$u'(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad u''(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad (22)$$

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati n ed m :

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{u'_m}{u'_n} = \frac{u''_m}{u''_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale γ alla profondità z e al tempo t è definita dalla relazione:

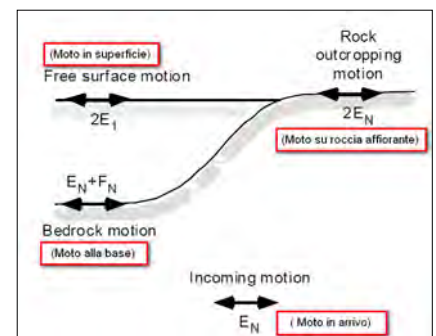
$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (E e^{ik^* z} - F e^{-ik^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

e la corrispondente tensione alla profondità z ed al tempo t dalla:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, è utile riprodurre la rappresentazione schematica di figura in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con



ampiezza pari ad E_N ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a $E_N + F_N$. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal *bedrock* al *bedrock*-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché G è funzione di γ . Nella procedura di calcolo, infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione è ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{\max} K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (27)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (28)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (29)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 \leq PI \leq 70 \\ 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (30)$$

Dove G_{\max} è dato dalla relazione

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (31)$$

Dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (31) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right] \quad (32)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

Fattori di amplificazione

I fattori di amplificazione sono così determinati (procedura sec. Linee Guida Protezione Civile).

1. Si determina il periodo di massimo valore dello spettro medio di input T_{ai} e dello spettro medio di output T_{ao} ;

Si ricavano i valori medi degli spettri di input (S_{ami}) e di output (S_{amo}) nell'intorno T_{ai} e T_{ao} come:

$$S_{am} = \frac{1}{T_a} \int_{0.5T_a}^{1.5T_a} SA(T) dT$$

dove

Sam è lo spettro medio, e può essere Sami o Samo

SA(T) è lo spettro di risposta elastico in accelerazione pari a Sai per l'input, Sao per l'output

Ta vale Tai per l'input Tao per l'output

Si determinano i periodi propri Tvi e Tvo di massimo valore degli spettri di pseudovelocità così definiti

$$S_v(T) = SA(T) \frac{T}{2\pi}$$

dove Sv(T) corrisponde rispettivamente a Svi(T) per l'input e Svo(T) per l'output

Si calcolano i valori medi degli spettri medi di pseudovelocità (Svmi) e (Svmo) nell'intorno di Tvi e Tvo

$$S_{vm} = \frac{1}{0.4T_v} \int_{0.8T_v}^{1.2T_v} S_v(T) dT$$

dove

Svm è il valore medio dello spettro e può essere può essere Svmi o Svmo, rispettivamente per l'input e l'output

Tv può essere Tvi e Tvo, rispettivamente per l'input e l'output

L'intervallo di integrazione è ridotto rispetto a quello dell'accelerazione perché lo spettro di velocità ha, generalmente, un andamento più regolare.

Il valore di Fa è pari a

$$F_a = \frac{S_{amo}}{S_{ami}}$$

Il valore di Fv è pari a

$$F_v = \frac{S_{vmo}}{S_{vmi}}$$

Per determinare i valori dello spettro normalizzato valgono le seguenti relazioni:

Periodo TC

$$TC = 2\pi \frac{S_{vmi} * F_v}{S_{ami} * F_a}$$

Periodo TB

$$TB = \frac{1}{3} TC$$

Il ramo iniziale dello spettro fra T=0 e T=TB si assume lineare con

$$SA(0) = S_{ai}(0) * F_a$$

$$SA(TB) = S_{ami} * F_a$$

Il ramo dello spettro ad accelerazione spettrale costante, tra TB e TC, ha ordinata pari a

$$SA = S_{ami} * F_a$$

Il ramo dello spettro a velocità costante per T>TC ha ordinate pari a

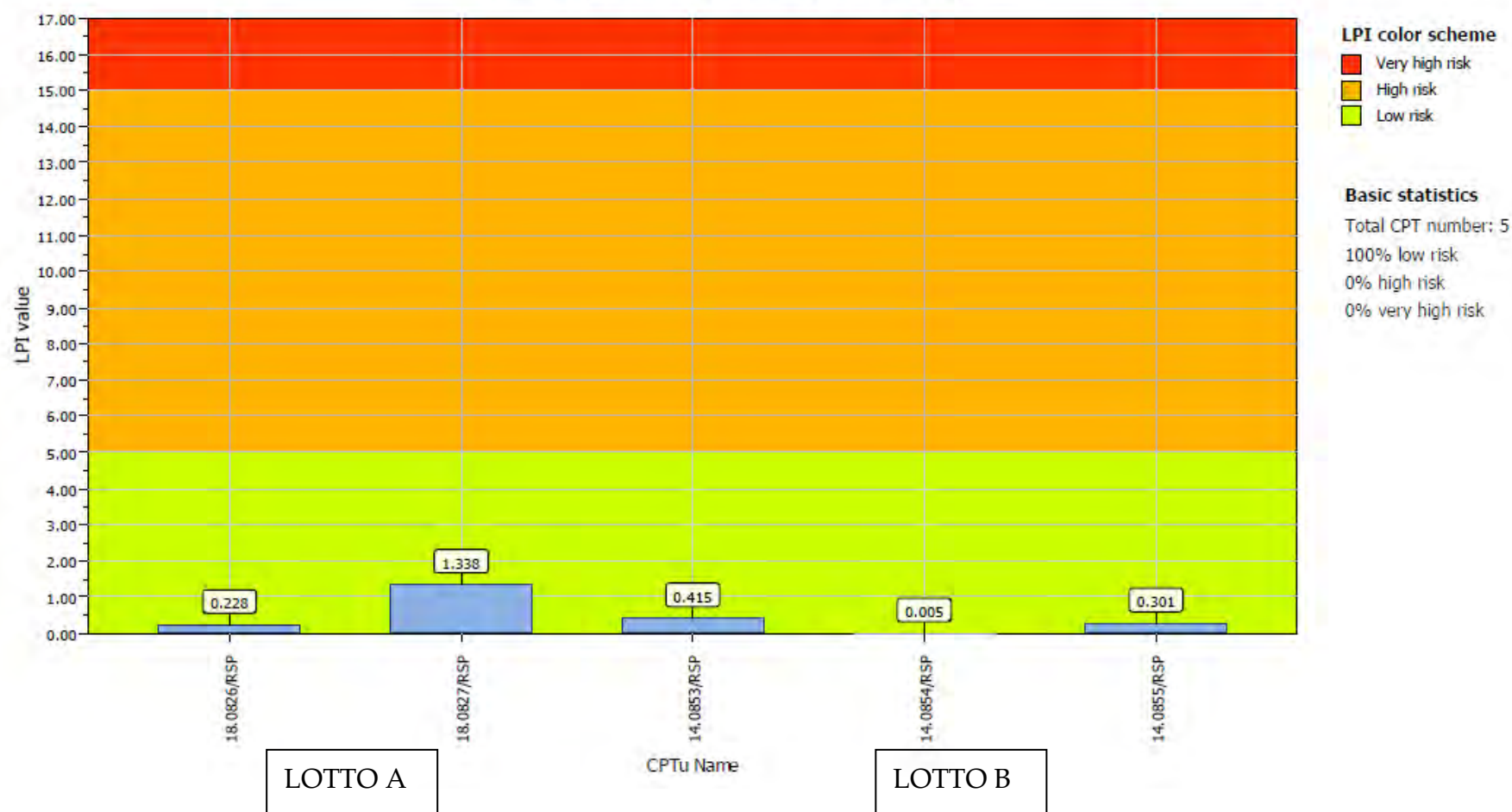
$$SA = S_{ami} * F_a * \frac{TC}{T}$$

INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE DELLE VERTICALI INDAGATE

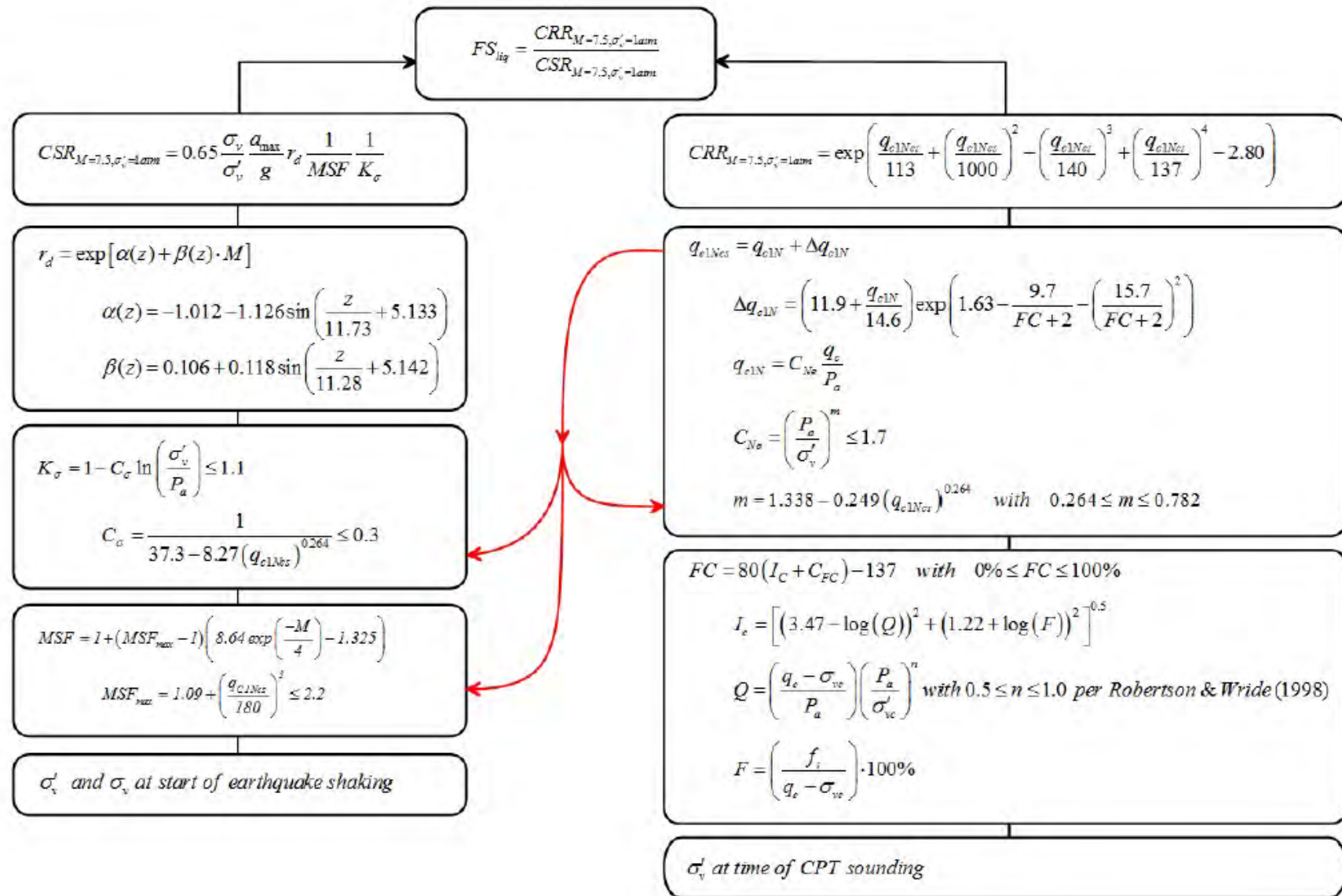
Project title : Casa di Cura Villa Erbosa

Location : Bologna - via dell'Arcoveggio 50/2

Overall Liquefaction Potential Index report



Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, Boulanger & Idriss(2014)



STIMA DEL CEDIMENTO VERTICALE POST SISMICO

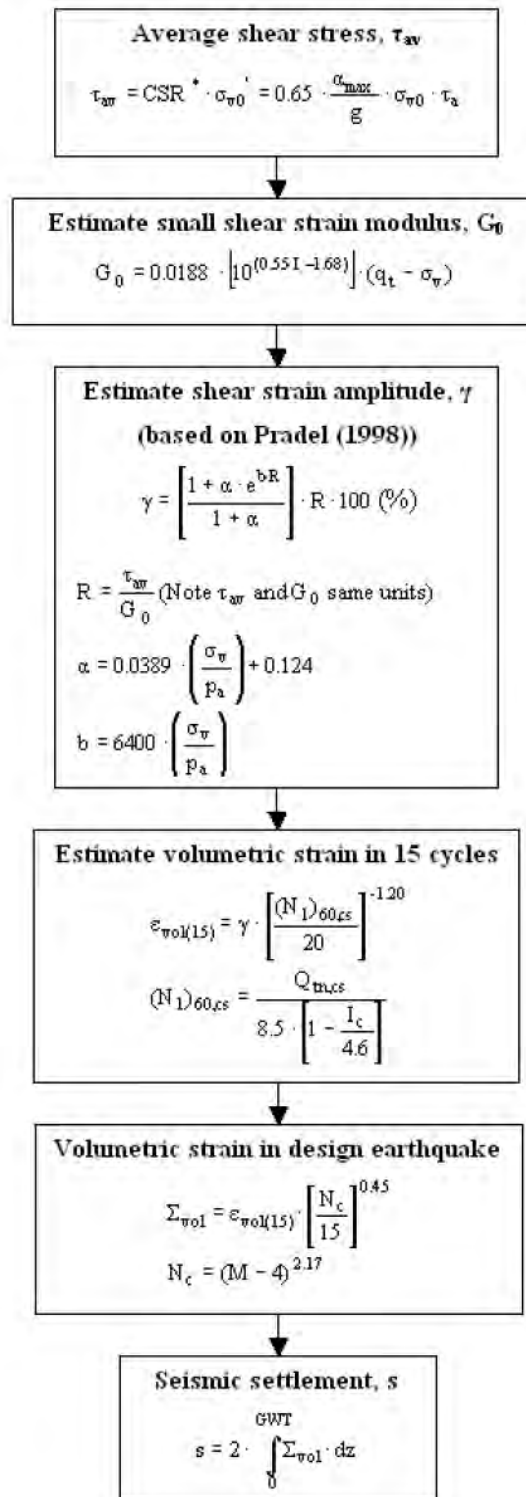
Project title : Casa di Cura Villa Erbosa

Location : Bologna - via dell'Arcoveggio 50/2

Overall vertical settlements report



Procedure for the estimation of seismic induced settlements in dry sands



Robertson, P.K. and Lisheng, S., 2010, "Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT" FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, San Diego, CA