

# COMUNE DI SASSO MARCONI



ACCORDO DI PROGRAMMA IN VARIANTE AREA "EX ALFA WASSERMANN"  
SITA NEL COMUNE DI SASSO MARCONI, FRAZIONE DI BORGONUOVO

PNRR - MISSIONE M5C2-COMPONENTE C2-INVESTIMENTO 2.3

PROGETTO PINQUA QUALITA' DELL'ABITARE

FINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA - NEXT GENERATION EU

RUP: ING. ANDREA NEGRONI

ASSESSORE: GIANLUCA ROSSI

CUP B99J20002220001

PROPONENTE:



COMUNE DI SASSO MARCONI  
P.ZZA DEI MARTIRI DELLA  
LIBERAZIONE N.6  
40037 SASSO MARCONI (BO)

TECNICO RESPONSABILE:

Ing. Alessandra Senesi  
Dott. Alessandro Michelini  
Ing. Francesco Faraone

GRUPPO DI LAVORO:



ARCHITETTO SILVIA POLI  
PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA E URBANISTICA



TITOLO ELABORATO : Integrazione Relazione geologica\_Settembre 2023

CODICI :	CODICE COMMESSA	TIPOLOGIA PROGETTO	TEMA	TIPO ELABORATO	REVISIONE CORRENTE	SCALA
RIFERIMENTI ELABORATO: <b>AM9003</b>	CIG: 9568925EB3	PRELIMINARE	AM	RT	00	-
file: pp_AM9003_00_Integrazione relazione geologica_Settembre 2023						

EMISSIONE		DATA	NOTE DI REVISIONE:	REDATTO	APPROVATO
		02/10/2023	EMISSIONE	Geoprobe s.r.l.	Geoprobe s.r.l.
REV.	1				
	2				
	3				

PROTOCOLLI E VISTI:



## COMUNE DI SASSO MARCONI (BO)

STUDIO GEOLOGICO-TECNICO DEI TERRENI  
DEL PRIMO SOTTOSUOLO DI UN'AREA SITA  
IN LOCALITÀ BORGONUOVO PER LA QUALE  
È PREVISTO UN ACCORDO DI PROGRAMMA  
IN VARIANTE AREA "EX ALFA  
WASSERMANN".

Committente:

– Comune di Sasso Marconi



Codice Lavoro: 2023.070/RG

Revisione 1.0      Settembre 2023

# GEO-PROBE

– *Studio Geologico Associato* –

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

Email: [geoprobe@geo-probe.com](mailto: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 .....	13
6. MODELLAZIONE GEOTECNICA DEL SITO .....	14
7. PARAMETRIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE.....	15
8. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE .....	17
9. PERICOLOSITÀ E CLASSIFICAZIONE SISMICA.....	18
10. MODELLAZIONE SISMICA.....	20
11. MICROZONAZIONE SISMICA .....	26
12. PARAMETRI SISMICI DEL SITO.....	27
13. DEFINIZIONE DELLA RSL MEDIANTE ANALISI NUMERICA.....	29
14. RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI.....	56
15. RESISTENZA DI PROGETTO DEL TERRENO IN CONDIZIONI STATICHE ...	58
16. SCHEDA DI SINTESI .....	62

## ALLEGATI:

- diagrammi penetrometrie statiche con punta elettrica e piezocono;
- certificati penetrometrie statiche;
- diagrammi penetrometrie statiche;
- stratigrafie sondaggi a carotaggio continuo;
- documentazione fotografica sondaggi a carotaggio continuo;
- indagine sismica;
- classificazione orientativa dei terreni attraversati  
(Schmertmann, 1978);
- classificazione orientativa dei terreni attraversati  
(Robertson, 1990);
- verifiche rischio di liquefazione;
- procedure di calcolo RSL.

\* \* \*

## 1. PREMESSA

A seguito dell'incarico ricevuto dalla Galileo Ingegneria S.p.A., per conto del Comune di Sasso Marconi, si trasmette, in conformità con la normativa vigente, la seguente relazione geologico-tecnica riguardante lo studio dei terreni del primo sottosuolo di un'area per la quale è in corso la richiesta di un accordo di programma in variante.

L'area in esame si ubica presso l'ex stabilimento Alfa Wassermann, in Comune di Sasso Marconi (BO) (TAV. 1: estratto C.T.R. Scala 1:5.000; elementi n. 220164 – Borgonuovo di Pontecchio, n. 220123 – San Biagio).

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 numerica della risposta sismica locale;
- g) valutazione della resistenza di progetto dei  
terreni di fondazione in condizioni statiche.



TAV. 1 - UBICAZIONE AREA IN ESAME



Aree 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.
- Delibera della Giunta della Regione Emilia Romagna progr. N. 476/2021 del 12 aprile 2021.

### 3. SITUAZIONE MORFOLOGICA E GEO-LITOLOGICA GENERALE

#### 3.1. *Lineamenti geomorfologici*

L'area in esame si ubica nella fascia collinare pedeappenninica caratterizzata da lievi ondulazioni che degradano progressivamente in direzione Nord verso l'alta Pianura Padana.

Più esattamente si attesta ad una quota compresa tra 68,00 m e 87,00 m s.l.m., in una fascia pressoché pianeggiante o scarsamente acclive (2,5÷3,5 %), con lieve pendenza verso Est – Sud/Est, a ridosso della strada statale n. 64 - Porrettana.

La morfologia è condizionata dalla presenza della conoide intravalliva del Rio dell'Asino Toiano che scorre ad Ovest dell'area in esame, a morfologia piatta, poco accentuata ed ormai fossile che poggia su un terrazzo alluvionale indirettamente connesso.

#### 3.2. *Idrografia*

L'idrografia principale è rappresentata dal Fiume Reno, che dista mediamente 800÷1000 m, mentre quella secondaria è costituita da rii e fossi a carattere prevalentemente stagionale (Rio dell'Asino Troiano), che vanno ad alimentare gli assi idrografici principali.

#### 3.3. *Assetto geolitologico*

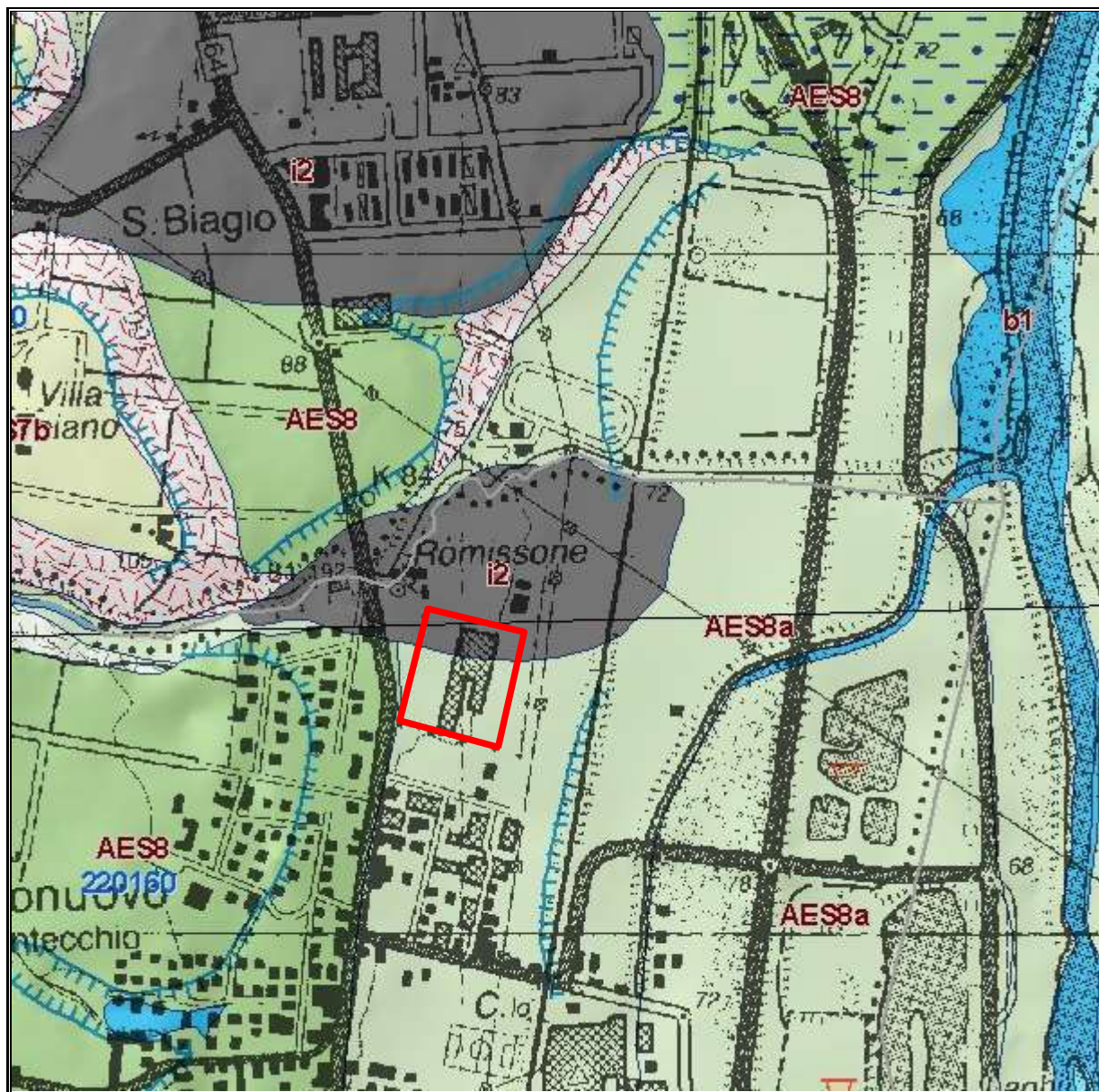
Da un punto di vista geo-litologico, secondo quanto riportato nella Carta Geologica che copre il territorio della Regione Emilia – Romagna (TAV. 2 di seguito riportata), l'area oggetto di intervento ricade in parte all'interno dei terreni classificati come appartenenti a conoide torrentizia inattiva (**i2**), costituiti da depositi alluvionali recenti prevalentemente ghiaiosi a forma di ventaglio aperto verso valle, e in parte nei terreni appartenenti alla Successione neogenico quaternaria del margine appenninico padano (Subsintema di Ravenna, **AES8** e Unità di Modena, **AES8a**), costituiti da ghiaie passanti a sabbie e limi organizzati in numerosi ordini di terrazzi alluvionali.

La fascia montuosa presente a Ovest dell'area in esame risulta invece caratterizzata dalla presenza dei terreni appartenenti alla Formazione di Monghidoro (**MOH**), appartenenti alle Unità liguri, e costituiti da torbiditi arenaceo pelitiche in strati generalmente spessi con rapporto A/P di circa 2/1.

Nella TAV. 3 del PTM – Carta di area vasta del Rischio Idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti, non è prevista alcuna prescrizione.



TAV. 2 - CARTA GEO-LITOLOGICA



Area in esame

Scala 1:10.000



## LEGENDA CARTA GEO-LITOLOGICA



### b1 - Deposito alluvionale in evoluzione

Deposito costituito da materiale detritico generalmente non consolidato (ghiaie, talora embriciate, sabbie e limi argillosi) di origine fluviale, attualmente soggetto a variazioni dovute alla dinamica fluviale. Può essere talora fissato da vegetazione (b1a).



### i2 - Conoide torrentizia inattiva

Depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallette trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, attualmente non soggetti ad evoluzione.



### AES8a - Unità di Modena

Nei settori intravallivi ghiaie prevalenti organizzate in 2 ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nella piana alluvionale ghiaie, sabbie, limi ed argille. Limite superiore sempre affiorante dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro privo di reperti archeologici romani, o più antichi, non rimaneggiati. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale nelle aree intra Spessore massimo in pianura 7 metri, nel sottosuolo circa 10m.

(Età post-romana (IV-VI sec. d.C. - Attuale; datazione archeologica).)



### ANT - Marne di Antognola

Marne argillose e marne siltose verdognole o grigie con patine manganesifere; fratturazione concoide o con tipiche superfici concentriche; frequenti i microfossili e talora i bioclasti. Stratificazione da molto sottile a media, talora difficilmente percepibile, sia per scarsa classazione granulometrica che per bioturbazione. Sono presenti rari livelli torbiditici di arenarie vulcanoclastiche, arcose e quarzoso-feldspatiche, da sottili a medi, e strati sottili e sottilissimi, discontinui, di cineriti biancastre, tipicamente alterate in giallo o giallo ocra. Localmente si osservano anche orizzonti caotici (sl) e livelli di breccie con clasti extraformazionali. Localmente è stata distinta una litofacies arenacea (ANTa), potente fino a qualche decina di metri, caratterizzata dalla presenza di torbiditi sottili con base arenitica centimetrica. Il limite inferiore è netto, discordante, su MMP, sfumato su RAN; in eteropia con MVT. Ambiente di sedimentazione di piattaforma esterna, scarpata e base scarpata con apporti torbiditici. La potenza totale della formazione raggiunge alcune centinaia di metri.

(Rupeliano terminale - Burdigaliano?)



### FAA - Argille Azzurre

Argille, argille marnose, marne argillose e siltose grigie e grigio-azzurre, talora grigio plumbeo, in strati medi e subordinatamente sottili, a giunti poco o non visibili per bioturbazione, con subordinati strati arenacei sottili risedimentati. Localmente sono presenti sottili livelli discontinui di biocalcareni fini e silti giallo, o ocra se alterate, sottilmente laminate. Nella parte alta possono essere presenti slumps. Limite inferiore paraconcordante o marcato da una lieve discordanza angolare su FCO, discordante su unità più antiche. Potenza di alcune centinaia di metri.

(Pliocene inf. - Pleistocene sup.)

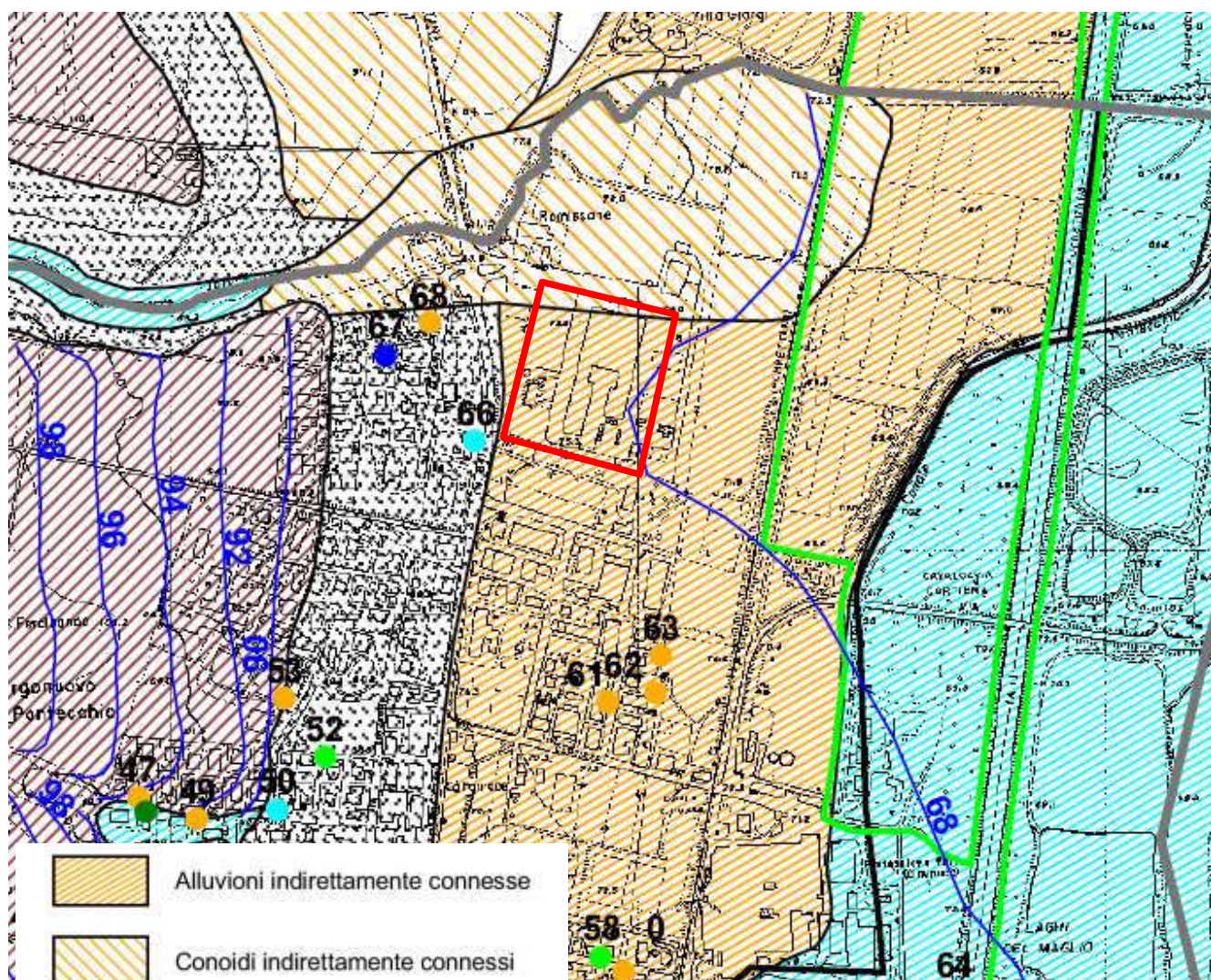


### 3.4. Condizioni idrogeologiche

Come visto l'ambito di progetto è collocato su una conoide intravalliva a morfologia piatta, poco accentuata ed ormai fossile che poggia su un terrazzo alluvionale indirettamente connesso.

In considerazione delle modalità deposizionali che vede l'alternarsi di sedimenti grossolani permeabili e di sedimenti fini impermeabili si ritiene che l'unità idrogeologica sia caratterizzato dalla presenza di più falde sovrapposte la prima delle quali, permeante il materasso alluvionale ghiaioso e confinato da un substrato argilloso, come riportato dalla cartografia del P.O.C. di Sasso Marconi presenta un'isopiezia pari a 68,00 m s.l.m. cui corrisponde, in funzione della morfologia attuale, un livello statico compreso tra 3,00 m e 7,00 m, con deflusso Sud/Ovest – Nord/Est.

Per quanto concerne il Rischio Idraulico non è presente alcuna prescrizione; all'interno del comparto è presente il Rio dell'Asino Toiano per il quale il P.S.C. prevede una zona di tutela dei corpi idrici superficiali.

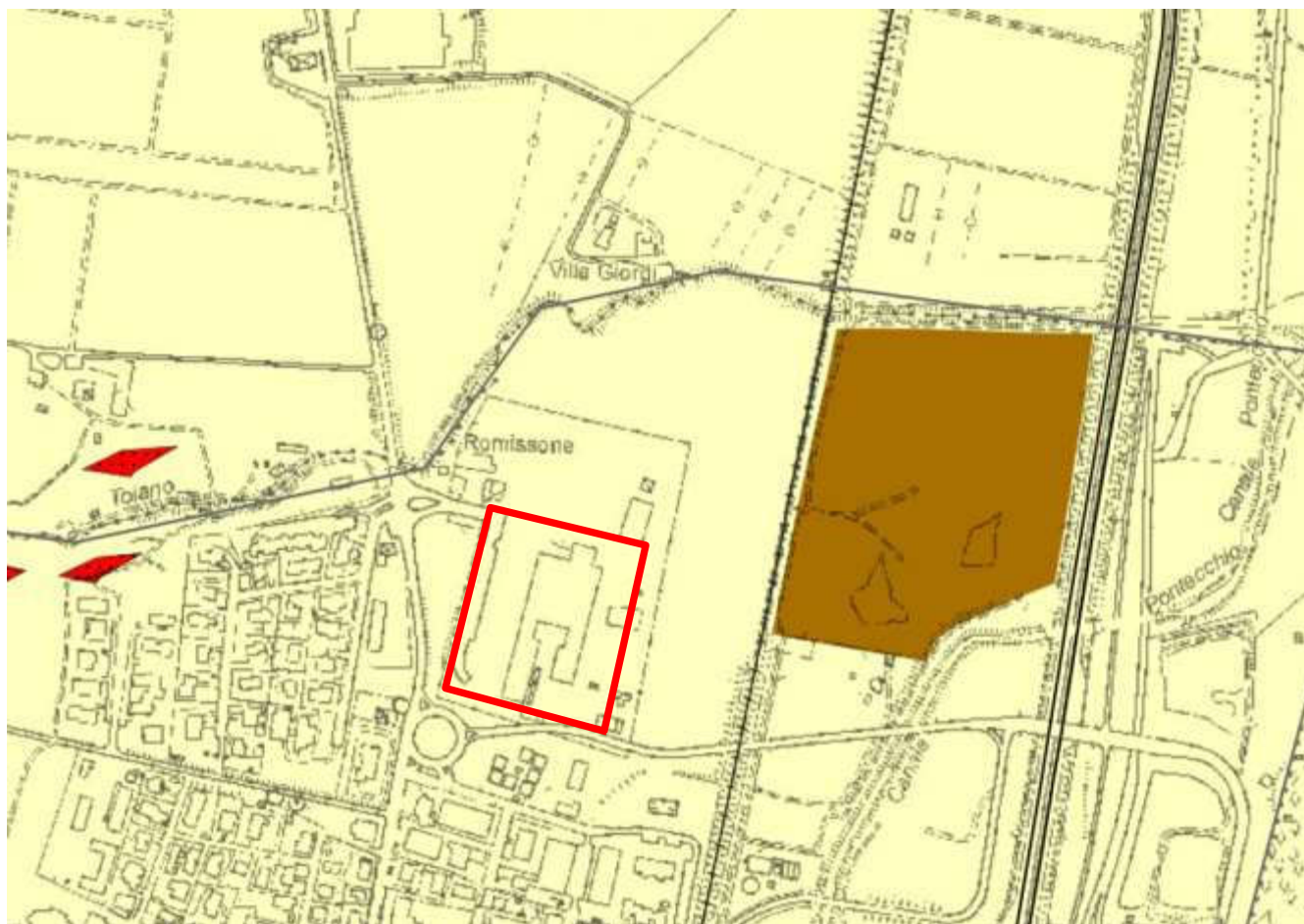




### 3.5. Rischio sismico

Nella TAV. 4 del PTM – Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali – l'area di intervento è classificata come Zona AV – e detriti  $i \leq 15^\circ$  – Depositi alluvionali di fondovalle e terrazzati e depositi di conoide alluvionale affioranti; corpi detritici di varia origine, generalmente a granulometria mista con spessore  $H \geq 3$  m e inclinazione del pendio  $i \leq 15^\circ$  per la quale è richiesta la stima dell'amplificazione mediante II livello di approfondimento.

#### TAV. 4 PTM



#### 4. INDAGINE GEOGNOSTICA

Nell'area interessata dall'intervento, allo scopo di verificare la successione stratigrafica che caratterizza i terreni del primo sottosuolo e valutare le caratteristiche fisico meccaniche degli stessi, è stata eseguita una indagine geognostica in sito e un'indagine sismica, al fine di determinare il parametro VSeq e classificare il suolo di fondazione del sito.

##### 4.1. Indagine geognostica in sito

L'indagine geognostica in sito, eseguita dalla Geo-Probe S.r.l., è consistita nella realizzazione di n. 3 penetrometrie statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU) di lunghezza compresa tra 5,34 m e 9,08 m; vengono inoltre utilizzati i dati di n. 4 penetrometrie statiche con punta meccanica (CPT 1, 2, 6 e 7) che, rispetto al p.c. attuale, hanno raggiunto profondità comprese tra 7,60 m e 9,80 m e n. 3 sondaggi con il metodo del carotaggio continuo (C2, C3 e C13), di lunghezza compresa tra 13,50 m e 16,00 m eseguite nel 2013 e 2014 nella stessa area.

L'esatta ubicazione dei punti indagati viene riportata di seguito nella TAV.  
3.

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 cm<sup>2</sup> per la misurazione della resistenza alla punta ed un manicotto di frizione (*friction jacket*) della superficie di 150 cm<sup>2</sup> 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.



Per l'esecuzione delle prove con punta meccanica è stato utilizzato un penetrometro montato su Mercedes Unimog 400L con cella di carico da 200 kN che impiega una punta conica con apertura di 60° e superficie di 10 cm<sup>2</sup> per la misurazione della resistenza alla punta ed un manicotto di frizione (*friction jacket*) della superficie di 150 cm<sup>2</sup> per la misurazione dell'attrito laterale locale (punta meccanica tipo *Begemann*).

I risultati delle penetrometrie statiche 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, ed il rapporto  $R_f$  che orientativamente ci permette una classificazione dei terreni attraversati (*Schmertmann J.H., 1978*).

Le suddette letture vengono eseguite per avanzamenti di 20 cm.

Per l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo è stata utilizzata una sonda perforatrice IPC modello DRILL 830L con le seguenti caratteristiche:

- Coppia alla rotazione	1182 Kgm
- Velocità di rotazione	457 rpm
- Corsa continua	400 cm
- Spinta testa di rotazione	5000 Kg
- Trazione testa di rotazione	5000 Kg
- Pressione pompe:	1) schiuma 50 bar
	2) a vite 24 bar
- Argano a fune d'acciaio	1100 Kg
- Aste di perforazione con nipples	
a filetto conico	n. 1 x 3000 mm x 76 mm
	n. 9 x 1500 mm x 76 mm
	n. 1 x 750 mm x 76 mm
- Carotieri semplici	n. 2 x 1500 mm x 101 mm
- Rivestimento a filettatura tronco conica	
con scarpa provvista di widia esterni	
per alesare il foro - sp. 8 mm	n. 9 x 1500 x 127
- Scandaglio a filo graduato da 50 m	
- Freatimetro BFK graduato della lunghezza di 50 m	
- Penetrometro tascabile tipo tubolare SEB (scala 0÷4,5 kg/cm <sup>2</sup> )	
- Scissometro tascabile S75 S76 (scala 0÷2 kg/cm <sup>2</sup> )	

I fori di carotaggio n. 1÷3 e 13 sono stati attrezzati con piezometro a tubo aperto microfessurato del diametro di 2"1/2, protetti in superficie da chiusino metallico.

Le stratigrafie ottenute e la documentazione fotografica delle cassette catalogatrici, vengono riportate in allegato negli appositi moduli.

#### **4.2. Indagine sismica**

Allo scopo di definire la frequenza di risonanza dei terreni e la velocità media delle onde sismiche di taglio  $V_s$ , è stata eseguita un'indagine sismica locale mediante metodologia di sismica passiva con misura del Rumore Sismico Passivo (microtremori).

Lo strumento utilizzato è il tromografo digitale Tromino prodotto dalla Micromed S.p.A.; si tratta di un sismografo di dimensioni molto contenute che contiene tre sensori elettrodinamici ortogonali (velocimetri) che permettono la registrazione del microtremore nel campo di frequenze compreso tra 0 e 256 Hz.

Il metodo di indagine utilizzato è quello a stazione singola dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSr).

Il segnale di microtremore, dopo essere stato acquisito dai tre velocimetri, ad una frequenza di campionamento di 128Hz per un intervallo di tempo di 20', amplificato e digitalizzato a 24 bit equivalenti, viene suddiviso in intervalli di pochi secondi e mediante il software Grilla per ogni intervallo viene eseguita un'analisi spettrale nelle tre componenti e il calcolo dei rapporti spettrali H/V.

Il valore di tale rapporto è direttamente correlato alla frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza mentre la frequenza di risonanza è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio  $V_s$  dalla relazione:

$$f_i = V_{si}/4h_i$$

dove:

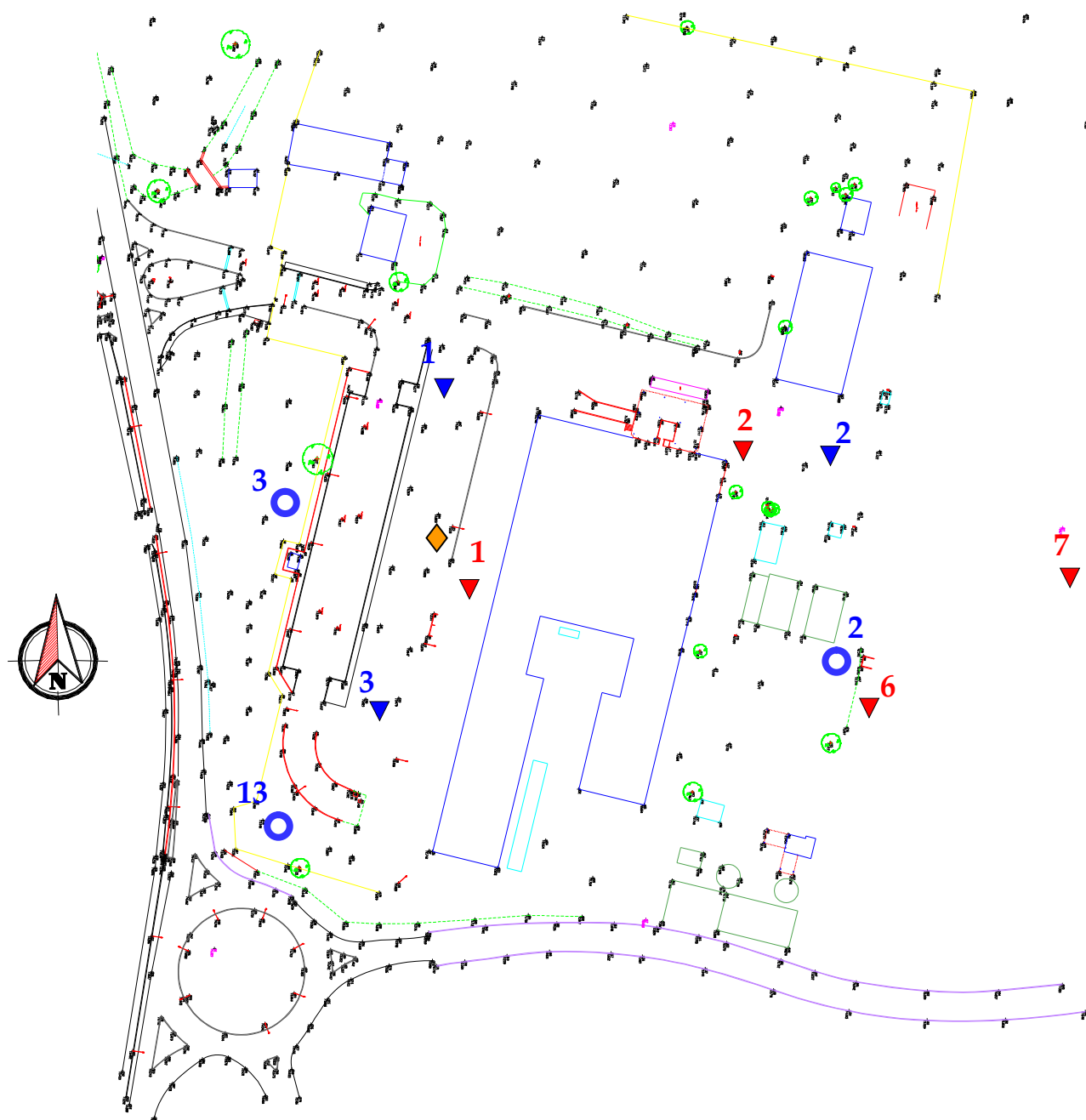
$f_i$  = frequenza dello strato  $i$ -esimo;

$V_{si}$  = velocità delle onde S dello strato  $i$ -esimo;

$h_i$  = spessore dello strato  $i$ -esimo.

I risultati dell'indagine sismica vengono restituiti in forma diagrammatica nelle apposite tavole allegate, dove vengono riportate gli spettri delle singole componenti del moto, le curve relative al rapporto spettrale orizzontale su verticale H/V e il grafico  $V_s$ /profondità.

## TAV. 3 – UBICAZIONE INDAGINE GEOGNOSTICA



- ▼ Penetrometrie statiche con punta meccanica
- ▼ Penetrometrie statiche con punta elettrica e piezocono
- Sondaggi a carotaggio continuo
- ◆ Indagine sismica

Scala 1:2.000

## 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, con riferimento al p.c. attuale, possiamo ricostruire la seguente successione stratigrafica:

al tetto, al disotto di un orizzonte di terreno di riporto e/o pedogenizzato dello spessore medio di  $0,40 \div 1,60$  m, sono inizialmente presenti dei limi argillosi e/o debolmente sabbiosi di colore nocciola, di consistenza plastica - plastico tenera ( $q_c = 0,7 \div 1,9$  MPa;  $R_f = 3,8 \div 7,2$  %) e localmente plastico dura - dura ( $q_c = 2,2 \div 5,7$  MPa;  $R_f = 3,2 \div 5,4$  %), e umidità medio scarsa, inglobanti orizzonti sabbioso limosi e/o viceversa, con rari ciottoli di addensamento da medio ad elevato ( $q_c = 3,5 \div 36,1$  MPa;  $R_f = 0,6 \div 2,8$  %) che hanno determinato l'arresto in corrispondenza della CPTU 2.

Da una profondità variabile da 6,60 m a 9,00 m si evidenziano delle ghiaie in matrice limo sabbiosa di colore nocciola, di addensamento da medio ad elevato ( $q_c = 5,4 \div 38,8$  MPa;  $R_f = 0,5 \div 1,3$  %) in matrice sabbiosa a tratti prevalente ( $q_c = 2,2 \div 7,8$  MPa;  $R_f = 1,3 \div 1,8$  %) e umidità da elevata alla totale saturazione idrica.

Suddetti litotipi sono sopportati da argille limose a struttura scagliosa di colore da bruno nocciola a grigio di consistenza elevata ed umidità da medio scarsa a scarsa, il cui tetto è stato evidenziato ad una profondità variabile da 12,20 m a 15,10 m dal p.c. attuale.

I suddetti terreni sono caratterizzati dalla presenza di una circolazione idrica superficiale il cui livello statico, al termine dell'indagine, rispetto al p.c. attuale è stato misurato a profondità variabili da 2,50 m a 4,20 m; letture eseguite all'interno dei piezometri posti in opera nel corso dei sondaggi a carotaggio continuo hanno evidenziato la presenza della falda all'interno dei terreni grossolani il cui livello statico è stato misurato a profondità variabili da 6,50  $\div$  7,10 m a valle a 9,90  $\div$  10,50 m verso monte.

Per un maggior dettaglio in allegato, oltre alla stratigrafia dei sondaggi a carotaggio continuo, viene riportata la litologia dei terreni del primo sottosuolo rilevata in corrispondenza delle penetrometrie statiche e ricostruita mediante la teoria di Robertson (1990) per le prove con punta elettrica e piezocono e di Schmertmann (1978) per le prove con punta meccanica.



## 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 è possibile distinguere il terreno secondo le unità geotecniche indicate nella tabella successiva.

U.G.	Profondità m da p.c.		Litologia prevalente	qd MPa	$\gamma$ (kN/mc)	Cu (kPa)	$\varphi$ (°)	Dr (%)
	da	a						
0	0,00	0,40÷1,60	R/P	-	-	-	-	-
A	0,40÷3,90	6,60÷9,00	LAS	0,7÷1,9	18,9÷19,3	35÷95	-	0
A1	1,70÷2,20	2,90÷3,00	LAS	2,2÷5,7	19,3÷19,7	107÷228	-	0
A2	1,60÷4,80	3,20÷5,80	SLG	3,5÷36,1	18,5÷18,6	0	31÷45	25÷100
B	6,60÷9,00	12,20÷15,10	GS/SL	5,4÷38,8	18,5÷18,6	0	34÷44	45÷100

R/P = terreno di riporto e/o pedogenizzato;

LAS = limi argillosi e/o debolmente sabbiosi;

SLG = sabbie limose con ciottoli;

GS/SL = ghiaie in matrice sabbioso limosa localmente prevalente.

## 7. PARAMETRIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Sulla base dei risultati dell'indagine geognostica è stato possibile suddividere il volume significativo di terreno in unità geotecniche, delle quali di seguito, vengono definiti i valori medi e caratteristici dei parametri geotecnici, dove per valore caratteristico ( $k$ ) di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro (N.T.C. 6.2.2).

### Unità geotecnica 0

È costituita da terreno di riporto e/o pedogenizzato e si evidenzia sino ad una profondità variabile da 0,40 m a 1,60 m dal p.c. attuale.

### Unità geotecnica A

È costituita da limi argillosi e/o debolmente sabbiosi di consistenza plastica, ed umidità presumibilmente medio scarsa.

L'unità A si evidenzia da una profondità variabile da 0,40 m a 3,90 m sino ad una profondità variabile da 6,60 m a 9,00 m dal p.c. attuale, ed è caratterizzata dai parametri geotecnici riportati in tabella.

Verticale	qc (MPa)	$\gamma$ (kN/mc)	Cu (kPa)	Cuk (kPa)	$\varphi$ (°)	$\varphi_k$ (°)
CPTU 1	1,3	19,1	65	60	-	-
CPTU 2	1,4	19,1	70	60	-	-
CPTU 3	1,1	19,1	55	50	-	-
CPT 1	1,6	19,2	80	75	-	-
CPT 2	1,3	19,1	65	60	-	-
CPT 6	1,7	19,2	85	80	-	-
CPT 7	1,6	19,2	80	65	-	-

### Unità geotecnica A1

È costituita da limi argillosi e/o debolmente sabbiosi di consistenza da plastico dura a dura, ed umidità medio scarsa.

L'unità A1 si evidenzia localmente da circa 1,70÷2,20 m sino ad una profondità di 2,90÷3,00 m dal p.c. attuale, ed è caratterizzata dai parametri geotecnici riportati in tabella.

Verticale	qc (MPa)	$\gamma$ (kN/mc)	Cu (kPa)	Cuk (kPa)	$\varphi$ (°)	$\varphi_k$ (°)
CPTU 2	4,4	19,4	175	165	-	-
CPTU 3	3,2	19,3	140	130	-	-

Unità geotecnica A2

È costituita da sabbie limose con rari ciottoli, di addensamento medio buono ed umidità media.

L'unità A2 si evidenzia localmente da circa 1,60÷4,80 m sino ad una profondità variabile da 3,20 a 5,80 m dal p.c. attuale, ed è caratterizzata dai parametri geotecnici riportati in tabella.

Verticale	qc (MPa)	$\gamma$ (kN/mc)	Cu (kPa)	Cuk (kPa)	$\varphi$ (°)	$\varphi_k$ (°)
CPTU 2	7,9	18,5	0	0	39	38
CPTU 3	9,7	18,5	0	0	40	39
CPT 2	8,7	18,5	0	0	35	33
CPT 6	5,1	18,5	0	0	34	33

Unità geotecnica B

È costituita da ghiaie in matrice sabbioso limosa localmente prevalente, di addensamento da medio a buono, presumibilmente sature.

L'unità B si evidenzia da circa 6,60÷6,90 m sino alla profondità variabile da 12,20 m a 15,10 m dal p.c. attuale, ed è caratterizzata dai parametri geotecnici riportati in tabella.

Verticale	qc (MPa)	$\gamma$ (kN/mc)	Cu (kPa)	Cuk (kPa)	$\varphi$ (°)	$\varphi_k$ (°)
CPTU 1	21,8	18,5	0	0	40	38
CPTU 3	18,1	18,5	0	0	39	38
CPT 1	23,3	18,5	0	0	38	35
CPT 2	19,8	18,5	0	0	37	35
CPT 6	32,2	18,5	0	0	42	40
CPT 7	26,0	18,5	0	0	41	39

## 8. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE

Nel sito di indagine sono state effettuate due misure di microtremore della durata di 20', allo scopo di definire le frequenze di risonanza fondamentali dei terreni del sottosuolo e, tramite inversione, di ricostruire il modello di sottosuolo in termini di profondità e velocità delle onde di taglio.

L'indagine sismica è stata condotta su terreno naturale duro e asciutto in condizioni meteo buone, in presenza di vento di debole entità tale da non creare disturbo durante la registrazione.

Gli spettri delle singole componenti del moto non mostrano particolari andamenti imputabili a fonti di rumore antropico; anche l'accoppiamento dello strumento con il terreno risulta di buona qualità, dato che le tre curve presentano un andamento concordante, pertanto i picchi evidenziati nel diagramma HVSR sono da considerarsi naturali.

Il diagramma HVSR mostra a 7,3 Hz, un picco generato dal contrasto di impedenza dovuto al contatto tra i materiali superficiali e il materasso ghiaioso evidenziato nel corso dell'indagine ad una profondità media di circa 10,00 m.

Tale picco è stato utilizzato per ancorare il diagramma H/V ai dati stratigrafici ricavando una curva H/V teorica che consente di stimare l'andamento della velocità sismica lungo la verticale indagata.

La buona sovrapposizione della curva sintetica H/V alla curva misurata, confermano la correttezza del modello di sottosuolo ottenuto con l'inversione.

La definizione dei sismostrati in termini di velocità delle onde di taglio permettono di calcolare il parametro Vs30 richiesto dall'attuale normativa, secondo l'equazione:

$$V_{s30} = 30 / \sum (h_i / V_{si})$$

dove:

$h_i$  = spessore dello strato  $i$ -esimo;

$V_{si}$  = velocità dello strato  $i$ -esimo.

Nel caso in esame per i valori considerati la Vs30 al p.c. risulta pari a 352 m/s.

La frequenza caratteristica di risonanza del sito, ricavabile dal diagramma HVSR rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di doppia risonanza.



## 9. PERICOLOSITÀ E CLASSIFICAZIONE SISMICA

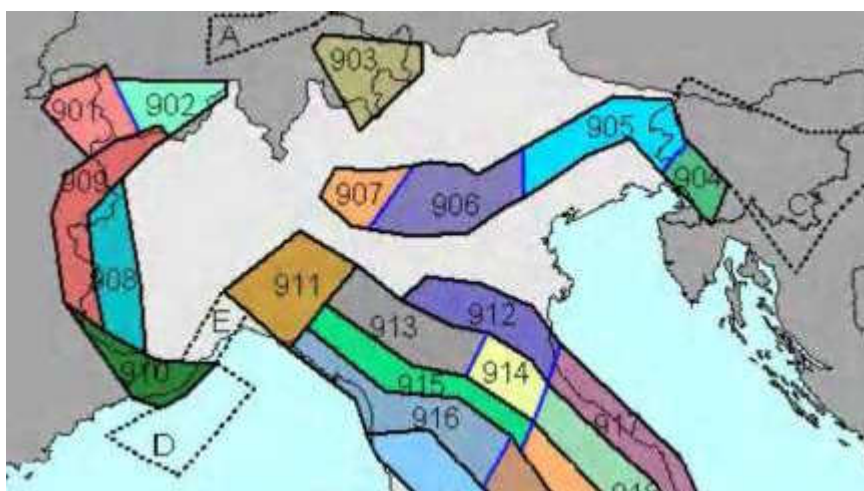
La pericolosità e il rischio sismico del territorio nazionale sono stati affrontati dal Servizio Sismico Nazionale utilizzando il calcolo probabilistico di Cornell, in grado di considerare tutte le possibili sorgenti influenzanti di un sisma.

La pericolosità sismica 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 Sasso Marconi (TAV. 4 – 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.

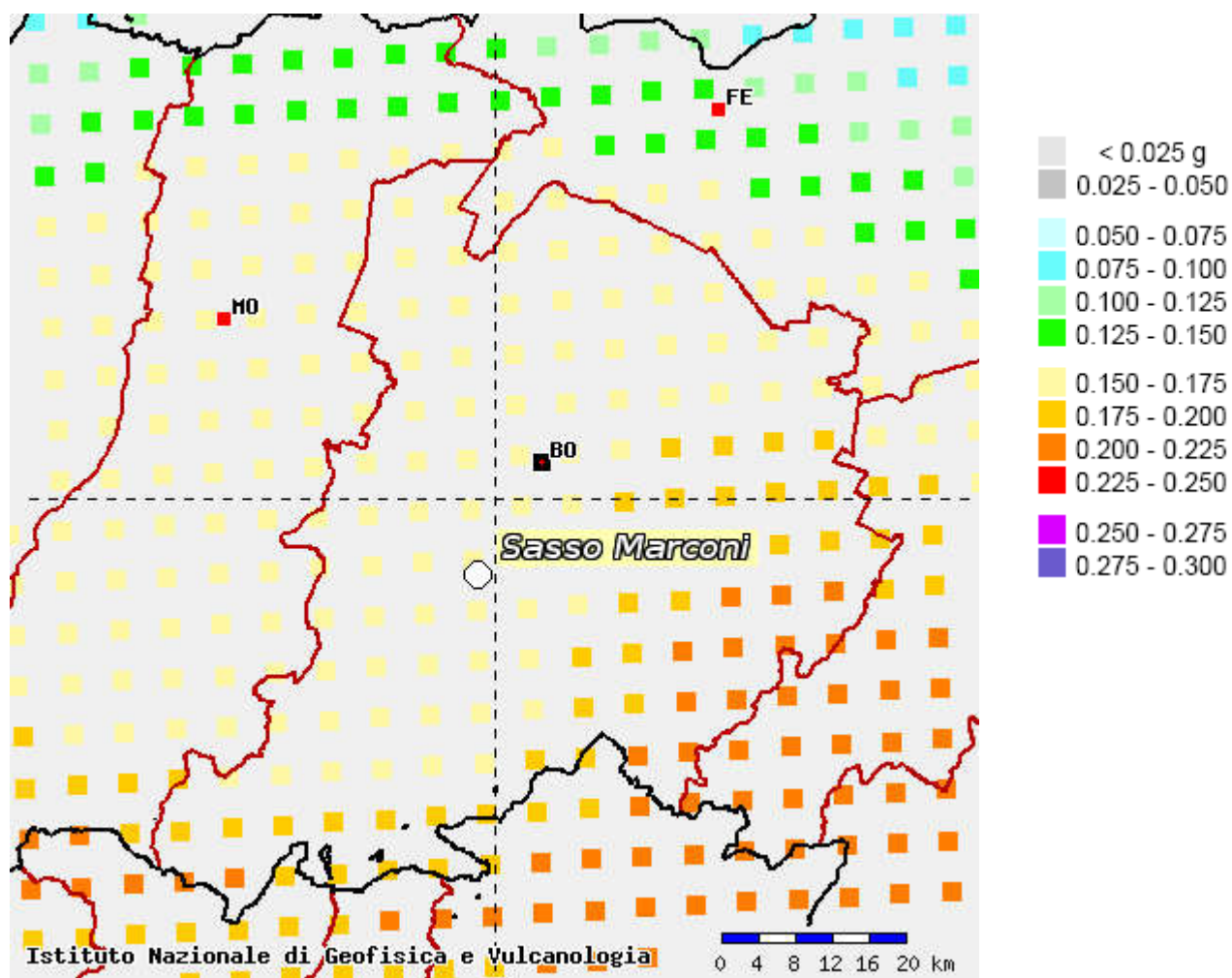
Come evidenziato dalla mappa delle zone sismogenetiche di cui si riporta uno stralcio, l'Emilia Romagna ricade nelle zone 911-914 alle quali è attribuito un valore di M pari a 6,14.



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. 4 – MAPPA DI PERICOLOSITÀ SISMICA



## 10. MODELLAZIONE SISMICA

### 10.1. Vita nominale

La vita nominale di progetto di un'opera ( $V_N$ ) è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata.

La vita nominale delle diverse tipologie di opere è riportata nella seguente tabella.

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per diversi tipi di costruzione

TIPI DI COSTRUZIONE		Valori minimi di $V_N$ (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Nell'area in esame sono previste opere tipo "2" per le quali si prevede una vita nominale  $V_N$  minima di 50 anni.

### 10.2. Classi d'uso

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso distinte nel modo seguente:

<i>Classe I</i>	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli
<i>Classe II</i>	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
<i>Classe III</i>	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
<i>Classe IV</i>	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B di cui al D.M. 5/11/2001 n. 6792 "Norme funzionali e geotecniche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e impianti di produzione di energia elettrica.

Ad ogni classe d'uso è associato un coefficiente come da tabella seguente:

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso  $C_u$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_u$	0,7	1,0	1,5	2,0

Le opere da realizzare nell'area in esame, sono relative alla Classe III pertanto alle stesse è associato rispettivamente un coefficiente d'uso pari a  $C_u = 1,5$ .

### **10.3. Periodo di riferimento**

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_u$ :

$$V_R = V_N \cdot C_u$$

Per il sito in esame il periodo di riferimento  $V_R$  è pari a 75 anni.

### **10.4. Azione sismica**

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$ , nel periodo di riferimento  $V_R$ .

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

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.



Nelle seguenti tabelle vengono riportati i suddetti parametri elaborati per il sito in esame (individuato dalle coordinate WGS84 Lat. 44.448732 Long. 11.273648), considerando un periodo di riferimento per l'azione sismica (VR) di 75 anni, in relazione al periodo di ritorno e agli stati limite di esercizio e agli stati limite ultimi e relative probabilità di superamento.

Stato limite		PVR (%)	TR (anni)	ag (g)	Fo (-)	Tc* (s)
Stati limite di esercizio	SLO	81	45	0,065	2,482	0,268
	SLD	63	75	0,080	2,489	0,277
Stati limite ultimi	SLV	10	712	0,188	2,416	0,309
	SLC	5	1462	0,233	2,447	0,319

### 10.5. Categoria di sottosuolo

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche e dai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{Seq}$  (in m/s) definita dalla espressione:

$$V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

con:

$h_i$  = spessore dell'i-esimo strato;

$V_{Si}$  = velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

$N$  = numero di strati;

$H$  = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{Seq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H = 30$  nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II, di seguito riportata:

Tab. 3.2.II – Categoria di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C e D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Come si evidenzia dall'indagine eseguita, i terreni del primo sottosuolo sono caratterizzati da una profondità del substrato superiore a 30,00 m, e al p.c. attuale presentano una  $V_{seq}$  pari a circa 352 m/sec, pertanto ricadono nella Categoria C, che comprende *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.”*

#### 10.6. Condizioni topografiche

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale mentre per configurazioni semplici può essere adottata la seguente classificazione.

Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

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

### 10.7. Amplificazione stratigrafica

Per sottosuolo di categoria A i coefficienti  $S_s$  e  $C_c$  valgono 1; per le altre categorie vengono calcolati in funzione di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_c^*$  mediante le espressioni fornite nella seguente tabella.

Tab. 3.2.IV – Espressioni di  $S_s$  e di  $C_c$

Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,4 - 0,4 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,7 - 0,6 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,4 - 1,50 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

Per il sito in esame otteniamo:

Stato limite	$S_s$	$C_c$
SLO	1,500	1,622
SLD	1,500	1,604
SLV	1,427	1,547
SLC	1,358	1,531

### 10.8. Amplificazione topografica

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$  riportati nella Tab. 3.2.V, in funzione della categoria topografiche e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

Tab. 3.2.V – Valori massimi dei coefficienti di amplificazione topografica  $S_T$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a $30^\circ$	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di $30^\circ$	1,4

La variazione spaziale del coefficiente di amplificazione topografica è definita da un decremento lineare con l'altezza del pendio o del rilievo, dalla sommità o dalla cresta, dove  $S_T$  assume il valore massimo riportato nella Tab. 3.2.V, fino alla base, dove  $S_T$  assume un valore unitario.

L'area in esame si pone in corrispondenza di una superficie pressoché pianeggiante, perciò si configura una categoria topografica tipo T1 cui è associato un coefficiente di amplificazione topografica pari a 1,0.

#### 10.9. Accelerazione massima al sito

L'accelerazione massima attesa al sito può essere valutata mediante la relazione:

$$a_{\max} = S \cdot a_g = (S_s \cdot S_T) \cdot a_g$$

Nel nostro caso per i parametri considerati in precedenza e per lo stato limite SLV si ottiene un valore pari a 2,632 m/sec<sup>2</sup>.

#### 10.10. Coefficiente sismico orizzontale e verticale

Il coefficiente sismico orizzontale si ottiene mediante la relazione:

$$k_h = \frac{\beta_s \times a_{\max}}{g}$$

dove:

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito ricavabile dalla sottostante tabella.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Nel nostro caso assumendo un valore di  $\beta_s$  pari a 0,24, si ottiene un coefficiente sismico orizzontale ( $k_h$ ) pari a 0,064.

Il coefficiente sismico verticale ( $k_v$ ) si ottiene mediante la relazione:

$$k_v = 0,5 k_h$$

Per le condizioni precedenti si ottiene un coefficiente sismico verticali ( $k_h$ ) pari a 0,032

## 11. MICROZONAZIONE SISMICA

Nella TAV. 4 del PTM – Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali – l'area di intervento è classificata come Zona AV – e detriti  $\leq 15^\circ$  – Depositi alluvionali di fondovalle e terrazzati e depositi di conoide alluvionale affioranti; corpi detritici di varia origine, generalmente a granulometria mista con spessore  $H \geq 3$  m e inclinazione del pendio  $\leq 15^\circ$  per la quale è richiesta la stima dell'amplificazione mediante II livello di approfondimento.

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 ( $V_{SH}$  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 macrocontesto geologico "Margine di tipo A", settore di transizione tra la zona collinare e la pianura caratterizzato da terreni fini o grossolani di spessore non superiore a 30,0 m, sovrastanti orizzonti grossolani a comportamento più rigido e tetto del substrato geologico a profondità comprese tra 50,00 e 100,0 m.

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

H (m)	$V_{SH}$ (m/sec)	FA PGA
10,00	230	2,0

H (m)	$V_{SH}$ (m/sec)	FA SA1 (0,1<T<0,5s)	FA SA2 (0,4<T<0,8s)	FA SA3 (0,7<T<1,1s)
10,00	230	2,0	1,9	1,7

H (m)	$V_{SH}$ (m/sec)	FA SI1 (0,1<T<0,5s)	FA SI2 (0,5<T<1,0s)
10,00	230	2,0	1,8



## 12. 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 44.448732 Longitudine 11.273648	
-----------------------------	---	---

### Pericolosità sismica di base Cu II

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	

### Pericolosità sismica di base Cu III

Periodo di riferimento (Vr):	75	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLO:	45	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLD:	75	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLV:	712	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLC:	1462	[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]
<b>1</b>	<b>16951</b>	<b>44.4637</b>	<b>11.2493</b>	<b>2545.940</b>
2	16952	44.4650	11.3193	3932.149
3	17174	44.4150	11.3211	5332.131
34	17173	44.4137	11.2512	4410.544

Parametri di pericolosità sismica Cu II.

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.055	2.485	0.257
SLD	50	0.068	2.480	0.270
SLV	475	0.165	2.412	0.303
SLC	975	0.208	2.431	0.313

Parametri di pericolosità sismica Cu III.

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	45	0.065	2.481	0.267
SLD	75	0.080	2.489	0.267
SLV	712	0.188	2.422	0.308
SLC	1462	0.233	2.454	0.318

### 13. 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.

#### 13.1. Dati generali

La definizione del modello geotecnico del sottosuolo è stata fatta sulla base delle indagini geognostiche e sismiche eseguite nell'area.

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

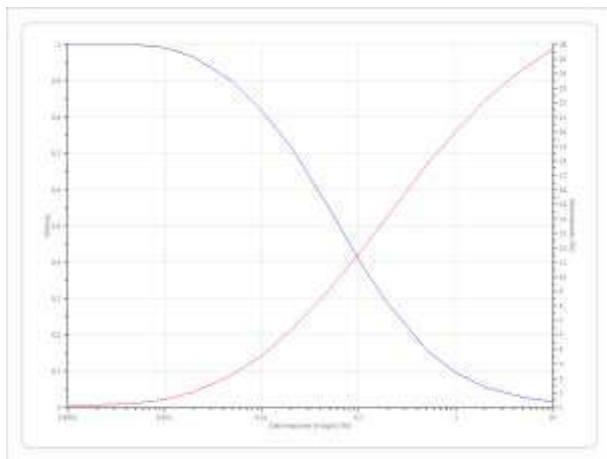
n.	Prof.tà [m]	Spess. [m]	Terreno	Gmax [MPa]	$\gamma$ . [kN/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	1.8	Vucetic & Dorby (1991) PI=15	30.58	19.2	125.0	8.5
2	1.8	8.2	Vucetic & Dorby (1991) PI=30	155.84	19.5	280.0	96.9
3	10.0	25.0	Ghiaie	434.50	18.5	480.0	285.4
4	35.0	50.0	EPRI Rock (1993) 36,88-76,20 metri	876.82	21.0	640.0	673.8
5	85.0	oo	Idriss (1990) Rock	1435.27	22.0	800.0	953.6

Strato con falda: 2

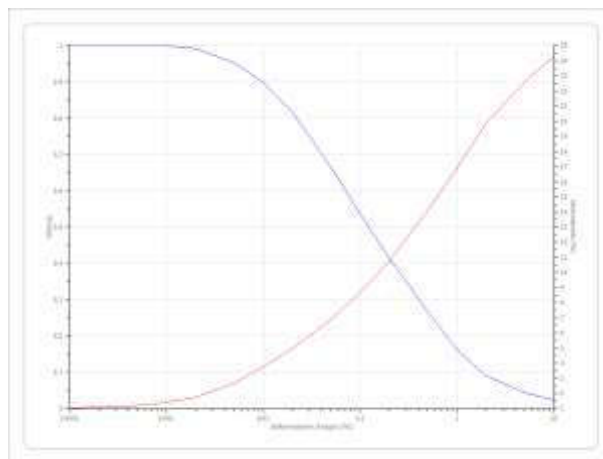
Strato rilevamento accelerogramma: 5 *Bedrock* – Affiorante (*outcrop*)

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

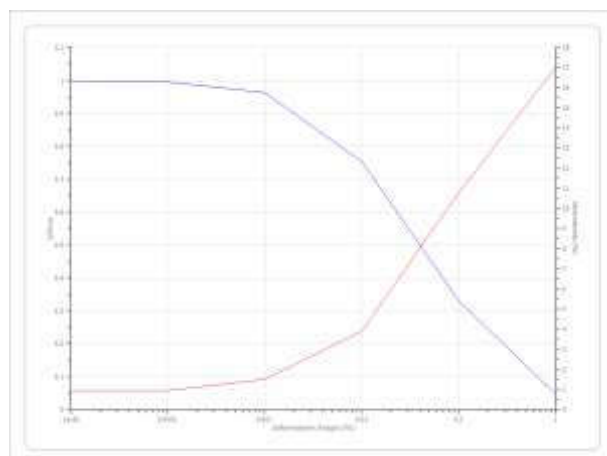
Vucetic & Dorby (1991)  $PI=15$



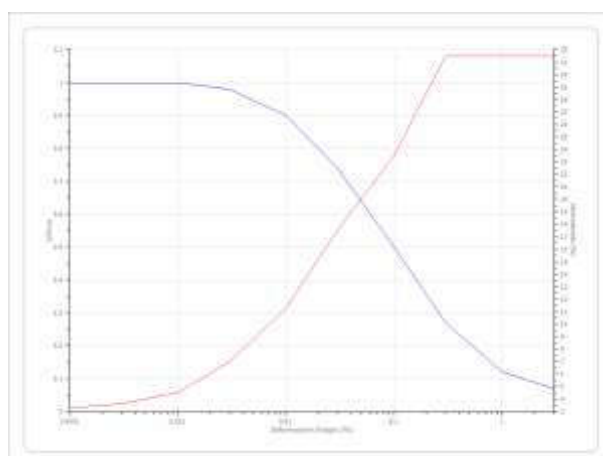
Vucetic & Dorby (1991)  $PI=30$



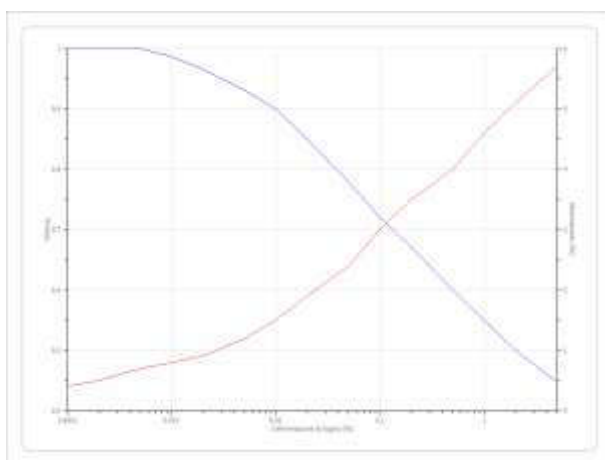
Ghiaie



EPRI Rock (1993) 36,88-76,20 metri



Idriss (1990) Rock





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.

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.

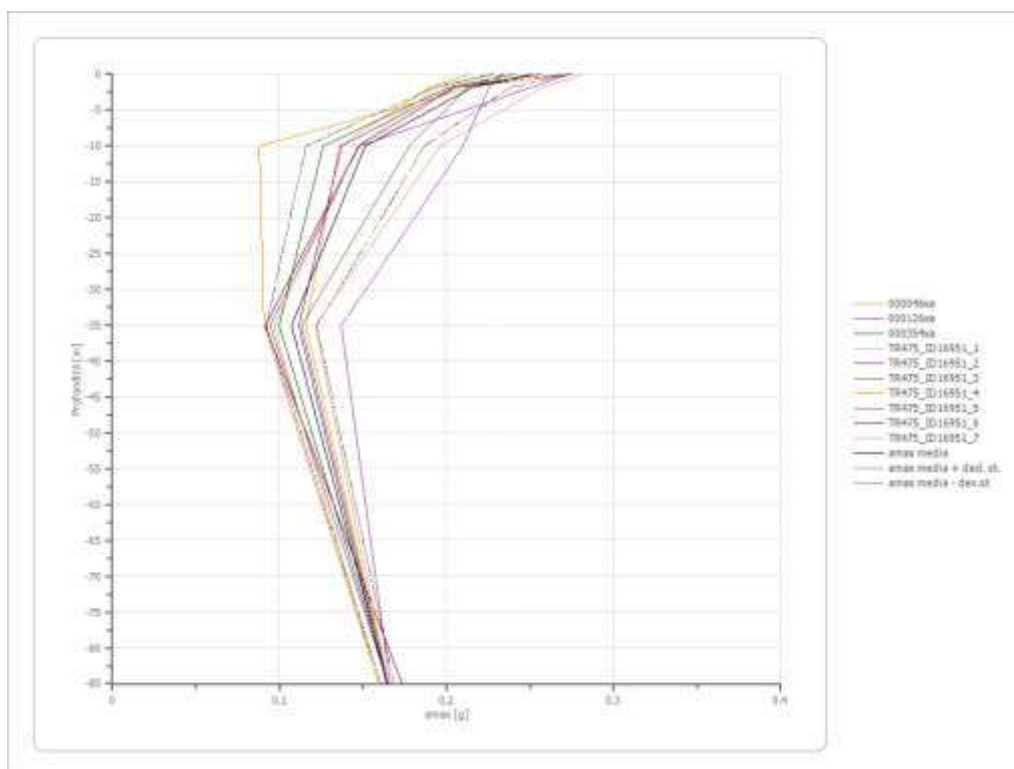
Numero di iterazioni	50
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima: [(M-1)/10]	0.5
Tipo di modulo elastico	Shake 91

### 13.3. RSL per classe d'uso $C_u = II$

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

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

Profondità	0.0	1.8	10.0	35.0	85.0	--
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	--
Accelerogramma	$P_{ga}$					$P_{ga}/P_{ga0}$
046 [g]	0.213	0.190	0.136	0.116	0.165	1.29
0126 [g]	0.272	0.251	0.148	0.094	0.165	1.65
0354 [g]	0.241	0.201	0.126	0.100	0.165	1.46
TR712_ID16951_1 [g]	0.228	0.194	0.147	0.097	0.159	1.43
TR712_ID16951_2 [g]	0.275	0.205	0.137	0.112	0.164	1.67
TR712_ID16951_3 [g]	0.234	0.213	0.178	0.113	0.165	1.42
TR712_ID16951_4 [g]	0.268	0.214	0.088	0.091	0.159	1.68
TR712_ID16951_5 [g]	0.233	0.226	0.210	0.137	0.166	1.40
TR712_ID16951_6 [g]	0.257	0.205	0.147	0.091	0.173	1.48
TR712_ID16951_7 [g]	0.282	0.257	0.196	0.121	0.165	1.71
media [g]	0.250	0.216	0.151	0.107	0.165	<b>1.5</b>



## SLV (CU = II)

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.160	[s]
Tvi	0.740	[s]
Tao	0.140	[s]
Tvo	0.390	[s]
Sami	3.995	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.204	[m/s]
Samo	5.712	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.308	[m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.430</b>	<b>[-]</b>
<b>Fv</b>	<b>1.505</b>	<b>[-]</b>
TB	0.113	[s]
TC	0.338	[s]
TD	2.473	[s]
SA(0)	0.218	[g]
SA(TB)	0.582	[g]

Fattori di amplificazione di intensità spettrale di velocità

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SI Housner
0.100	0.500	1.56
0.400	0.800	1.51
0.700	1.100	1.37
0.500	1.000	1.44
0.500	1.500	1.35
0.100	2.500	1.32

Fattori di amplificazione di intensità spettrale di accelerazione

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SA
0.100	0.500	1.54
0.400	0.800	1.52
0.700	1.100	1.33
0.500	1.500	1.40

Scuotimento in accelerazione

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	ASI/ $\Delta t$ [cm/s <sup>2</sup> ]	Hs [cm/s <sup>2</sup> ]
0.100	0.500	364.1	560.7
0.400	0.800	164.7	250.3
0.700	1.100	61.9	82.3
0.500	1.500	59.8	83.7

Spettro di accelerazione medio SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2504	0.26	0.6521	0.52	0.3550	0.98	0.1517	2.25	0.0403
0.01	0.2504	0.27	0.6601	0.53	0.3425	1.00	0.1417	2.30	0.0396
0.02	0.2519	0.28	0.6572	0.54	0.3298	1.05	0.1313	2.35	0.0394
0.03	0.2611	0.29	0.6267	0.55	0.3231	1.10	0.1224	2.40	0.0386
0.04	0.2844	0.30	0.6014	0.56	0.3163	1.15	0.1181	2.50	0.0363
0.05	0.3203	0.31	0.5980	0.57	0.3070	1.20	0.1104	2.60	0.0339
0.06	0.3927	0.32	0.6000	0.58	0.3002	1.25	0.1028	2.70	0.0313
0.07	0.4337	0.33	0.5936	0.60	0.2907	1.30	0.0941	2.80	0.0282
0.08	0.4702	0.34	0.5802	0.62	0.2816	1.35	0.0913	2.90	0.0262
0.09	0.4473	0.35	0.5516	0.64	0.2775	1.40	0.0849	3.00	0.0261
0.10	0.4397	0.36	0.5476	0.66	0.2721	1.45	0.0785	3.10	0.0259
0.11	0.5119	0.37	0.5521	0.68	0.2636	1.50	0.0755	3.20	0.0257
0.12	0.5770	0.38	0.5452	0.70	0.2564	1.55	0.0725	3.30	0.0245
0.13	0.6703	0.39	0.5298	0.72	0.2475	1.60	0.0690	3.40	0.0222
0.14	0.7389	0.40	0.5096	0.74	0.2343	1.65	0.0653	3.50	0.0201
0.15	0.6814	0.41	0.4889	0.76	0.2194	1.70	0.0613	3.60	0.0183
0.16	0.6682	0.42	0.4640	0.78	0.2103	1.75	0.0578	3.70	0.0170
0.17	0.6378	0.43	0.4466	0.80	0.2047	1.80	0.0550	3.80	0.0170
0.18	0.6175	0.44	0.4344	0.82	0.1994	1.85	0.0543	3.90	0.0165
0.19	0.6084	0.45	0.4290	0.84	0.1921	1.90	0.0531	4.00	0.0155
0.20	0.5835	0.46	0.4276	0.86	0.1819	1.95	0.0505		
0.21	0.5647	0.47	0.4209	0.88	0.1769	2.00	0.0480		
0.22	0.5773	0.48	0.4068	0.90	0.1755	2.05	0.0470		
0.23	0.5979	0.49	0.3931	0.92	0.1732	2.10	0.0447		
0.24	0.6412	0.50	0.3859	0.94	0.1682	2.15	0.0429		
0.25	0.6482	0.51	0.3699	0.96	0.1611	2.20	0.0418		



Spettro normalizzato SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2181	0.26	0.5823	0.52	0.3789	0.98	0.2011	2.25	0.0876
0.01	0.2504	0.27	0.5823	0.53	0.3718	1.00	0.1970	2.30	0.0857
0.02	0.2827	0.28	0.5823	0.54	0.3649	1.05	0.1876	2.35	0.0838
0.03	0.3150	0.29	0.5823	0.55	0.3582	1.10	0.1791	2.40	0.0821
0.04	0.3473	0.30	0.5823	0.56	0.3518	1.15	0.1713	2.50	0.0788
0.05	0.3795	0.31	0.5823	0.57	0.3457	1.20	0.1642	2.60	0.0758
0.06	0.4118	0.32	0.5823	0.58	0.3397	1.25	0.1576	2.70	0.0730
0.07	0.4441	0.33	0.5823	0.60	0.3284	1.30	0.1516	2.80	0.0704
0.08	0.4764	0.34	0.5795	0.62	0.3178	1.35	0.1459	2.90	0.0679
0.09	0.5087	0.35	0.5629	0.64	0.3079	1.40	0.1407	3.00	0.0657
0.10	0.5409	0.36	0.5473	0.66	0.2985	1.45	0.1359	3.10	0.0636
0.11	0.5732	0.37	0.5325	0.68	0.2898	1.50	0.1314	3.20	0.0616
0.12	0.5823	0.38	0.5185	0.70	0.2815	1.55	0.1271	3.30	0.0597
0.13	0.5823	0.39	0.5052	0.72	0.2737	1.60	0.1231	3.40	0.0580
0.14	0.5823	0.40	0.4926	0.74	0.2663	1.65	0.1194	3.50	0.0563
0.15	0.5823	0.41	0.4806	0.76	0.2593	1.70	0.1159	3.60	0.0547
0.16	0.5823	0.42	0.4691	0.78	0.2526	1.75	0.1126	3.70	0.0533
0.17	0.5823	0.43	0.4582	0.80	0.2463	1.80	0.1095	3.80	0.0519
0.18	0.5823	0.44	0.4478	0.82	0.2403	1.85	0.1065	3.90	0.0505
0.19	0.5823	0.45	0.4378	0.84	0.2346	1.90	0.1037	4.00	0.0493
0.20	0.5823	0.46	0.4283	0.86	0.2291	1.95	0.1010		
0.21	0.5823	0.47	0.4192	0.88	0.2239	2.00	0.0985		
0.22	0.5823	0.48	0.4105	0.90	0.2189	2.05	0.0961		
0.23	0.5823	0.49	0.4021	0.92	0.2142	2.10	0.0938		
0.24	0.5823	0.50	0.3941	0.94	0.2096	2.15	0.0916		
0.25	0.5823	0.51	0.3863	0.96	0.2052	2.20	0.0896		

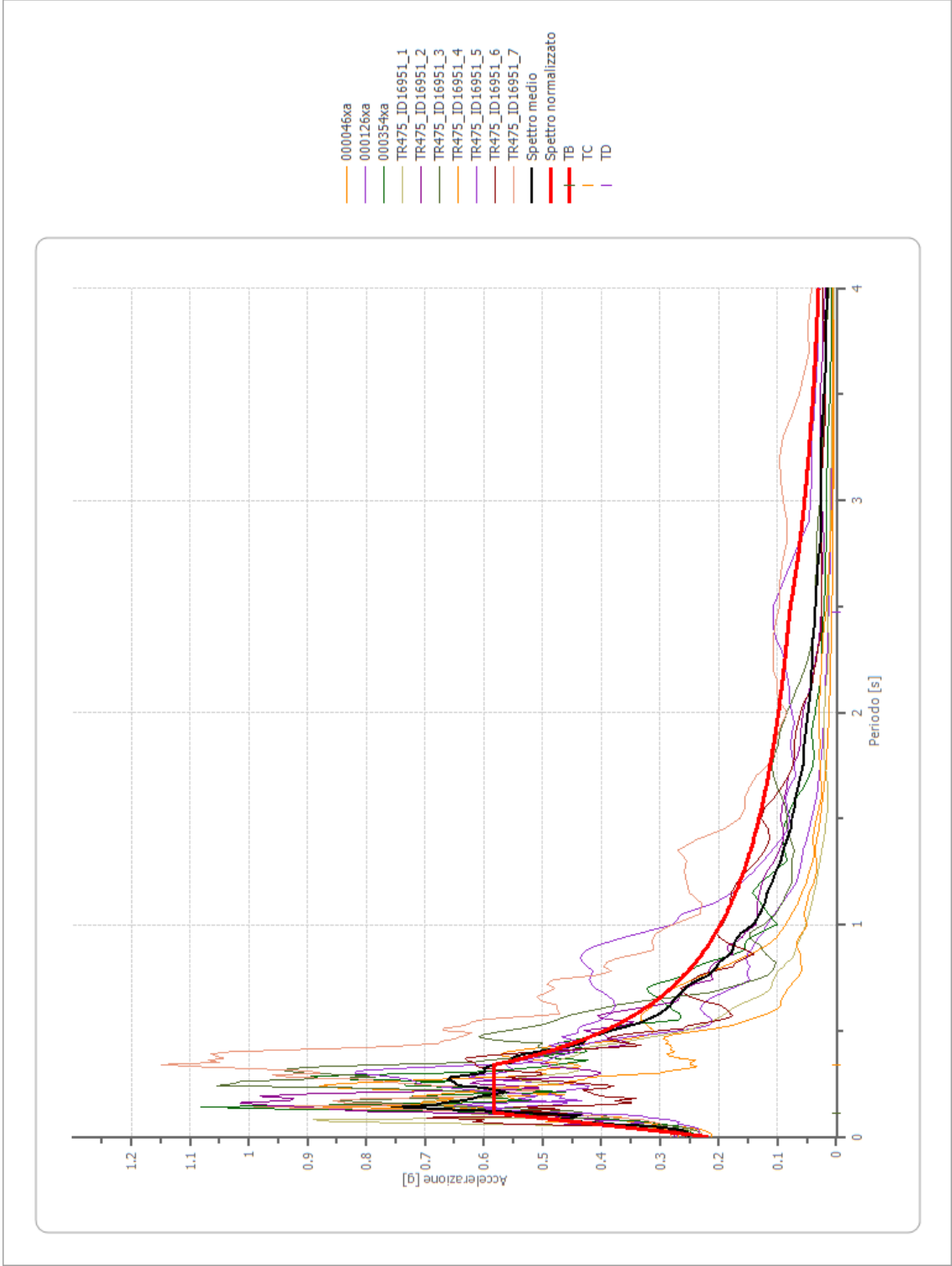
Parametri spettro normalizzato SLV

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.218	2.669	--	0.113	0.338	2.473	0.218	0.582	1.322

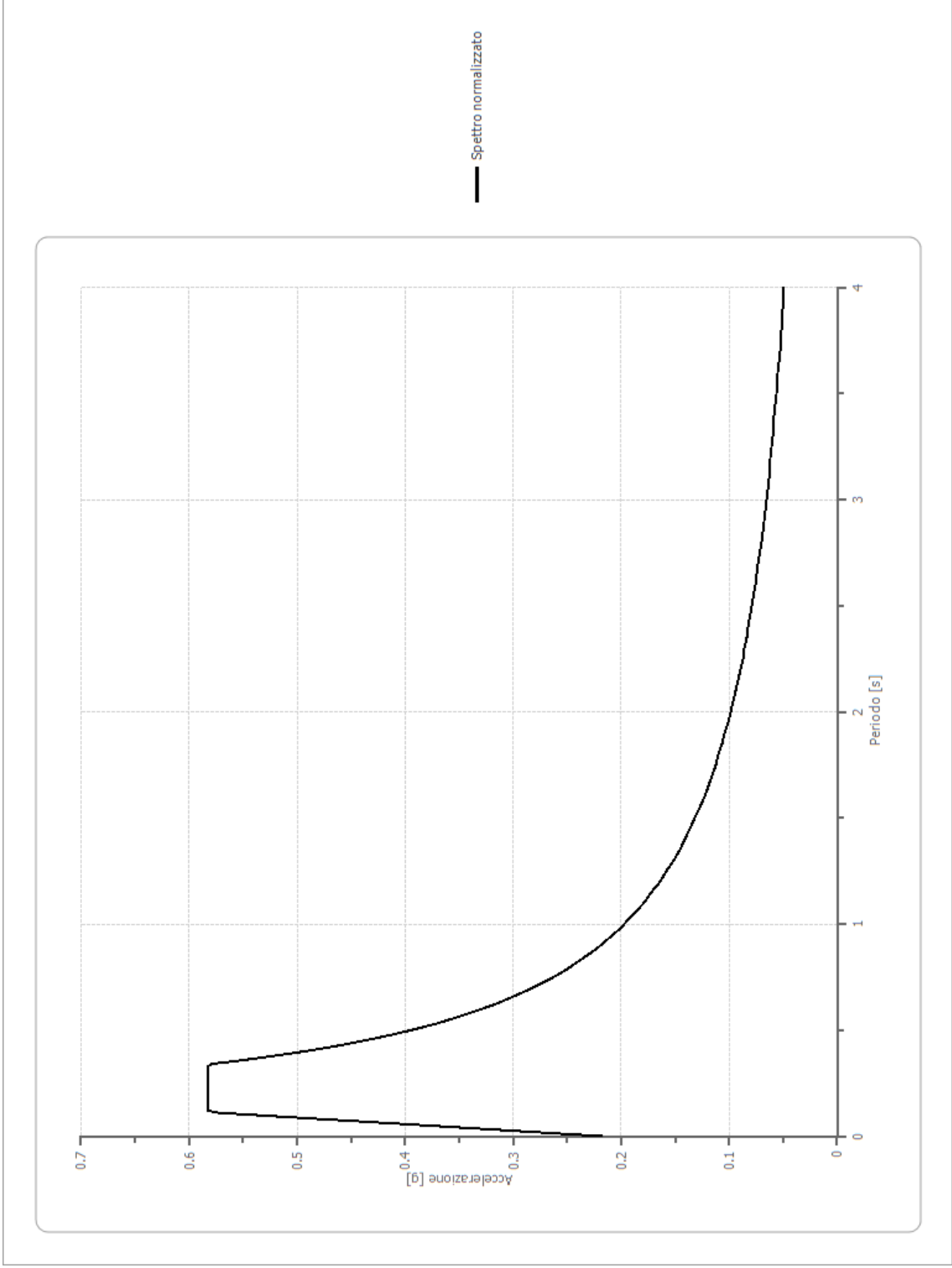
Di seguito si riportano in forma grafica gli spettri elaborati, lo spettro medio e lo spettro normalizzato allo stato limite SLV per classe d'uso II; lo spettro normalizzato (in rosso), ricavato dall'analisi numerica, è stato messo a confronto con gli spettri desumibili dall'analisi secondo la procedura semplificata (§ 3.2.2. NTC18) per un sottosuolo di categoria A-T1 (in verde) e C-T1 (in blu).

La scelta definitiva in merito agli spettri da utilizzarsi nella progettazione rimane comunque di competenza esclusiva del Progettista.

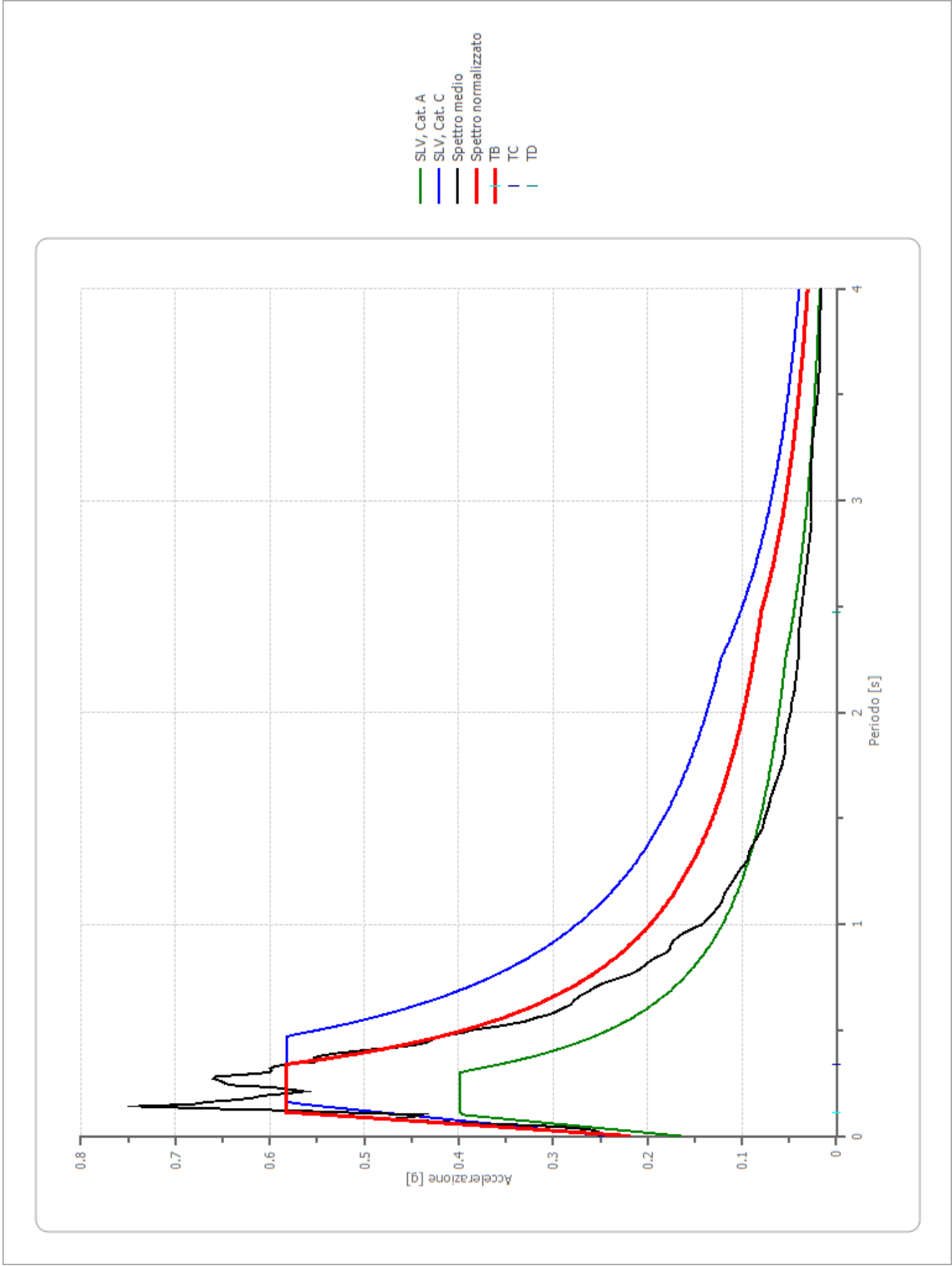
Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLV



Spettro normalizzato SLV



Confronto con gli spettri NTC





## SLD (CU = II)

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.160	[s]
Tvi	0.740	[s]
Tao	0.140	[s]
Tvo	0.390	[s]
Sami	1.646	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.084	[m/s]
Samo	2.644	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.131	[m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.606</b>	<b>[-]</b>
<b>Fv</b>	<b>1.553</b>	<b>[-]</b>
TB	0.104	[s]
TC	0.311	[s]
TD	1.998	[s]
SA(0)	0.100	[g]
SA(TB)	0.270	[g]

Spettro di accelerazione medio SLD

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.1159	0.26	0.2888	0.52	0.1482	0.98	0.0622	2.25	0.0166
0.01	0.1159	0.27	0.2889	0.53	0.1429	1.00	0.0581	2.30	0.0163
0.02	0.1167	0.28	0.2855	0.54	0.1375	1.05	0.0539	2.35	0.0162
0.03	0.1222	0.29	0.2697	0.55	0.1344	1.10	0.0503	2.40	0.0159
0.04	0.1386	0.30	0.2578	0.56	0.1314	1.15	0.0485	2.50	0.0149
0.05	0.1657	0.31	0.2552	0.57	0.1273	1.20	0.0453	2.60	0.0139
0.06	0.1992	0.32	0.2549	0.58	0.1244	1.25	0.0422	2.70	0.0129
0.07	0.2148	0.33	0.2525	0.60	0.1205	1.30	0.0387	2.80	0.0116
0.08	0.2211	0.34	0.2461	0.62	0.1168	1.35	0.0375	2.90	0.0108
0.09	0.2093	0.35	0.2339	0.64	0.1148	1.40	0.0349	3.00	0.0107
0.10	0.2110	0.36	0.2325	0.66	0.1124	1.45	0.0322	3.10	0.0107
0.11	0.2485	0.37	0.2336	0.68	0.1088	1.50	0.0310	3.20	0.0106
0.12	0.2760	0.38	0.2301	0.70	0.1058	1.55	0.0298	3.30	0.0101
0.13	0.3180	0.39	0.2235	0.72	0.1020	1.60	0.0283	3.40	0.0092
0.14	0.3429	0.40	0.2145	0.74	0.0965	1.65	0.0268	3.50	0.0083
0.15	0.3057	0.41	0.2059	0.76	0.0903	1.70	0.0252	3.60	0.0075
0.16	0.2972	0.42	0.1950	0.78	0.0866	1.75	0.0237	3.70	0.0070
0.17	0.2872	0.43	0.1873	0.80	0.0843	1.80	0.0226	3.80	0.0070
0.18	0.2777	0.44	0.1823	0.82	0.0820	1.85	0.0224	3.90	0.0068
0.19	0.2751	0.45	0.1799	0.84	0.0790	1.90	0.0218	4.00	0.0064
0.20	0.2672	0.46	0.1796	0.86	0.0747	1.95	0.0207		
0.21	0.2577	0.47	0.1766	0.88	0.0726	2.00	0.0198		
0.22	0.2638	0.48	0.1704	0.90	0.0721	2.05	0.0194		
0.23	0.2735	0.49	0.1646	0.92	0.0711	2.10	0.0184		
0.24	0.2924	0.50	0.1613	0.94	0.0690	2.15	0.0177		
0.25	0.2896	0.51	0.1545	0.96	0.0661	2.20	0.0172		

Spettro normalizzato SLD

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.0995	0.26	0.2695	0.52	0.1611	0.98	0.0855	2.25	0.0372
0.01	0.1159	0.27	0.2695	0.53	0.1580	1.00	0.0838	2.30	0.0364
0.02	0.1323	0.28	0.2695	0.54	0.1551	1.05	0.0798	2.35	0.0356
0.03	0.1487	0.29	0.2695	0.55	0.1523	1.10	0.0761	2.40	0.0349
0.04	0.1652	0.30	0.2695	0.56	0.1496	1.15	0.0728	2.50	0.0335
0.05	0.1816	0.31	0.2695	0.57	0.1469	1.20	0.0698	2.60	0.0322
0.06	0.1980	0.32	0.2617	0.58	0.1444	1.25	0.0670	2.70	0.0310
0.07	0.2144	0.33	0.2538	0.60	0.1396	1.30	0.0644	2.80	0.0299
0.08	0.2308	0.34	0.2463	0.62	0.1351	1.35	0.0620	2.90	0.0289
0.09	0.2472	0.35	0.2393	0.64	0.1309	1.40	0.0598	3.00	0.0279
0.10	0.2636	0.36	0.2327	0.66	0.1269	1.45	0.0578	3.10	0.0270
0.11	0.2695	0.37	0.2264	0.68	0.1232	1.50	0.0558	3.20	0.0262
0.12	0.2695	0.38	0.2204	0.70	0.1197	1.55	0.0540	3.30	0.0254
0.13	0.2695	0.39	0.2148	0.72	0.1163	1.60	0.0523	3.40	0.0246
0.14	0.2695	0.40	0.2094	0.74	0.1132	1.65	0.0508	3.50	0.0239
0.15	0.2695	0.41	0.2043	0.76	0.1102	1.70	0.0493	3.60	0.0233
0.16	0.2695	0.42	0.1994	0.78	0.1074	1.75	0.0479	3.70	0.0226
0.17	0.2695	0.43	0.1948	0.80	0.1047	1.80	0.0465	3.80	0.0220
0.18	0.2695	0.44	0.1904	0.82	0.1021	1.85	0.0453	3.90	0.0215
0.19	0.2695	0.45	0.1861	0.84	0.0997	1.90	0.0441	4.00	0.0209
0.20	0.2695	0.46	0.1821	0.86	0.0974	1.95	0.0430		
0.21	0.2695	0.47	0.1782	0.88	0.0952	2.00	0.0419		
0.22	0.2695	0.48	0.1745	0.90	0.0931	2.05	0.0409		
0.23	0.2695	0.49	0.1709	0.92	0.0910	2.10	0.0399		
0.24	0.2695	0.50	0.1675	0.94	0.0891	2.15	0.0390		
0.25	0.2695	0.51	0.1642	0.96	0.0872	2.20	0.0381		

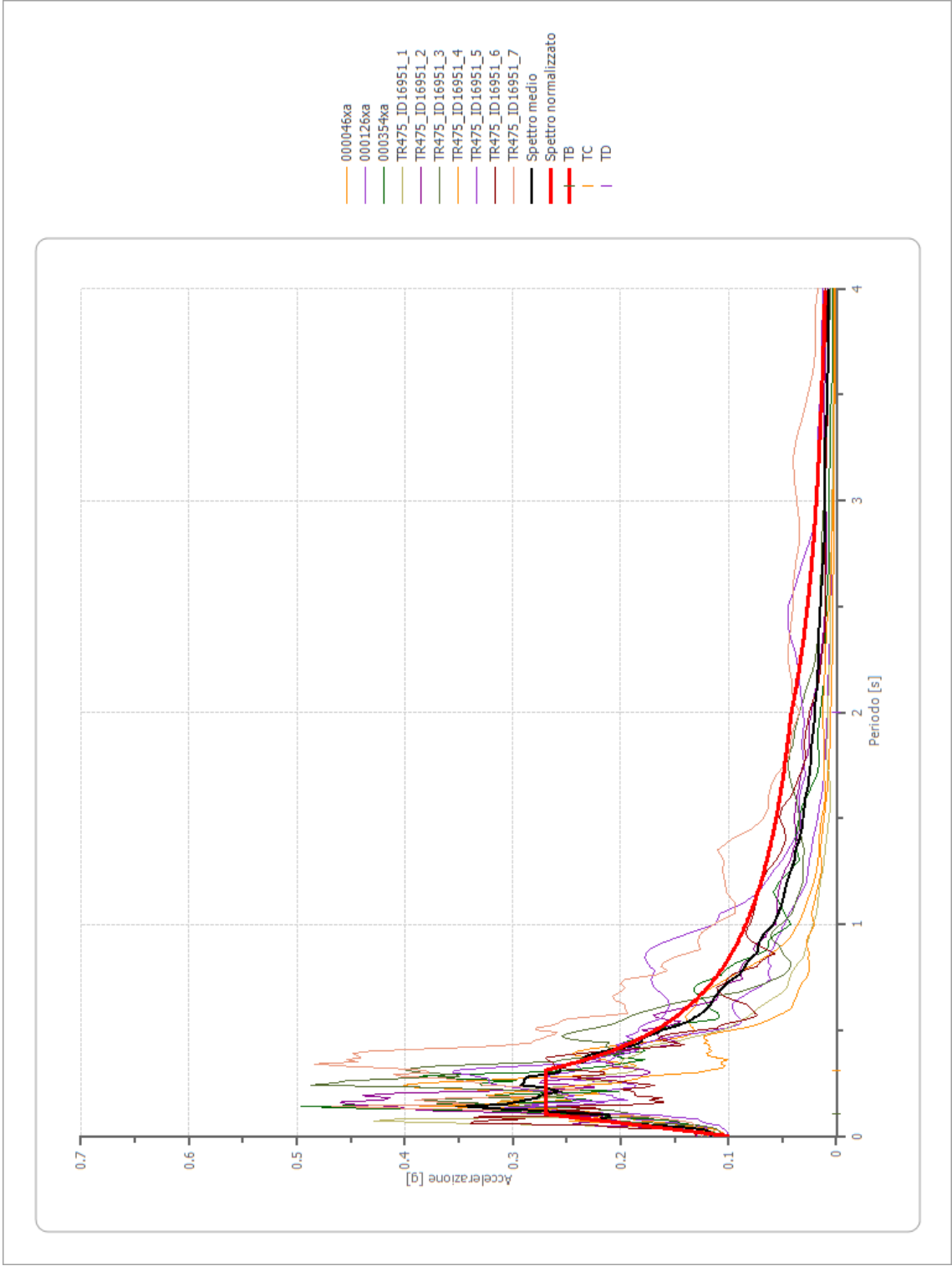
Parametri spettro normalizzato SLD

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.100	2.708	--	0.104	0.311	1.998	0.100	0.270	1.463

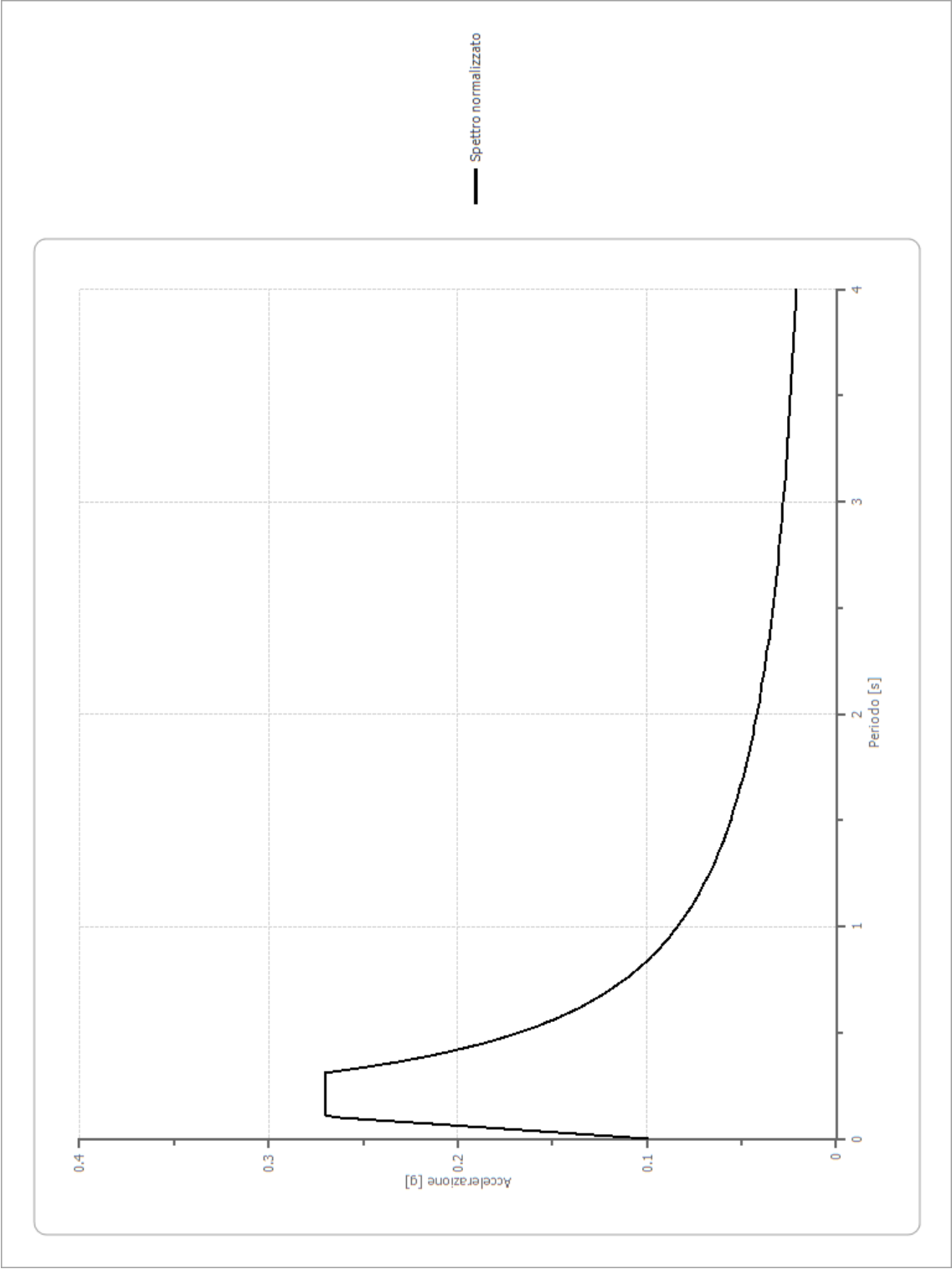
Di seguito si riportano in forma grafica gli spettri elaborati, lo spettro medio e lo spettro normalizzato allo stato limite SLD per classe d'uso II; lo spettro normalizzato (in rosso), ricavato dall'analisi numerica, è stato messo a confronto con gli spettri desumibili dall'analisi secondo la procedura semplificata (§ 3.2.2. NTC18) per un sottosuolo di categoria A-T1 (in verde) e C-T1 (in blu).

La scelta definitiva in merito agli spettri da utilizzarsi nella progettazione rimane comunque di competenza esclusiva del Progettista.

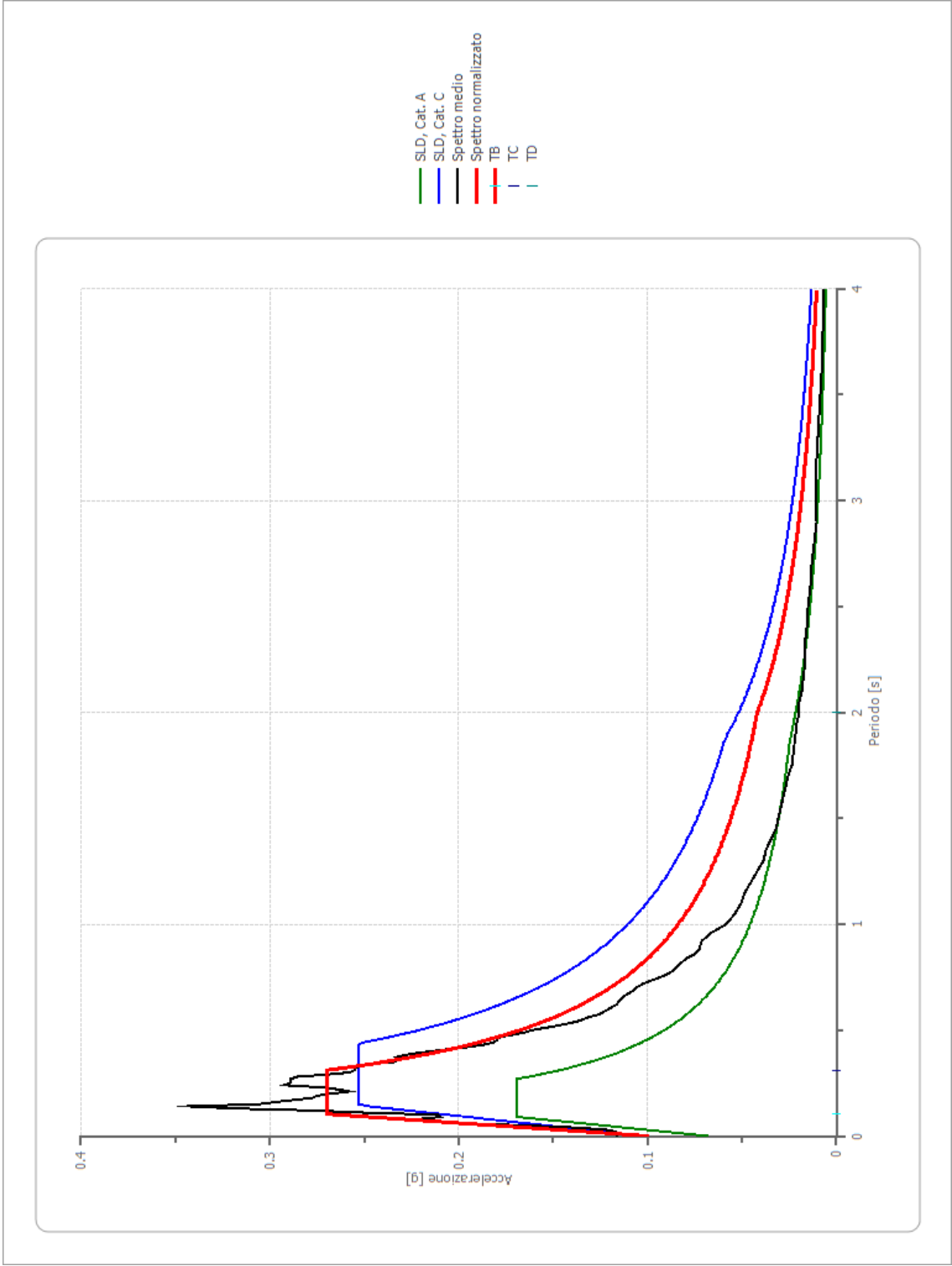
Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLD



Spettro normalizzato SLD



Confronto con gli spettri NTC



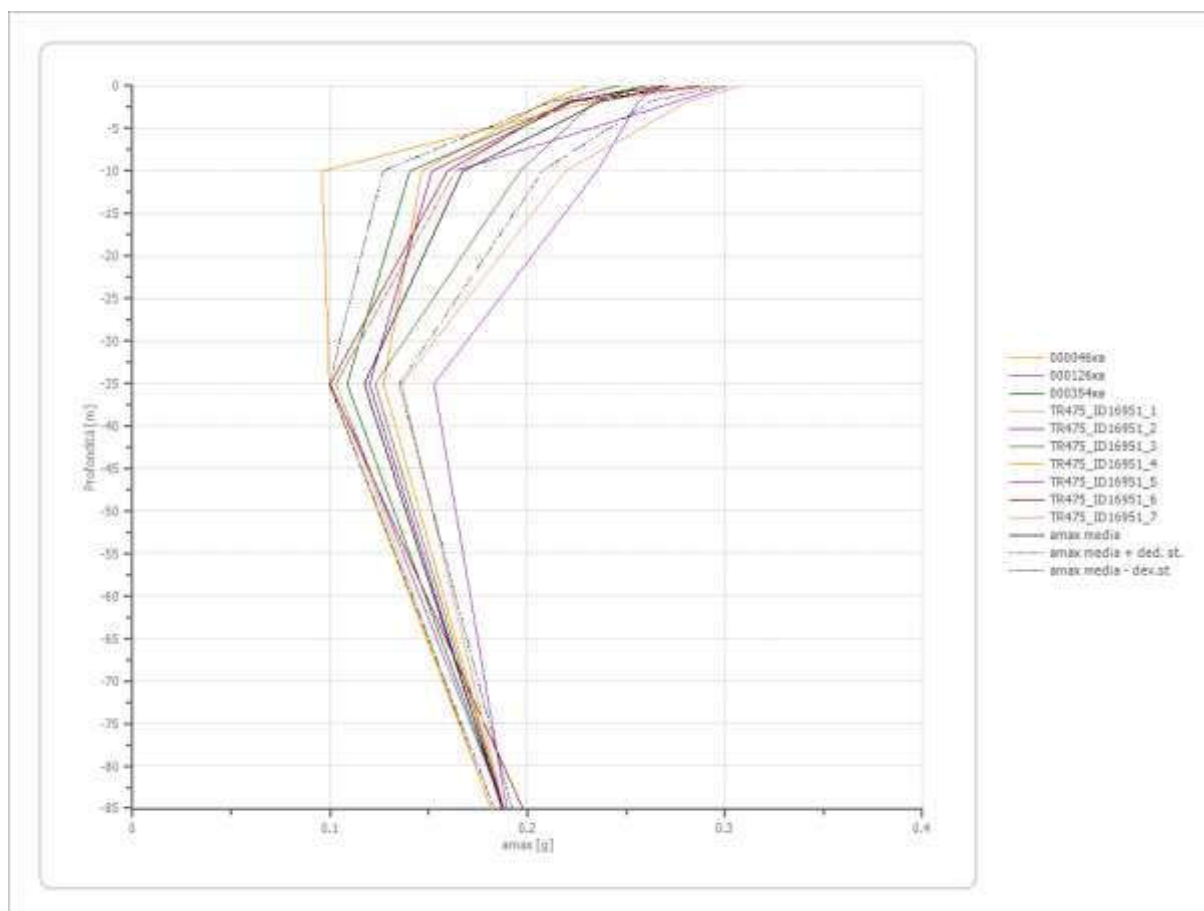


### 13.4. RSL per classe d'uso $C_u = III$

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

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

Profondità	0.0	1.8	10.0	35.0	85.0	--
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	--
Accelerogramma	$P_{ga}$					$P_{ga}/P_{ga0}$
046 [g]	0.230	0.210	0.146	0.127	0.188	1.22
0126 [g]	0.301	0.276	0.163	0.103	0.188	1.60
0354 [g]	0.260	0.223	0.140	0.109	0.188	1.38
TR712_ID16951_1 [g]	0.245	0.216	0.164	0.103	0.181	1.35
TR712_ID16951_2 [g]	0.287	0.224	0.152	0.120	0.187	1.53
TR712_ID16951_3 [g]	0.259	0.234	0.196	0.123	0.188	1.38
TR712_ID16951_4 [g]	0.292	0.234	0.096	0.100	0.182	1.60
TR712_ID16951_5 [g]	0.264	0.256	0.235	0.153	0.189	1.39
TR712_ID16951_6 [g]	0.268	0.220	0.159	0.100	0.198	1.36
TR712_ID16951_7 [g]	0.308	0.281	0.219	0.136	0.188	1.64
media [g]	0.271	0.237	0.167	0.117	0.188	<b>1.4</b>



## SLV (CU = III)

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.160	[s]
Tvi	0.740	[s]
Tao	0.140	[s]
Tvo	0.390	[s]
Sami	4.552	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.233	[m/s]
Samo	6.373	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.349	[m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.400</b>	<b>[-]</b>
<b>Fv</b>	<b>1.498</b>	<b>[-]</b>
TB	0.115	[s]
TC	0.344	[s]
TD	2.578	[s]
SA(0)	0.244	[g]
SA(TB)	0.650	[g]

Fattori di amplificazione di intensità spettrale di velocità

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	SI Housner
0.100	0.500	1.55
0.400	0.800	1.51
0.700	1.100	1.37
0.500	1.000	1.44
0.500	1.500	1.36
0.100	2.500	1.32

Spettro di accelerazione medio SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2798	0.26	0.7316	0.52	0.4043	0.98	0.1734	2.25	0.0460
0.01	0.2798	0.27	0.7416	0.53	0.3905	1.00	0.1620	2.30	0.0452
0.02	0.2814	0.28	0.7392	0.54	0.3766	1.05	0.1499	2.35	0.0449
0.03	0.2902	0.29	0.7070	0.55	0.3686	1.10	0.1397	2.40	0.0440
0.04	0.3164	0.30	0.6797	0.56	0.3611	1.15	0.1347	2.50	0.0413
0.05	0.3532	0.31	0.6761	0.57	0.3505	1.20	0.1260	2.60	0.0386
0.06	0.4328	0.32	0.6787	0.58	0.3428	1.25	0.1174	2.70	0.0357
0.07	0.4791	0.33	0.6722	0.60	0.3320	1.30	0.1073	2.80	0.0322
0.08	0.5231	0.34	0.6569	0.62	0.3214	1.35	0.1042	2.90	0.0299
0.09	0.4978	0.35	0.6252	0.64	0.3168	1.40	0.0969	3.00	0.0297
0.10	0.4894	0.36	0.6214	0.66	0.3107	1.45	0.0896	3.10	0.0295
0.11	0.5664	0.37	0.6264	0.68	0.3011	1.50	0.0861	3.20	0.0293
0.12	0.6381	0.38	0.6190	0.70	0.2928	1.55	0.0827	3.30	0.0279
0.13	0.7422	0.39	0.6016	0.72	0.2826	1.60	0.0787	3.40	0.0253
0.14	0.8210	0.40	0.5791	0.74	0.2676	1.65	0.0745	3.50	0.0229
0.15	0.7652	0.41	0.5556	0.76	0.2506	1.70	0.0700	3.60	0.0208
0.16	0.7520	0.42	0.5282	0.78	0.2401	1.75	0.0660	3.70	0.0194
0.17	0.7144	0.43	0.5083	0.80	0.2338	1.80	0.0627	3.80	0.0194
0.18	0.6940	0.44	0.4944	0.82	0.2277	1.85	0.0619	3.90	0.0189
0.19	0.6824	0.45	0.4885	0.84	0.2195	1.90	0.0606	4.00	0.0177
0.20	0.6537	0.46	0.4868	0.86	0.2079	1.95	0.0576		
0.21	0.6314	0.47	0.4793	0.88	0.2021	2.00	0.0547		
0.22	0.6453	0.48	0.4634	0.90	0.2005	2.05	0.0536		
0.23	0.6685	0.49	0.4478	0.92	0.1978	2.10	0.0510		
0.24	0.7145	0.50	0.4396	0.94	0.1922	2.15	0.0489		
0.25	0.7254	0.51	0.4216	0.96	0.1840	2.20	0.0477		

Spettro normalizzato SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2444	0.26	0.6496	0.52	0.4295	0.98	0.2279	2.25	0.0993
0.01	0.2798	0.27	0.6496	0.53	0.4214	1.00	0.2233	2.30	0.0971
0.02	0.3152	0.28	0.6496	0.54	0.4136	1.05	0.2127	2.35	0.0950
0.03	0.3505	0.29	0.6496	0.55	0.4060	1.10	0.2030	2.40	0.0931
0.04	0.3859	0.30	0.6496	0.56	0.3988	1.15	0.1942	2.50	0.0893
0.05	0.4212	0.31	0.6496	0.57	0.3918	1.20	0.1861	2.60	0.0859
0.06	0.4566	0.32	0.6496	0.58	0.3850	1.25	0.1787	2.70	0.0827
0.07	0.4920	0.33	0.6496	0.60	0.3722	1.30	0.1718	2.80	0.0798
0.08	0.5273	0.34	0.6496	0.62	0.3602	1.35	0.1654	2.90	0.0770
0.09	0.5627	0.35	0.6381	0.64	0.3489	1.40	0.1595	3.00	0.0744
0.10	0.5981	0.36	0.6203	0.66	0.3384	1.45	0.1540	3.10	0.0720
0.11	0.6334	0.37	0.6036	0.68	0.3284	1.50	0.1489	3.20	0.0698
0.12	0.6496	0.38	0.5877	0.70	0.3190	1.55	0.1441	3.30	0.0677
0.13	0.6496	0.39	0.5726	0.72	0.3102	1.60	0.1396	3.40	0.0657
0.14	0.6496	0.40	0.5583	0.74	0.3018	1.65	0.1353	3.50	0.0638
0.15	0.6496	0.41	0.5447	0.76	0.2938	1.70	0.1314	3.60	0.0620
0.16	0.6496	0.42	0.5317	0.78	0.2863	1.75	0.1276	3.70	0.0604
0.17	0.6496	0.43	0.5194	0.80	0.2792	1.80	0.1241	3.80	0.0588
0.18	0.6496	0.44	0.5076	0.82	0.2723	1.85	0.1207	3.90	0.0573
0.19	0.6496	0.45	0.4963	0.84	0.2659	1.90	0.1175	4.00	0.0558
0.20	0.6496	0.46	0.4855	0.86	0.2597	1.95	0.1145		
0.21	0.6496	0.47	0.4752	0.88	0.2538	2.00	0.1117		
0.22	0.6496	0.48	0.4653	0.90	0.2481	2.05	0.1089		
0.23	0.6496	0.49	0.4558	0.92	0.2427	2.10	0.1063		
0.24	0.6496	0.50	0.4466	0.94	0.2376	2.15	0.1039		
0.25	0.6496	0.51	0.4379	0.96	0.2326	2.20	0.1015		

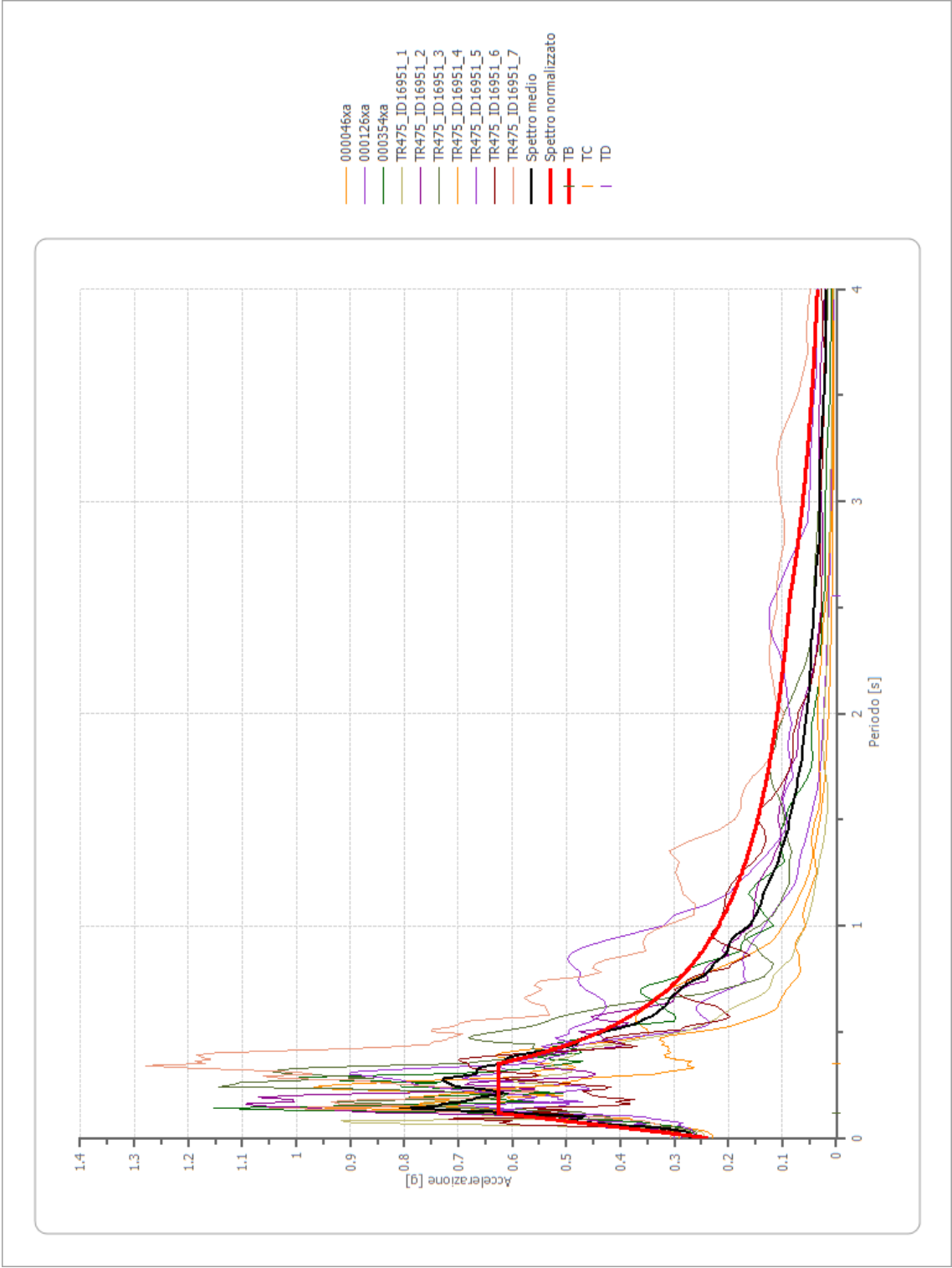
Parametri spettro normalizzato SLV

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.244	2.657	--	0.115	0.344	2.578	0.244	0.650	1.300

Di seguito si riportano in forma grafica gli spettri elaborati, lo spettro medio e lo spettro normalizzato allo stato limite SLV per classe d'uso III; lo spettro normalizzato (in rosso), ricavato dall'analisi numerica, è stato messo a confronto con gli spettri desumibili dall'analisi secondo la procedura semplificata (§ 3.2.2. NTC18) per un sottosuolo di categoria A-T1 (in verde) e C-T1 (in blu).

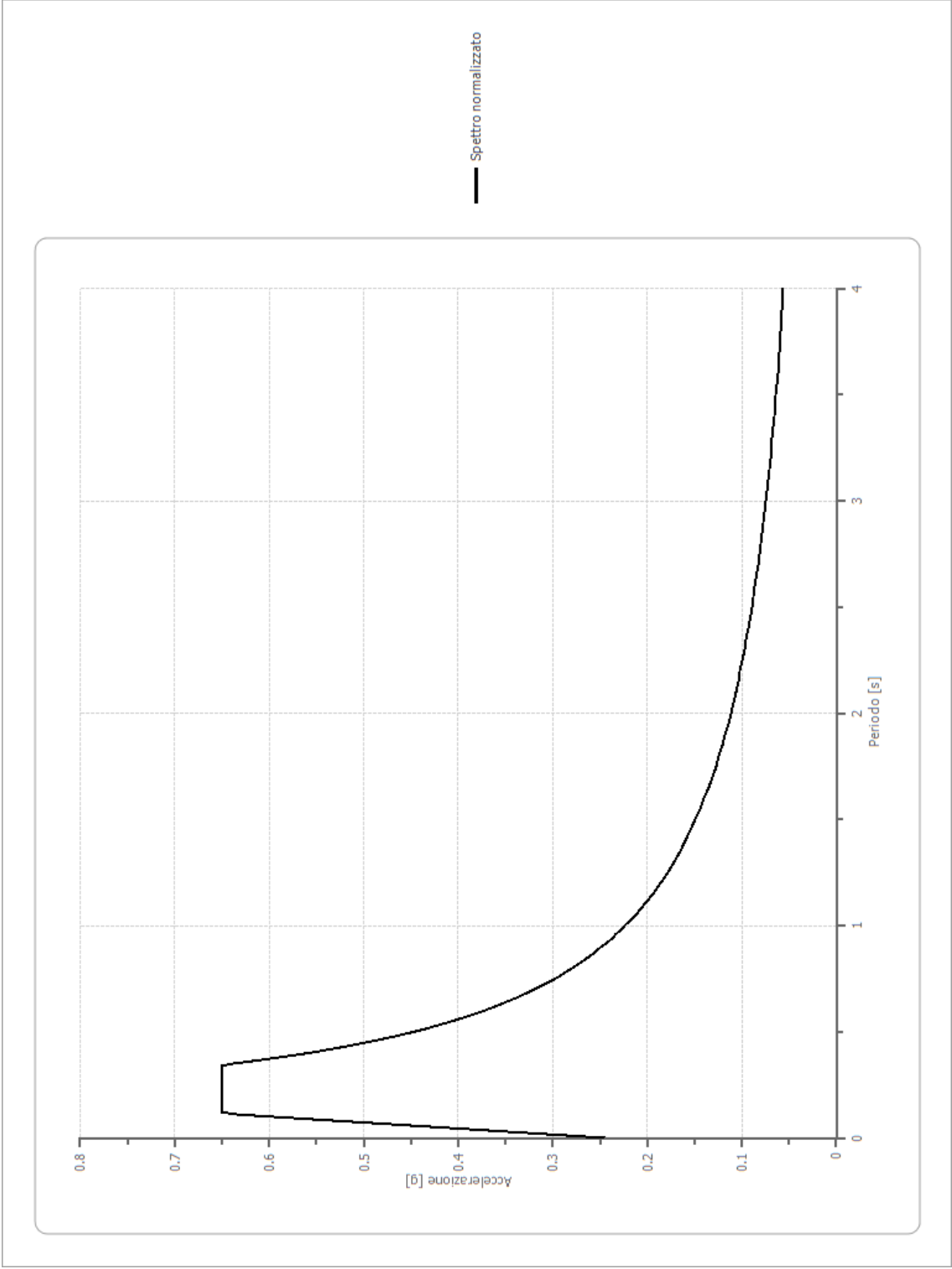
La scelta definitiva in merito agli spettri da utilizzarsi nella progettazione rimane comunque di competenza esclusiva del Progettista.

Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLV

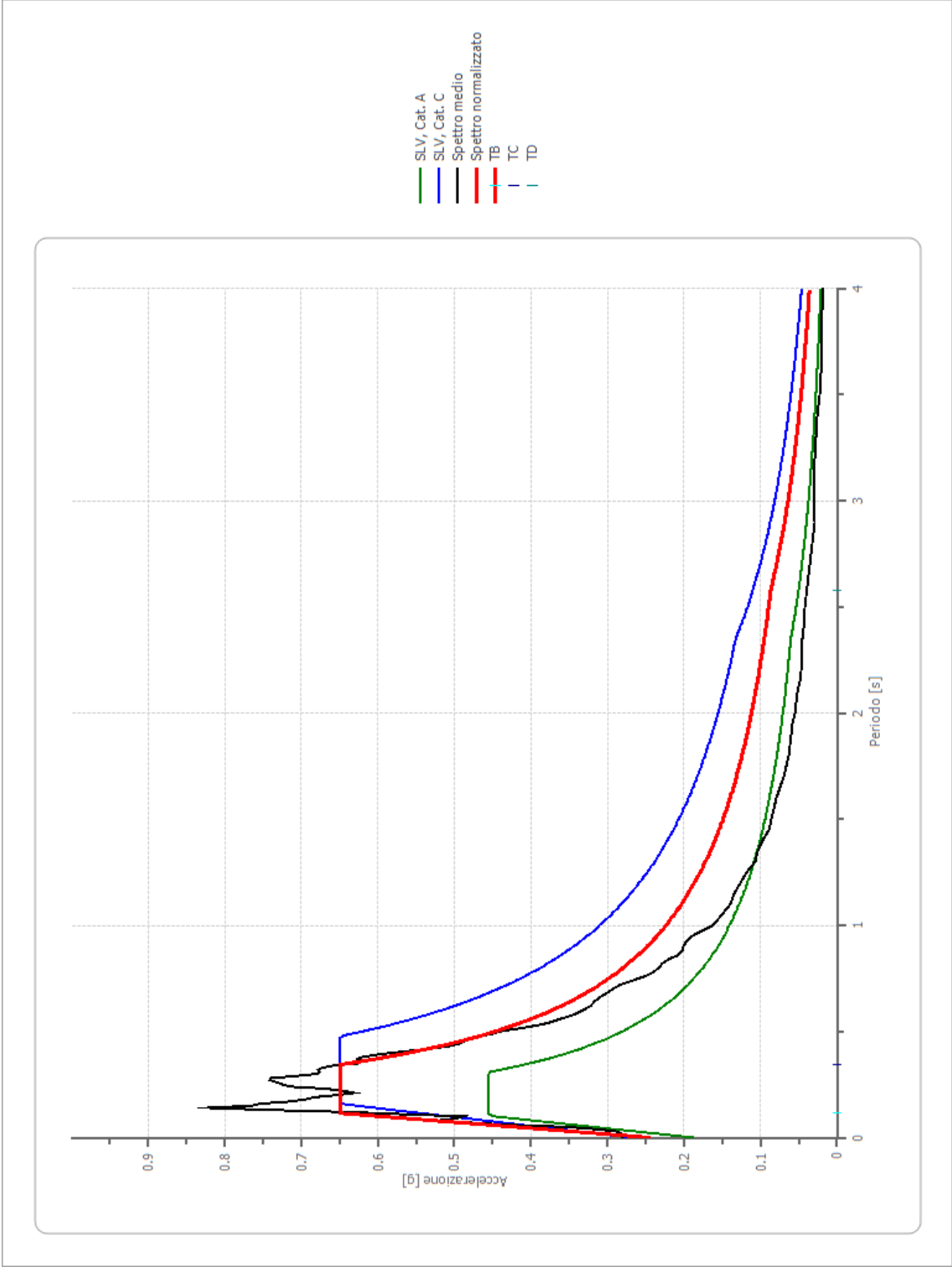




Spettro normalizzato SLV



Confronto con gli spettri NTC



## SLD (CU = III)

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.160	[s]
Tvi	0.740	[s]
Tao	0.140	[s]
Tvo	0.390	[s]
Sami	1.937	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.099	[m/s]
Samo	2.967	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.151	[m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.532</b>	<b>[-]</b>
<b>Fv</b>	<b>1.520</b>	<b>[-]</b>
TB	0.106	[s]
TC	0.319	[s]
TD	2.051	[s]
SA(0)	0.113	[g]
SA(TB)	0.302	[g]

Spettro di accelerazione medio SLD

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.1341	0.26	0.3363	0.52	0.1739	0.98	0.0732	2.25	0.0195
0.01	0.1341	0.27	0.3373	0.53	0.1678	1.00	0.0683	2.30	0.0192
0.02	0.1350	0.28	0.3333	0.54	0.1614	1.05	0.0634	2.35	0.0191
0.03	0.1413	0.29	0.3153	0.55	0.1578	1.10	0.0592	2.40	0.0187
0.04	0.1587	0.30	0.3017	0.56	0.1543	1.15	0.0570	2.50	0.0176
0.05	0.1873	0.31	0.2989	0.57	0.1496	1.20	0.0533	2.60	0.0164
0.06	0.2277	0.32	0.2986	0.58	0.1461	1.25	0.0496	2.70	0.0152
0.07	0.2444	0.33	0.2956	0.60	0.1416	1.30	0.0455	2.80	0.0137
0.08	0.2549	0.34	0.2883	0.62	0.1372	1.35	0.0441	2.90	0.0127
0.09	0.2411	0.35	0.2741	0.64	0.1349	1.40	0.0411	3.00	0.0126
0.10	0.2414	0.36	0.2723	0.66	0.1321	1.45	0.0379	3.10	0.0126
0.11	0.2841	0.37	0.2737	0.68	0.1279	1.50	0.0365	3.20	0.0124
0.12	0.3175	0.38	0.2697	0.70	0.1244	1.55	0.0350	3.30	0.0119
0.13	0.3661	0.39	0.2620	0.72	0.1200	1.60	0.0333	3.40	0.0108
0.14	0.3972	0.40	0.2515	0.74	0.1134	1.65	0.0316	3.50	0.0097
0.15	0.3546	0.41	0.2413	0.76	0.1062	1.70	0.0297	3.60	0.0089
0.16	0.3452	0.42	0.2286	0.78	0.1019	1.75	0.0279	3.70	0.0083
0.17	0.3327	0.43	0.2197	0.80	0.0991	1.80	0.0266	3.80	0.0083
0.18	0.3215	0.44	0.2138	0.82	0.0965	1.85	0.0263	3.90	0.0080
0.19	0.3178	0.45	0.2111	0.84	0.0929	1.90	0.0257	4.00	0.0075
0.20	0.3088	0.46	0.2106	0.86	0.0879	1.95	0.0244		
0.21	0.2978	0.47	0.2071	0.88	0.0854	2.00	0.0233		
0.22	0.3051	0.48	0.1999	0.90	0.0848	2.05	0.0228		
0.23	0.3164	0.49	0.1931	0.92	0.0837	2.10	0.0217		
0.24	0.3389	0.50	0.1893	0.94	0.0812	2.15	0.0208		
0.25	0.3367	0.51	0.1814	0.96	0.0777	2.20	0.0202		

Spettro normalizzato SLD

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.1156	0.26	0.3110	0.52	0.1886	0.98	0.1001	2.25	0.0436
0.01	0.1341	0.27	0.3110	0.53	0.1850	1.00	0.0981	2.30	0.0426
0.02	0.1527	0.28	0.3110	0.54	0.1816	1.05	0.0934	2.35	0.0417
0.03	0.1713	0.29	0.3110	0.55	0.1783	1.10	0.0892	2.40	0.0409
0.04	0.1899	0.30	0.3110	0.56	0.1751	1.15	0.0853	2.50	0.0392
0.05	0.2085	0.31	0.3110	0.57	0.1721	1.20	0.0817	2.60	0.0377
0.06	0.2271	0.32	0.3065	0.58	0.1691	1.25	0.0785	2.70	0.0363
0.07	0.2457	0.33	0.2972	0.60	0.1635	1.30	0.0754	2.80	0.0350
0.08	0.2643	0.34	0.2884	0.62	0.1582	1.35	0.0726	2.90	0.0338
0.09	0.2829	0.35	0.2802	0.64	0.1532	1.40	0.0701	3.00	0.0327
0.10	0.3015	0.36	0.2724	0.66	0.1486	1.45	0.0676	3.10	0.0316
0.11	0.3110	0.37	0.2651	0.68	0.1442	1.50	0.0654	3.20	0.0306
0.12	0.3110	0.38	0.2581	0.70	0.1401	1.55	0.0633	3.30	0.0297
0.13	0.3110	0.39	0.2515	0.72	0.1362	1.60	0.0613	3.40	0.0288
0.14	0.3110	0.40	0.2452	0.74	0.1325	1.65	0.0594	3.50	0.0280
0.15	0.3110	0.41	0.2392	0.76	0.1290	1.70	0.0577	3.60	0.0272
0.16	0.3110	0.42	0.2335	0.78	0.1257	1.75	0.0560	3.70	0.0265
0.17	0.3110	0.43	0.2281	0.80	0.1226	1.80	0.0545	3.80	0.0258
0.18	0.3110	0.44	0.2229	0.82	0.1196	1.85	0.0530	3.90	0.0251
0.19	0.3110	0.45	0.2179	0.84	0.1168	1.90	0.0516	4.00	0.0245
0.20	0.3110	0.46	0.2132	0.86	0.1140	1.95	0.0503		
0.21	0.3110	0.47	0.2087	0.88	0.1114	2.00	0.0490		
0.22	0.3110	0.48	0.2043	0.90	0.1090	2.05	0.0478		
0.23	0.3110	0.49	0.2001	0.92	0.1066	2.10	0.0467		
0.24	0.3110	0.50	0.1961	0.94	0.1043	2.15	0.0456		
0.25	0.3110	0.51	0.1923	0.96	0.1022	2.20	0.0446		

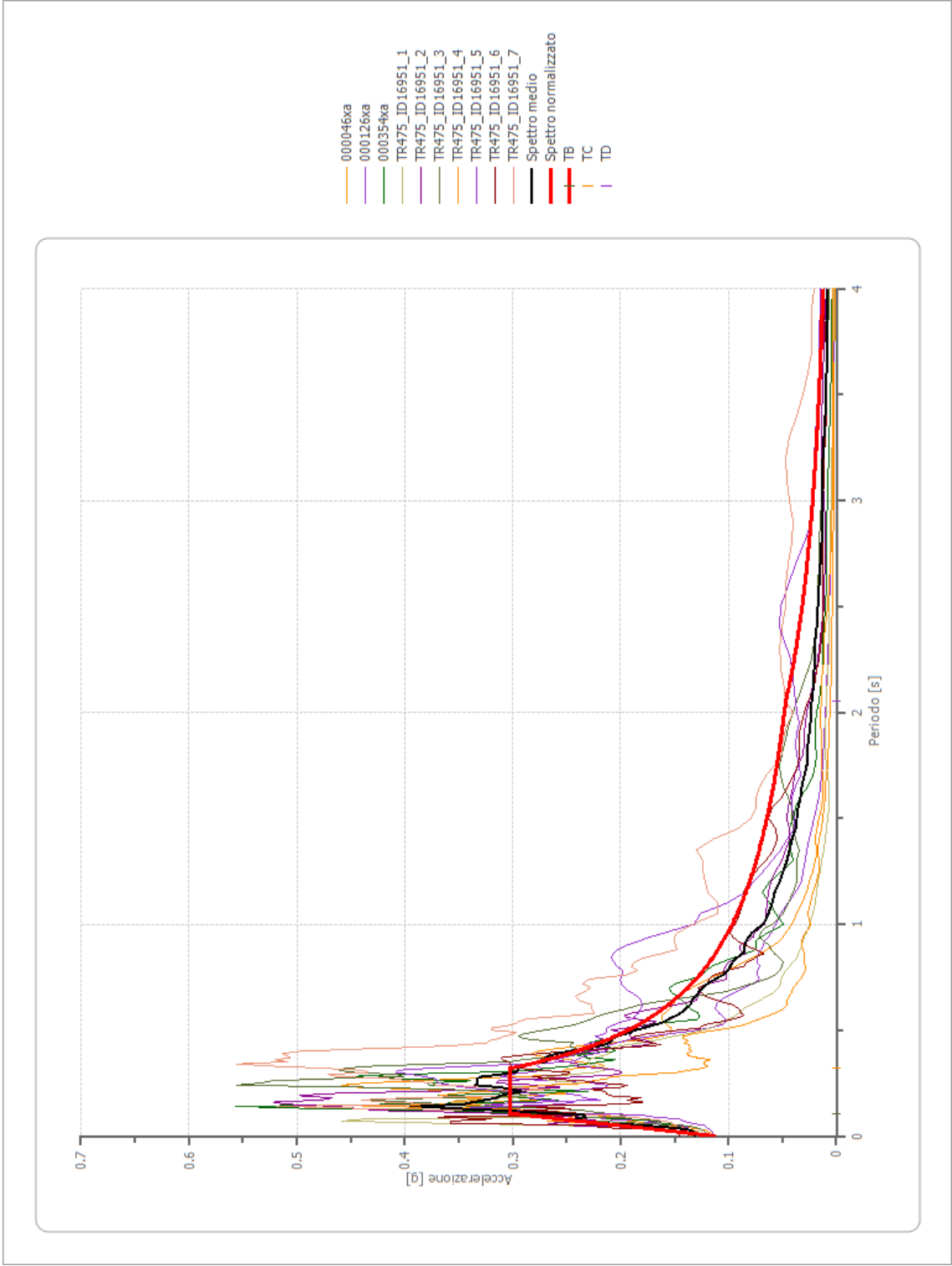
Parametri spettro normalizzato SLD

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.116	2.691	--	0.105	0.315	2.062	0.116	0.311	1.444

Di seguito si riportano in forma grafica gli spettri elaborati, lo spettro medio e lo spettro normalizzato allo stato limite SLD per classe d'uso III; lo spettro normalizzato (in rosso), ricavato dall'analisi numerica, è stato messo a confronto con gli spettri desumibili dall'analisi secondo la procedura semplificata (§ 3.2.2. NTC18) per un sottosuolo di categoria A-T1 (in verde) e C-T1 (in blu).

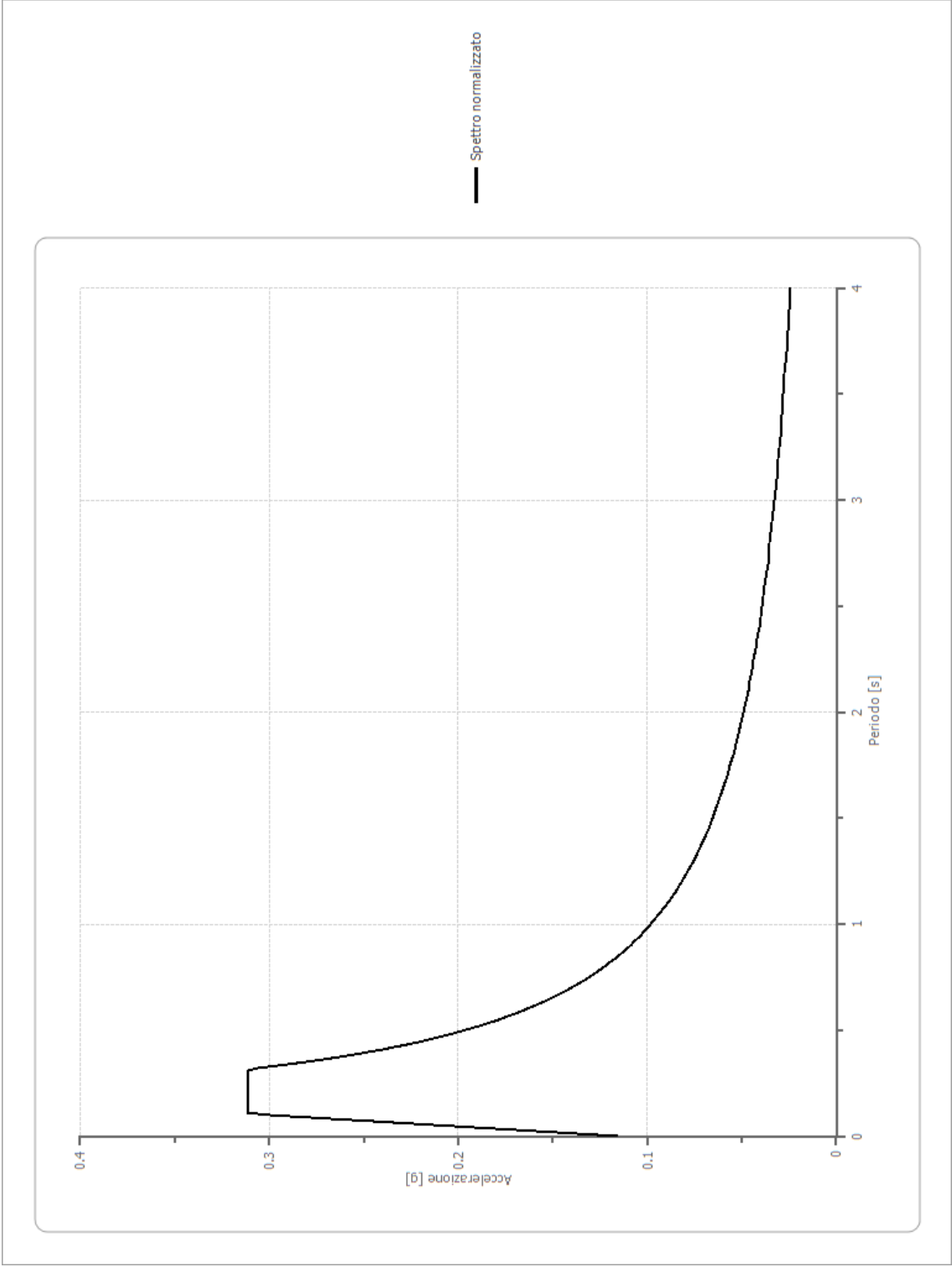
La scelta definitiva in merito agli spettri da utilizzarsi nella progettazione rimane comunque di competenza esclusiva del Progettista.

Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLD

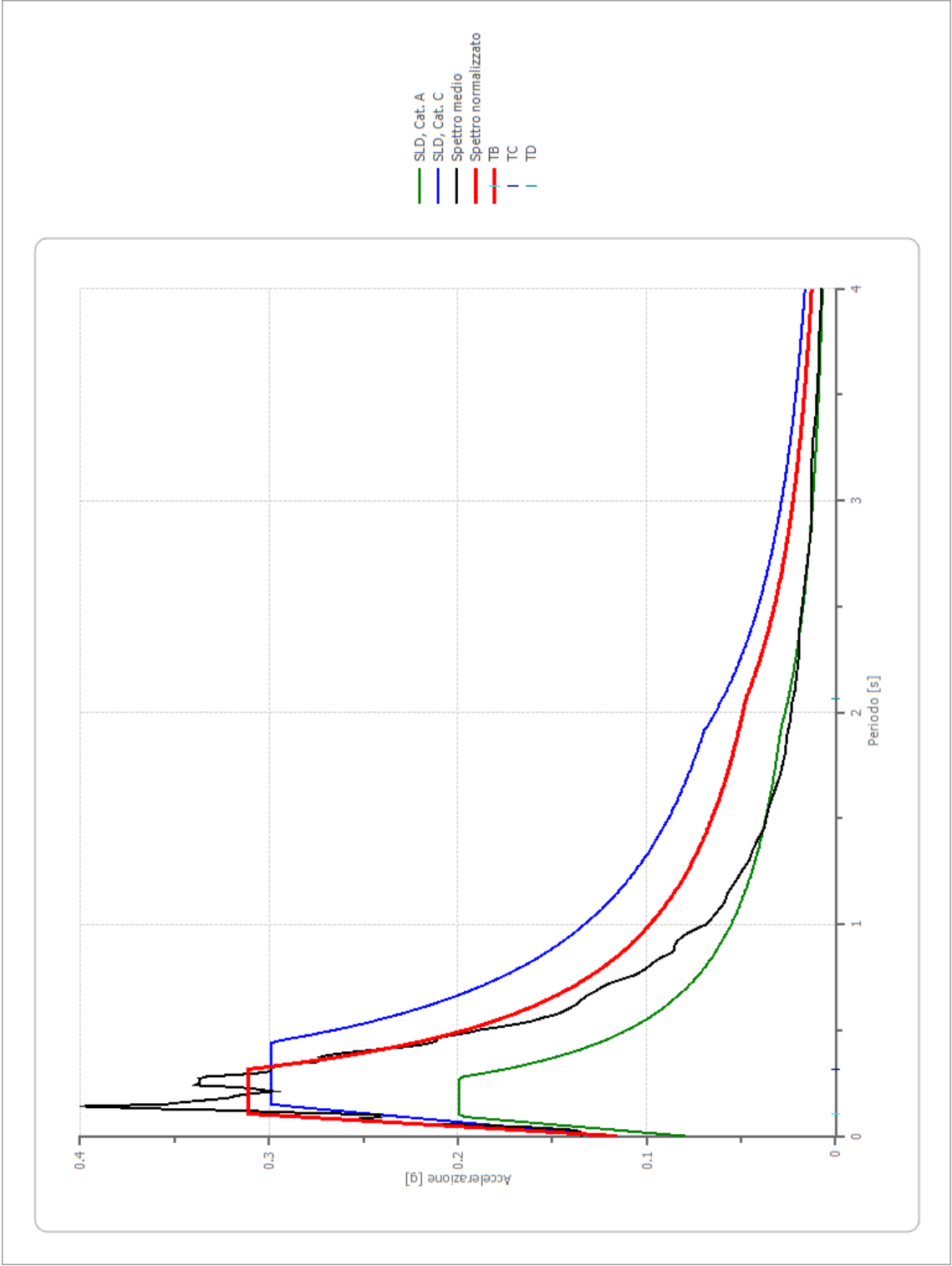




Spettro normalizzato SLD



Confronto con gli spettri NTC



#### 14. 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.

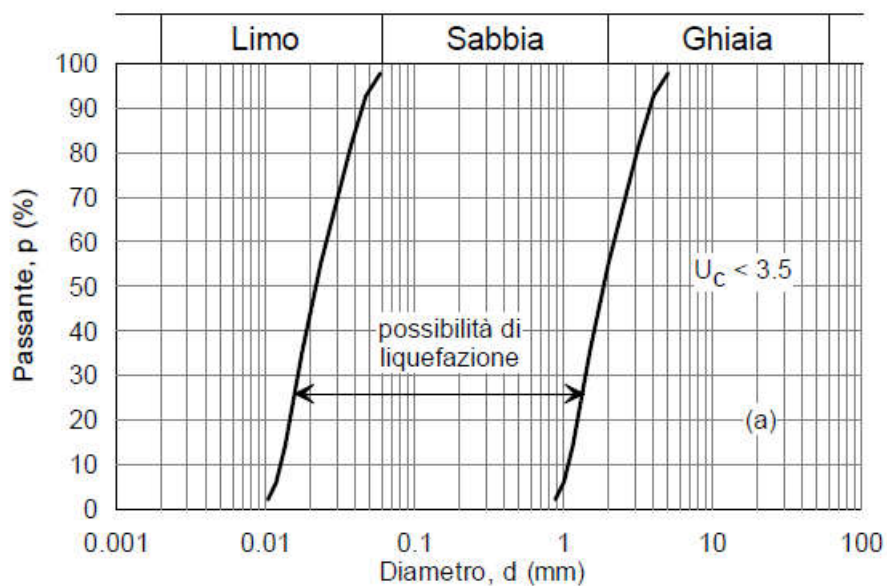
La verifica alla liquefazione può essere omessa quando risulta soddisfatta almeno uno delle seguenti circostanze come da N.T.C. 7.11.3.4.2:

1. Accelerazioni massime attese al p.c. in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g; nel nostro caso  $a_{maxs} = 0,268g$  (*non soddisfatta*).

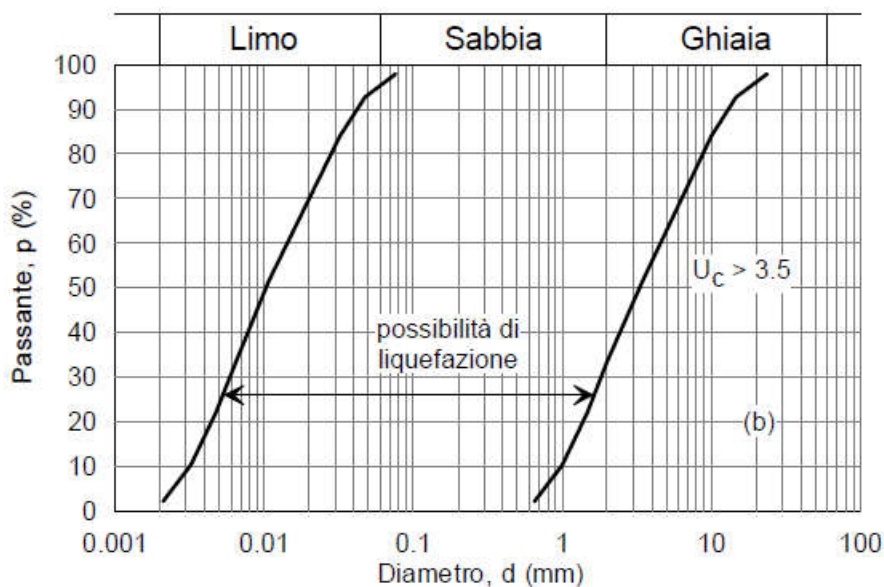
Quando la condizione 1 non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle successive condizioni:

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 è stata evidenziata la presenza di una circolazione idrica superficiale attestata a profondità variabili da 2,50 m a 4,20 m; la falda freatica, sulla base di letture eseguite all'interno dei piezometri posti in opera nel corso dei sondaggi a carotaggio continuo si attesta a profondità variabili da 6,50÷7,10 m a valle a 9,90÷10,50 m verso monte (*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; dall'indagine eseguita è emerso come i terreni del primo sottosuolo sono rappresentati da limi e argille compatte con sottili intercalazioni sabbiose con rari ciottoli sopportati da ghiaie di addensamento da medio ad elevato (*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.

(a)



(b)



Essendo soddisfatta almeno una delle precedenti circostanze previste dalle N.T.C. 7.11.3.4.2, non si è proceduto ad eseguire la verifica alla liquefazione.

## 15. RESISTENZA DI PROGETTO DEL TERRENO IN CONDIZIONI STATICHE

In accordo con le NTC sono stati effettuati i calcoli della resistenza allo stato limite ultimo (SLU).

Secondo la Normativa la valutazione del grado di sicurezza si ottiene adottando il “Metodo semiprobabilistico dei coefficienti parziali” e verificando la relazione:

$$Ed \leq Rd$$

dove:

Ed: valore di progetto dell'azione o degli effetti dell'azione nelle varie combinazioni di calcolo;

Rd: valore di progetto della resistenza del terreno.

Sulla base dei dati di resistenza meccanica ricavati dall'indagine geognostica eseguita è possibile valutare, in questa fase in via orientativa, la capacità portante dei terreni del primo sottosuolo.

Come visto in precedenza i terreni presenti nell'area indagata, sono caratterizzati, al di sotto di un orizzonte di terreno di riporto dello spessore medio di 0,40-1,60 m dalla presenza di limi argillosi e/o debolmente sabbiosi di consistenza da plastica a plastico dura, inglobanti intercalazioni sabbioso limose e/o viceversa con rari ciottoli di addensamento da medio ad elevato.

Suddetti litotipi sono sopportati da ghiaie di addensamento da medio ad elevato in matrice sabbioso limosa a tratti prevalente il cui tetto è stato evidenziato ad una profondità variabile da 6,60 m a 9,00 m dal p.c. attuale.

Di seguito, utilizzando i parametri di resistenza meccanica misurati nel corso dell'indagine geognostica, in modo indicativo, si verifica la resistenza di progetto dei suddetti terreni prendendo in esame sistemi fondali nastriformi, attestati ad una profondità media di 1,20-1,50 m dal p.c. attuale.

Si rimanda ad una analisi più approfondita e dettagliata l'esatta verifica della capacità portante, in relazione anche alle tipologie costruttive ed a particolari esigenze.

La verifica del valore di progetto della resistenza del terreno viene eseguita secondo la teoria proposta da *Brinch-Hansen* (1970), estensione dell'equazione di *Buisman* (1935) e *Terzaghi* (1943), basata sulle seguenti ipotesi:

- omogeneità ed isotropia del terreno;
- non resistenza del terreno agli sforzi tensionali di trazione;
- rigidità infinita della struttura di fondazione rispetto al terreno.



Per le considerazioni suddette la formula di *Brinch-Hansen* viene ad assumere la seguente struttura:

$$R_d = (1/2 \gamma' B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma z_\gamma + c' N_c s_c d_c i_c g_c b_c z_c + q' N_q s_q d_q i_q g_q b_q z_q) r_g / \gamma_R$$

dove:

$\gamma'$  = peso di volume del terreno posto al disotto della fondazione;

$B$  = larghezza della fondazione;

$N_\gamma$ ;  $N_c$ ;  $N_q$  = fattori di capacità portante dipendenti dall'angolo di resistenza al taglio;

$c'$  = coesione del terreno;

$q = (\gamma \cdot D)$  = sovraccarico agente ai bordi della fondazione dove  $\gamma$  è il peso di volume del terreno e  $D$  è l'incastro della fondazione;

$s_\gamma$ ;  $s_c$ ;  $s_q$  = fattori di forma della fondazione;

$d_\gamma$ ;  $d_c$ ;  $d_q$  = fattori di profondità della fondazione;

$i_\gamma$ ;  $i_c$ ;  $i_q$  = fattori inclinazione carico sulla fondazione;

$g_\gamma$ ;  $g_c$ ;  $g_q$  = fattori dipendenti dall'inclinazione del terreno;

$b_\gamma$ ;  $b_c$ ;  $b_q$  = fattori dipendenti dall'inclinazione della fondazione;

$z_\gamma$ ;  $z_c$ ;  $z_q$  = fattori correzione sismico inerziale;

$r_g$  = fattore riduttivo applicato per elevati valori di  $B$  (Bowles);

$\gamma_R$  = coefficiente parziale per la verifica agli stati ultimi di fondazioni superficiali.

In presenza di terreni prevalentemente coesivi la verifica della capacità portante degli stessi viene eseguita in condizioni non drenate (condizioni più critiche); in questo caso l'angolo di attrito interno del terreno ( $\varphi$ ) viene considerato uguale a zero e la resistenza al taglio totale viene affidata alla sola coesione non drenata il cui valore viene ricavato empiricamente mediante la relazione:

$$C_u = \frac{q c_m - \sigma'_{vo}}{N_{cp}}$$

dove:

$q c_m$  = valore medio di resistenza meccanica del terreno posto al disotto del piano di posa delle fondazioni;

$\sigma'_{vo}$  = tensione verticale efficace;

$N_{cp}$  = coefficiente adimensionale funzione della litologia e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni.

Per le condizioni suddette la formula di *Brinch-Hansen*, non considerando i fattori correttivi che tengono conto dell'approfondimento della fondazione, ipotizzando il piano di posa della fondazione orizzontale, che il carico trasmesso sulla stessa risulti centrato, e per una inclinazione del terreno  $\beta = 0$ , si riduce a:

$$R_d = (c u d \cdot N_c \cdot z_c \cdot s_c \cdot g_c + q) \cdot r_g / \gamma_R$$

dove:

$cud$  = coesione non drenata di progetto;

$N_c = (2 + \pi)$  = fattore capacità portante;

$z_c$  = fattore correzione sismico inerziale;

$s_c$  = fattore di forma della fondazione; pari a  $1 + 0,2 \cdot (B/L)$ ;

$g_c$  = fattore dipendente dall'inclinazione del terreno;

$q = (\gamma \cdot D)$  = sovraccarico agente ai bordi della fondazione; dove  $\gamma$  è il peso di volume del terreno e  $D$  è l'incastro della fondazione;

$r_g$  = fattore riduttivo applicato per elevati valori di  $B$  (Bowles), pari a  $1 - 0,25 \log_{10}(B/2)$ ; per valori di  $B < 2$  m, lo stesso si assume unitario;

Il valore di progetto della resistenza  $R_d$  viene determinato in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale  $\gamma_M$  specificato nella successiva Tab. 6.2II e tenendo conto, dove necessario, dei coefficienti parziali  $\gamma_R$  relativi a ciascun tipo di opera.

La verifica della resistenza di progetto allo stato limite ultimo (SLU) viene effettuata applicando la combinazione (A1+M1+R3) prevista dall'approccio 2 tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nella Tab. 6.2.II.

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE		
		$\gamma_M$	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'k$	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Coesione efficace	$c' k$	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,00	1,40
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1,00	1,00

Il valore caratteristico della coesione non drenata ( $c_{uk}$ ), trovandoci in presenza di una fondazione rigida cui è associata un importante volume significativo di terreno, è definito come il 5° percentile della distribuzione lognormale della media dei dati delle verticali indagate nel volume di influenza, al quale viene applicato il coefficiente M1 previsto dalla Normativa per ottenere il valore di  $cud$ .

Per tener conto degli effetti inerziali indotti dal sisma viene introdotto il fattore correttivo  $z_c$  ottenuto dalla formula:

$$z_c = 1 - 0,32 \cdot kh$$

dove:

$kh$  = coefficiente sismico orizzontale.

Per un valore di  $kh$  pari a 0,064, si ottiene un valore di  $z_c$  pari a 0,980.

Il valore  $\gamma_R$  (coefficiente parziale per la verifica agli stati ultimi di fondazioni superficiali) si ricava dalla seguente tabella:

Tabella 6.4.I – Coefficienti parziali per le verifiche SLU di fondazioni superficiali

Verifica	Coefficiente parziale
	(R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

Nel nostro caso, non considerando la superficie efficace della fondazione, otteniamo:

#### Fondazioni nastroforni

$D = 1,20 \text{ m}$ ;  $L < 2,00 \text{ m}$

$q = 22,9 \text{ kN/m}^2$ ;

$z_c = 0,980$ ;

$sc = 1,0$ ;

$rg = 1,0$ .

N.	$c_{uk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c_{ud}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_R$	Rd (kN/m <sup>2</sup> )
CPTU 1	60	60,0	2,3	<b>141,4</b>
CPTU 2	60	60,0	2,3	<b>141,4</b>
CPTU 3	50	50,0	2,3	<b>119,5</b>
CPT 1	75	75,0	2,3	<b>174,2</b>
CPT 2	60	60,0	2,3	<b>141,4</b>
CPT 6	80	80,0	2,3	<b>185,2</b>
CPT 7	65	65,0	2,3	<b>152,3</b>

Sarà cura del progettista, sulla base della conoscenza dei parametri, della geometria e delle azioni di progetto, la verifica della disequazione  $Ed < Rd$ .

## 16. SCHEDA DI SINTESI

## - CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO GEOTECNICA PRELIMINARE

<b>Inquadramento geologico generale</b>	<p>L'area in esame si ubica nella fascia collinare pedeappenninica caratterizzata da lievi ondulazioni che degradano progressivamente in direzione Nord verso l'alta Pianura Padana.</p> <p>Più esattamente si attesta ad una quota compresa tra 68,00 m e 87,00 m s.l.m., in una fascia pressoché pianeggiante o scarsamente acclive (2,5÷3,5 %), con lieve pendenza verso Est – Sud/Est, a ridosso della strada statale n. 64 - Porrettana</p>
<b>Indagine geognostica e prove di riferimento</b>	<p>n. 3 penetrometrie statiche con punta elettrica (CPTU) che, rispetto al p.c. attuale, hanno raggiunto profondità comprese tra 5,34 m e 9,08 m, n. 4 penetrometrie statiche con punta meccanica (CPT) che rispetto al p.c. hanno raggiunto profondità compresa tra 7,60 m e 9,80 m e n. 3 sondaggi con il metodo del carotaggio continuo (C2÷C3, C13), di lunghezza compresa tra 13,50 m e 16,00 m eseguiti all'interno del comparto nel 2013 e 2014</p>
<b>Interferenza con falda</b>	<p>I suddetti terreni sono caratterizzati dalla presenza di circolazioni idriche localizzate il cui livello statico, al termine dell'indagine, rispetto al p.c. attuale è stato misurato a profondità variabili da 2,50 m a 4,20 m; letture eseguite all'interno dei piezometri posti in opera nel corso dei sondaggi a carotaggio continuo hanno evidenziato la presenza di una falda all'interno dei terreni grossolani il cui livello statico è stato misurato a profondità variabili da 6,50÷7,10 m a valle a 9,90÷10,50 m verso monte.</p>
<b>Liquefazione</b>	<p>Non sono presenti fattori predisponenti fenomeni di liquefazione</p>
<b>Classificazione geotecnica dei sedimenti</b>	<p>Zona caratterizzata da terreni dotati di buone qualità meccaniche</p> <p>I terreni coerenti (limi e argille) nel caso di un sistema fondale nastriforme, non considerando la superficie efficace dello stesso, consentono valori di resistenza di progetto compresi tra 119,5 kN/m<sup>2</sup> e 185,2 kN/m<sup>2</sup></p>

<b>Condizioni di fattibilità e prescrizioni</b>	<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

<b>Indagini sismiche</b>	Una misura del Rumore Sismico Passivo (microtremori)
<b>Pericolosità sismica PTM</b>	Zona AV – e detriti $\leq 15^\circ$ – Depositi alluvionali di fondovalle e terrazzati e depositi di conoide alluvionale affioranti; corpi detritici di varia origine, generalmente a granulometria mista con spessore $H \geq 3$ m e inclinazione del pendio $\leq 15^\circ$
<b>Modellazione sismica</b>	$A_g = 0,188g$ ; Categoria Topografica T1; coefficiente di amplificazione topografica 1; $V_{seq} = 352$ m/s; Categoria di sottosuolo C
<b>Microzonazione sismica II Livello</b>	Macrocontesto: Margine di tipo A; $V_{SH} = 230$ m/sec. FA PGA = 2,0 FA SA1 = 2,0; FA SA2 = 1,9; FA SA3 = 1,7 FA SI1 = 2,0; FA SI2 = 1,8
<b>Analisi sismica III Livello</b>	FA PGA = 1,5; FA SA1 = 1,5; FA SA2 = 1,5; FA SA3 = 1,3; FA SA4 = 1,4
<b>Liquefazione</b>	Non liquefacibile
<b>Condizioni di fattibilità e prescrizioni</b>	Nessun elemento escludente o limitativo per gli interventi previsti

Casalecchio di Reno, 28 Settembre 2023



## ALLEGATI



## **Indagine geognostica**









Committente: SICarchitettura  
 Località: Sasso Marconi (BO)  
 Cantiere: ex stabilimento Alfa Wassermann  
 n° prova: 1  
 Profondità falda: foro chiuso a 0.20 m  
 Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN  
 Note: ---

Rapporto di prova N°: **13.0165 /RSP**

Data prova: 08/04/2013  
 Quota: ---  
 Codice lavoro: 2013.042  
 Procedura di prova: IO\_003

L1 kg/cm <sup>2</sup>	L2 kg/cm <sup>2</sup>	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
23		2.25	98.10	23	4.35	
39	54	3.82	124.26	31	3.25	1,0 m
15	34	1.47	98.10	15	6.67	
17	32	1.67	85.02	20	5.10	
19	32	1.86	104.64	18	5.62	
21	37	2.06	111.18	19	5.40	
103	120	10.10	98.10	103	0.97	2,0 m
25	40	2.45	65.40	37	2.67	
19	29	1.86	85.02	22	4.56	
18	31	1.76	104.64	17	5.93	
18	34	1.76	85.02	21	4.82	
20	33	1.96	91.56	21	4.67	3,0 m
16	30	1.57	98.10	16	6.25	
14	29	1.37	91.56	15	6.67	
16	30	1.57	85.02	18	5.42	
13	26	1.27	78.48	16	6.16	
18	30	1.76	104.64	17	5.93	4,0 m
17	33	1.67	98.10	17	5.89	
17	32	1.67	104.64	16	6.28	
17	33	1.67	78.48	21	4.71	
19	31	1.86	91.56	20	4.92	
17	31	1.67	98.10	17	5.89	5,0 m
16	31	1.57	91.56	17	5.84	
16	30	1.57	85.02	18	5.42	
15	28	1.47	85.02	17	5.78	
17	30	1.67	85.02	20	5.10	
16	29	1.57	85.02	18	5.42	6,0 m
15	28	1.47	78.48	19	5.34	
14	26	1.37	85.02	16	6.19	
13	26	1.27	78.48	16	6.16	
12	24	1.18	65.40	18	5.56	
13	23	1.27	65.40	19	5.13	7,0 m
13	23	1.27	78.48	16	6.16	
16	28	1.57	91.56	17	5.84	
16	30	1.57	85.02	18	5.42	
315	328	30.88	183.12	169	0.59	
230	258	22.55	137.34	164	0.61	8,0 m
101	122	9.90	71.94	138	0.73	
306	317	30.00	183.12	164	0.61	
400	428	39.22				

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	08/04/2013	Dr. Tabarroni	Dr. Luca Conti

Committente: SICarchitettura  
 Località: Sasso Marconi (BO)  
 Cantiere: ex stabilimento Alfa Wassermann  
 n° prova: 2  
 Profondità falda: foro chiuso a 4.00 m  
 Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN  
 Note: ---

Rapporto di prova N°: **13.0166 /RSP**

Data prova: 08/04/2013  
 Quota: ---  
 Codice lavoro: 2013.042  
 Procedura di prova: IO\_003

L1 kg/cm²	L2 kg/cm²	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
15		1.47	98.10	15	6.67	
16	31	1.57	85.02	18	5.42	1,0 m
33	46	3.24	71.94	45	2.22	
19	30	1.86	98.10	19	5.27	
21	36	2.06	104.64	20	5.08	
25	41	2.45	117.72	21	4.80	
24	42	2.35	111.18	21	4.73	2,0 m
18	35	1.76	104.64	17	5.93	
46	62	4.51	85.02	53	1.89	
18	31	1.76	91.56	19	5.19	
17	31	1.67	85.02	20	5.10	
19	32	1.86	85.02	22	4.56	3,0 m
21	34	2.06	85.02	24	4.13	
44	57	4.31	78.48	55	1.82	
23	35	2.25	111.18	20	4.93	
24	41	2.35	98.10	24	4.17	
77	92	7.55	98.10	77	1.30	4,0 m
89	104	8.73	150.42	58	1.72	
30	53	2.94	52.32	56	1.78	
14	22	1.37	91.56	15	6.67	
28	42	2.75	45.78	60	1.67	
11	18	1.08	65.40	16	6.06	5,0 m
115	125	11.27	78.48	144	0.70	
274	286	26.86	156.96	171	0.58	
112	136	10.98	78.48	140	0.71	
31	43	3.04	58.86	52	1.94	
13	22	1.27	52.32	24	4.11	6,0 m
12	20	1.18	52.32	22	4.45	
14	22	1.37	58.86	23	4.29	
14	23	1.37	65.40	21	4.76	
13	23	1.27	45.78	28	3.59	
12	19	1.18	58.86	20	5.00	7,0 m
11	20	1.08	65.40	16	6.06	
12	22	1.18	65.40	18	5.56	
12	22	1.18	52.32	22	4.45	
13	21	1.27	71.94	18	5.64	
17	28	1.67	78.48	21	4.71	8,0 m
13	25	1.27	78.48	16	6.16	
175	187	17.16	111.18	154	0.65	
322	339	31.57	183.12	172	0.58	
296	324	29.02	176.58	164	0.61	
79	106	7.75	104.64	74	1.35	9,0 m
105	121	10.29	85.02	121	0.83	
116	129	11.37	85.02	134	0.75	
322	335	31.57	176.58	179	0.56	
400	427	39.22				

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	08/04/2013	Dr. Chelli	Dr. Luca Conti

via Cimmarosa 119 - 40033 Casalecchio di Reno (BO) - Tel. 051.6133072 Fax. 051.6133512



Committente: SICarchitettura  
 Località: Sasso Marconi (BO)  
 Cantiere: ex stabilimento Alfa Wassermann  
 n° prova: 6  
 Profondità falda: 4.20 m  
 Attrezzatura: Penetrometro da 100 kN  
 Note: ---

Rapporto di prova N°: **13.0171 /RSP**

Data prova: 08/04/2013  
 Quota: ---  
 Codice lavoro: 2013.042  
 Procedura di prova: --

L1 kg/cm <sup>2</sup>	L2 kg/cm <sup>2</sup>	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
6		0.59	39.24	15	6.67	
8	14	0.78	32.70	24	4.17	
6	11	0.59	26.16	22	4.45	
4	8	0.39	45.78	9	11.67	
10	17	0.98	65.40	15	6.67	1,0 m
20	30	1.96	98.10	20	5.00	
18	33	1.76	98.10	18	5.56	
17	32	1.67	98.10	17	5.89	
19	34	1.86	91.56	20	4.92	
70	84	6.86	137.34	50	2.00	2,0 m
93	114	9.12	163.50	56	1.79	
78	103	7.65	137.34	56	1.80	
54	75	5.29	91.56	58	1.73	
32	46	3.14	143.88	22	4.59	
21	43	2.06	117.72	17	5.72	3,0 m
24	42	2.35	111.18	21	4.73	
48	65	4.71	91.56	51	1.95	
21	35	2.06	117.72	17	5.72	
20	38	1.96	111.18	18	5.67	
25	42	2.45	150.42	16	6.14	4,0 m
25	48	2.45	156.96	16	6.40	
24	48	2.35	156.96	15	6.67	
20	44	1.96	111.18	18	5.67	
20	37	1.96	124.26	16	6.34	
21	40	2.06	130.80	16	6.35	5,0 m
20	40	1.96	130.80	15	6.67	
19	39	1.86	117.72	16	6.32	
13	31	1.27	71.94	18	5.64	
12	23	1.18	71.94	16	6.11	
14	25	1.37	91.56	15	6.67	6,0 m
16	30	1.57	98.10	16	6.25	
17	32	1.67	111.18	15	6.67	
21	38	2.06	137.34	15	6.67	
22	43	2.16	117.72	18	5.46	
20	38	1.96	117.72	17	6.00	7,0 m
19	37	1.86	124.26	15	6.67	
19	38	1.86	104.64	18	5.62	
17	33	1.67	104.64	16	6.28	
15	31	1.47	85.02	17	5.78	
12	25	1.18	58.86	20	5.00	8,0 m
13	22	1.27	78.48	16	6.16	
302	314	29.61	176.58	168	0.60	
356	383	34.90	202.74	172	0.58	
400	431	39.22				

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	08/04/2013	Dr. Tabarroni	Dr. Luca Conti

Committente: SICarchitettura  
 Località: Sasso Marconi (BO)  
 Cantiere: ex stabilimento Alfa Wassermann  
 n° prova: 7  
 Profondità falda: 2.50 m  
 Attrezzatura: Penetrometro da 100 kN  
 Note: ---

**Rapporto di prova N°: 13.0172 /RSP**

Data prova: 09/04/2013  
 Quota: ---  
 Codice lavoro: 2013.042  
 Procedura di prova: --

L1 kg/cm <sup>2</sup>	L2 kg/cm <sup>2</sup>	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
7		0.69	32.70	21	4.76	
6	11	0.59	39.24	15	6.67	
12	18	1.18	52.32	22	4.45	
14	22	1.37	85.02	16	6.19	
12	25	1.18	65.40	18	5.56	1,0 m
15	25	1.47	98.10	15	6.67	
16	31	1.57	85.02	18	5.42	
16	29	1.57	104.64	15	6.67	
18	34	1.76	104.64	17	5.93	
17	33	1.67	78.48	21	4.71	2,0 m
17	29	1.67	98.10	17	5.89	
18	33	1.76	71.94	25	4.08	
58	69	5.69	85.02	67	1.50	
14	27	1.37	71.94	19	5.24	
15	26	1.47	65.40	22	4.45	3,0 m
21	31	2.06	65.40	31	3.18	
18	28	1.76	91.56	19	5.19	
19	33	1.86	91.56	20	4.92	
14	28	1.37	58.86	23	4.29	
12	21	1.18	58.86	20	5.00	4,0 m
13	22	1.27	71.94	18	5.64	
11	22	1.08	58.86	18	5.46	
10	19	0.98	58.86	17	6.00	
10	19	0.98	52.32	19	5.34	
11	19	1.08	65.40	16	6.06	5,0 m
10	20	0.98	52.32	19	5.34	
11	19	1.08	71.94	15	6.67	
13	24	1.27	71.94	18	5.64	
20	31	1.96	91.56	21	4.67	
17	31	1.67	91.56	18	5.49	6,0 m
15	29	1.47	98.10	15	6.67	
24	39	2.35	91.56	26	3.89	
33	47	3.24	78.48	41	2.43	
173	185	16.96	124.26	136	0.73	
265	284	25.98	156.96	166	0.60	7,0 m
338	362	33.14	183.12	181	0.55	
286	314	28.04	163.50	171	0.58	
400	425	39.22				

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	09/04/2013	Dr. Chelli	Dr. Luca Conti

**GEO-PROBE S.r.l.**

- Indagini Geognostiche -

40033 CASALECCHIO DI RENO

Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072

**CPT (CONE PENETRATION TEST)****N. 1**Rapporto di Prova N°: **13.0165 /RSP**

Committente :

SICarchitettura

Località :

Sasso Marconi (BO)

ex stabilimento Alfa Wassermann

Attrezzatura :

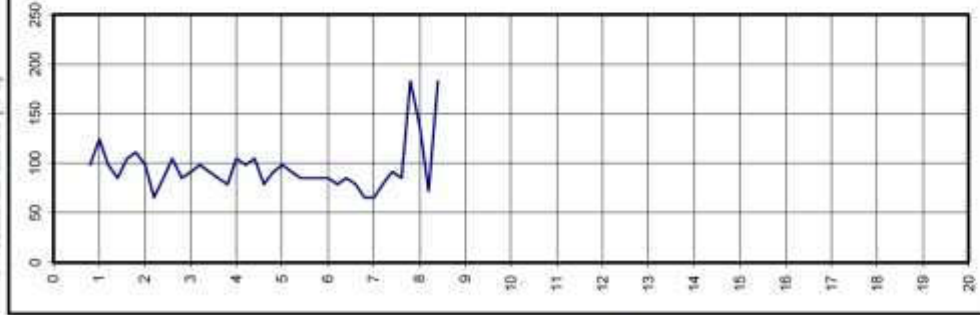
Penetrometro da 200 kN

Quota: ---

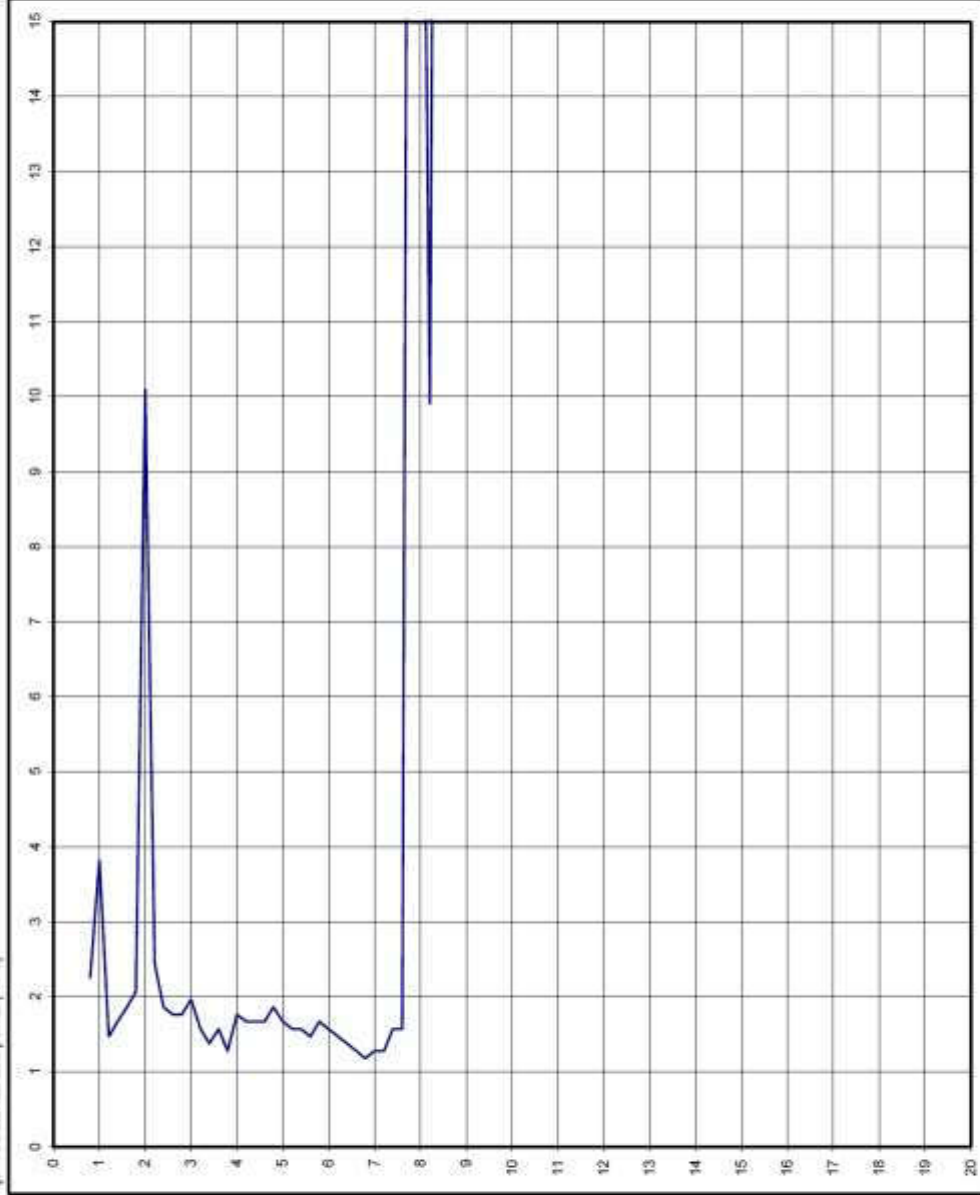
Data prova : 08/04/2013

Codice lavoro: 2013.042

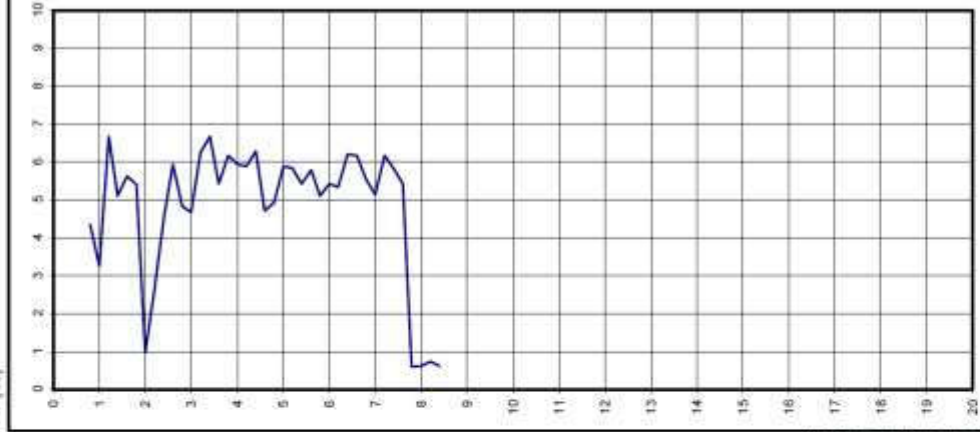
fs resistenza laterale (kPa)



qc resistenza alla punta (MPa)



Rf (%)



Livello acqua da p.c.: foro chiuso

Note: ---

Procedura di prova	Normativa di riferimento	Rev.	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
IO_003	ASTM D 3441-94	0	08/04/2013	Dr. Tabarroni	Dr. Luca Conti



**GEO-PROBE S.r.l.**

- Indagini Geognostiche -

40033 CASALECCHIO DI RENO

Via Cimara, 119 - Tel. 051/61.33.072

**CPT (CONE PENETRATION TEST)**

**N. 2**

**Rapporto di Prova N°:**

**13.0166 /RSP**

Committente :

SiCarchitetture

Quota: ---

Località :

Sasso Marconi (BO)

ex stabilimento Alfa Wassermann

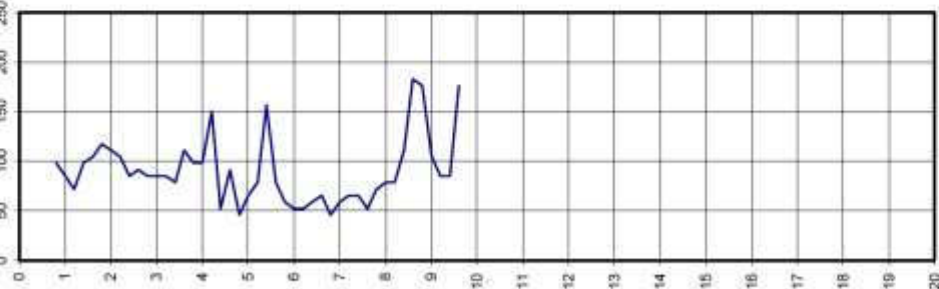
Data prova : 08/04/2013

Attrezzatura :

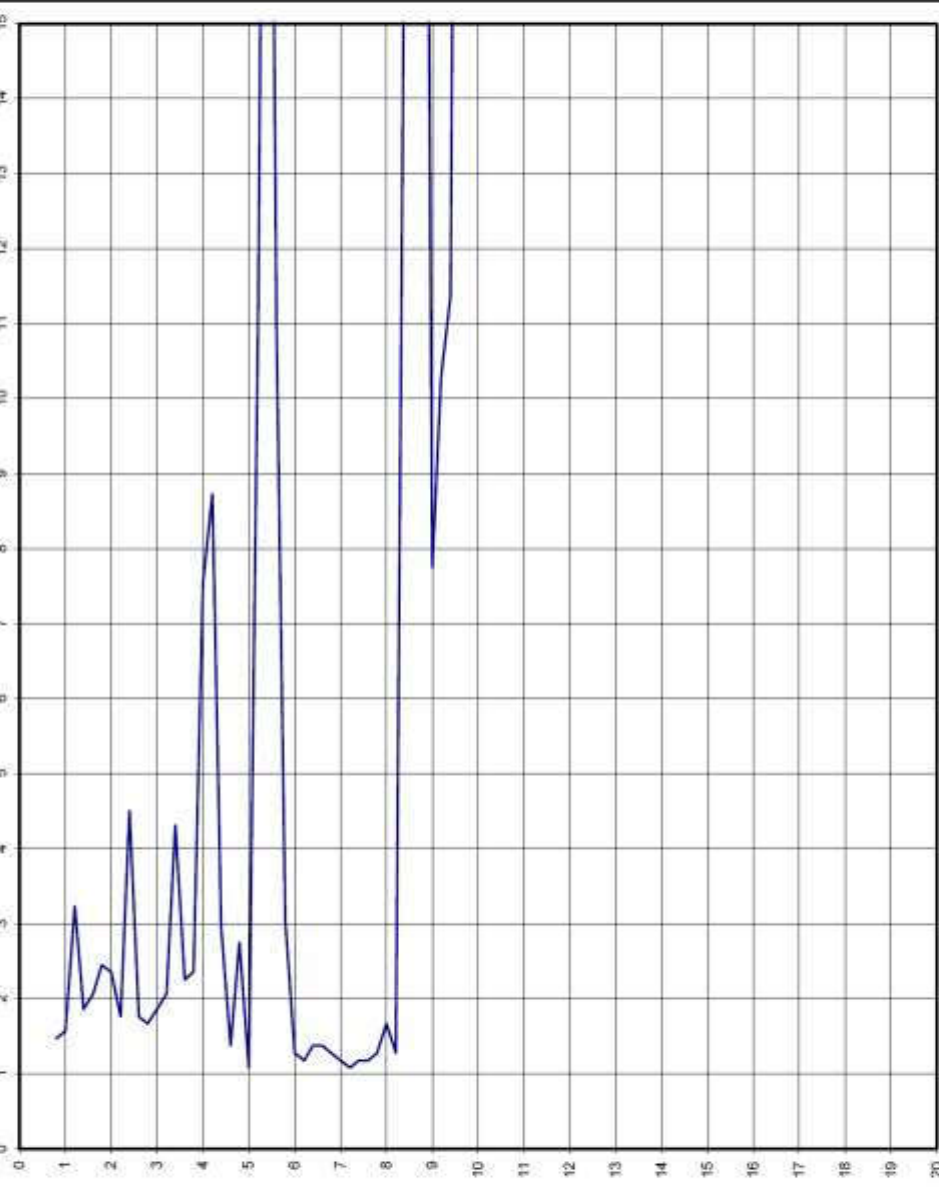
Penetrometro da 200 kN

Codice lavoro: 2013.042

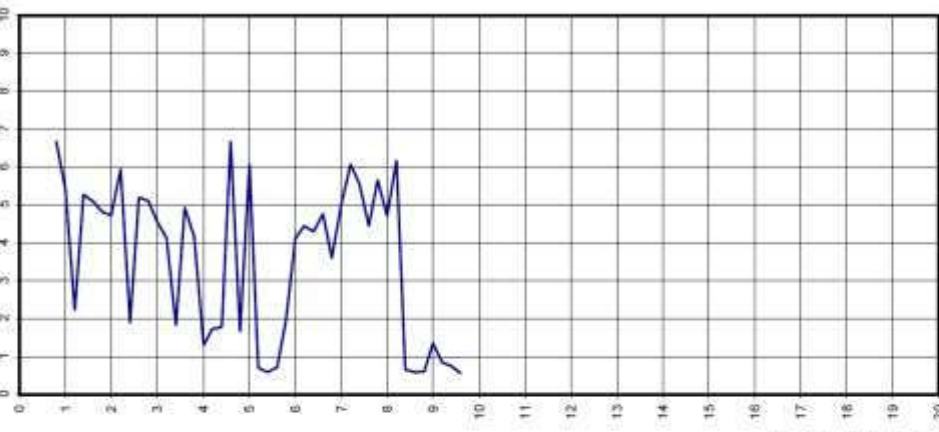
fs resistenza laterale (kPa)



qc resistenza alla punta (MPa)



Rf (%)



Livello acqua da p.c. : foro chiuso

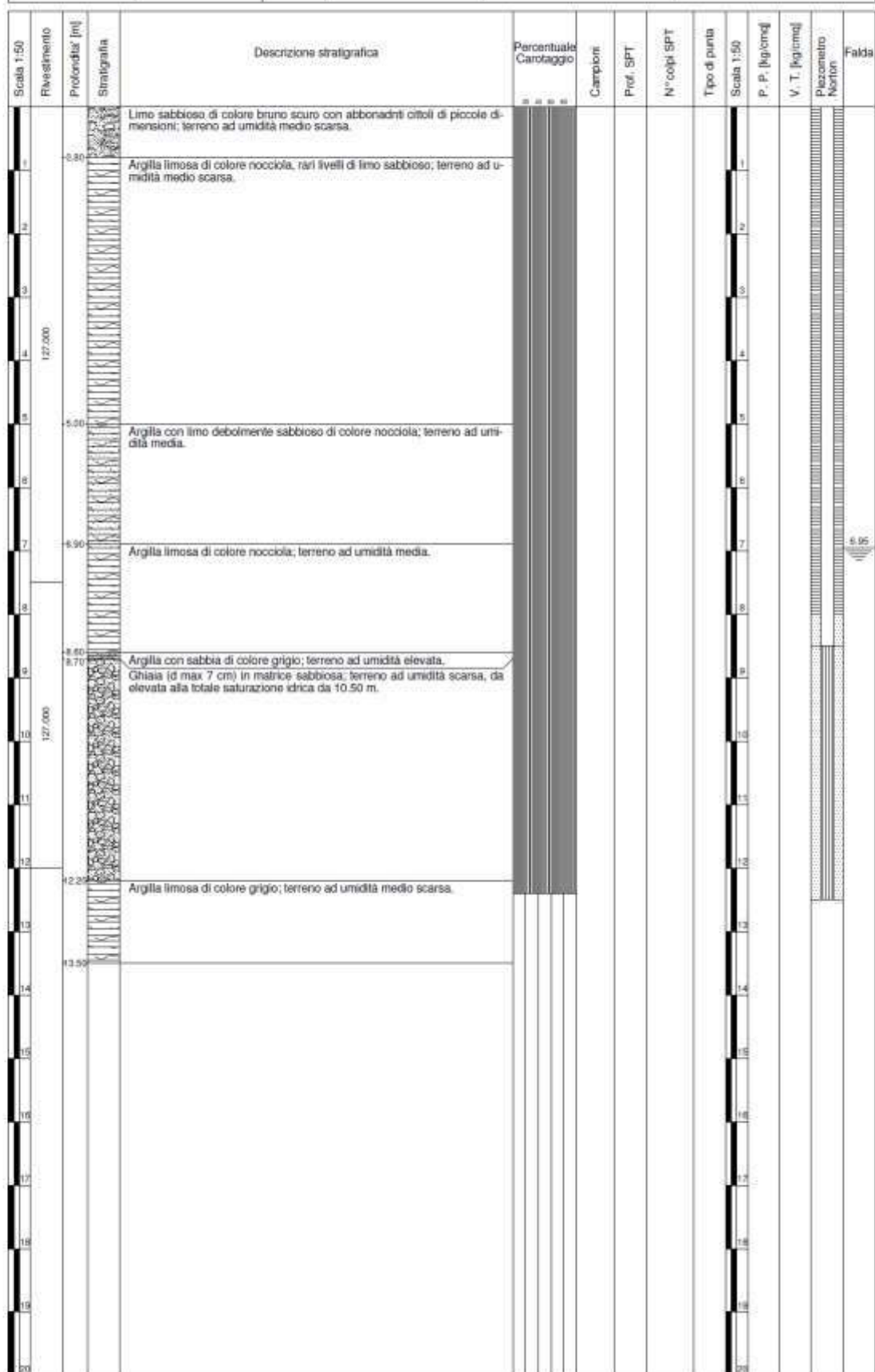
Note: ---

Procedura di prova	Normativa di riferimento	Rev.	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
IO_003	ASTM D 3441-94	0	08/04/2013	Dr. Chelli	Dr. Luca Conti

MOD.0 RSP GRAF CPT



<b>GEO-PROBE</b> Indagini Geognostiche 40033 CASALECCHIO DI RENO (BO) Via Cimavosa, 119 - Tel. 051/61.33.072		Committente: <u>SicArchitettura</u>		Quota: <u>—</u>		Rep. Pr. N°14.0627/RSP	
		Località: <u>Sasso Marconi (BO)</u>		Profondità: <u>13,50 m</u>		Codice Lavoro: <u>13.542</u>	
		Cantiere: <u>Ex Alfa Wassermann</u>		Data Inizio: <u>22/07/2014</u>		SONDAGGIO	
		Perforazione: <u>Carotaggio Continuo diam. 101</u>		Data Fine: <u>22/07/2014</u>		FOGLIO	
		Attrezzatura: <u>Sonda Drili 830L</u>		Il geologo: <u>Dr. Conti</u>		2 / 1/1	
Procedura di Prova IO_001	Rapporto di Prova N° 14.0627/RSP	Rev. 0	Data di emissione 23/07/2014	Lo Sperimentatore Dr. Regazzi	Il Direttore di Laboratorio Dr. Conti		



Rilevamento acqua nel foro di sondaggio:

DATA : 09/07/14 ORE INIZIO: 07:40 ORE FINE: 09:40 QUOTA SPT: 11.20 QUOTA S.P.: 13.50 QUOTA ADD: 11.50

posto in opera piezometro microtrascurato da 2,5°  
prodotto di sabbia con lurchetto



<b>GEO-PROBE</b> Indagini Geognostiche 40033 CASALECCHIO DI RENO (BO) Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072		Comitente: <b>SioArchitettura</b>		Quota: <b>---</b>		Rap. Pr. N°14.0628/RSP	
		Località: <b>Sasso Marconi (BO)</b>		Profondità: <b>16,00 m</b>		Codice Lavori 2013.042	
		Cantiere: <b>Ex Alta Wassmann</b>		Data Inizio: <b>21/07/2014</b>		SONDAGGIO	
		Perforazione: <b>Carotaggio Continuo diam. 101</b>		Data Fine: <b>22/07/2014</b>		FOGLIO	
		Attrezzatura: <b>Sonda Drill 830L</b>		Il geologo: <b>Dr. Conti</b>		<b>3 1/1</b>	
Procedura di Prova <b>IO_001</b>	Rapporto di Prova N° <b>14.0628/RSP</b>	Rev. <b>0</b>	Data di emissione <b>22/07/2014</b>	Lo Sperimentatore <b>Dr. Regazzi</b>		Il Direttore di Laboratorio <b>Dr. Conti</b>	

Scala 1:50	Rivestimento	Profondità [m]	Stratigrafia	Descrizione stratigrafica	Percentuale Carotaggio	Campioni	Prof. SPT	N° colpi SPT	Tipo di punta	Scala 1:50	P. P. [kg/cm²]	V. T. [kg/cm²]	Piezometro Norton	Falda
1				Limo sabbioso di colore nocciola, livelli con ciottoli da 0,30 m a 0,60 m e da 1,40 m a 1,60 m; terreno ad umidità medio scarsa.						1				
2		1,60		Argilla limosa di colore nocciola; terreno ad umidità medio scarsa.						2				
3		2,70		Ghiaia (d max 8 cm) in abbondante matrice limo sabbiosa di colore nocciola; terreno ad umidità medio scarsa.						3				
4		3,20		Argilla limosa debolmente sabbiosa di colore nocciola, livelli di ciottoli a 4,10 m e da 6,20 m a 6,40 m; terreno ad umidità medio scarsa.						4				
5										5				
6										6				
7		6,50		Sabbia limosa debolmente argillosa di colore nocciola; terreno ad umidità medio scarsa.						7				
8		6,80		Argilla limosa di colore nocciola; terreno ad umidità medio scarsa.						8				
9		8,20		Argilla limosa a tratti debolmente sabbiosa di colore nocciola; terreno ad umidità medio scarsa.						9				
10		9,70		Sabbia limosa di colore nocciola scuro, livello con ciottoli a 10,80 m; terreno ad umidità elevata.						10				
11		11,10		Ghiaia (d max 7 cm) in matrice limo sabbiosa di colore nocciola; terreno ad umidità elevata.						11				
12										12				
13										13				
14										14				
15		15,10		Argilla limosa a struttura scagliosa di colore grigio; terreno ad umidità scarsa.						15				
16		16,00								16				
17										17				
18										18				
19										19				
20										20				

Allavamento acqua nel foro di sondaggio

DATA : 2014.07.22 QUOTA P.F. (QUOTA AZD): 000.00 QUOTA P.F. (QUOTA H2O):

21/07/14: 10:30 : 16,00 m : 11,80 m : 08:55 : 16,00 m : 12,00 m :

22/07/14: 07:25 : 16,00 m : 11,80 m : 08:55 : 16,00 m : 12,00 m :

posto in opera piezometro microfessurato 2,5" porzetto di metallo con lancetta

<b>GEO-PROBE</b> s.r.l. Indagini Geognostiche 40033 CASALECCHIO DI RENO (BO) Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072		Committente: <u>SicArchitettura</u>		Quota: <u>---</u>		Rap. Pr. N°14.0783/RSP	
		Località: <u>Sasso Marconi (BO)</u>		Profondità: <u>15.30 m</u>		Codice Lavori 013, 042	
		Carriere: <u>Ex Alta Wassemann</u>		Data Inizio: <u>22/10/2014</u>		SONDAGGIO	
		Perforazione: <u>Carotaggio Continuo diam. 101</u>		Data Fine: <u>23/10/2014</u>		FOGLIO	
		Attrezzatura: <u>Sonda Drill 830L</u>		Il geologo: <u>Dr. Contì</u>		<b>13</b> <b>1/1</b>	
Procedura di Prova IO_001		Rapporto di Prova N° 14.0783/RSP		Rev. 0		Data di emissione 23/10/2014	
				Lo Sperimentatore Dr. Ragazzi		Il Direttore di Laboratorio Dr. Contì	

Scala 1:50	Rivestimento	Profondità [m]	Stratigrafia	Descrizione stratigrafica	Percentuale Carotaggio	Campioni	Prof. SPT	N° colpi SPT	Tipo di punta	Scala 1:50	P. P. [kg/cmq]	V. T. [kg/cmq]	Piezometro Norton	Falda
1		2.10		Argilla limosa di colore bruno nocciola a tratti debolmente sabbiosa, rari ciottolini fino a 1.10 m; terreno ad umidità medio scarsa.						1				
2		2.50		Ghiaia in matrice limo argillosa di colore nocciola; terreno ad umidità media.						2				
3		2.90		Limo argilloso sabbioso di colore nocciola, abbondanti ciottolini; terreno ad umidità medio scarsa.						3				
4				Argilla limosa di colore nocciola, a tratti livelli sabbiosi, concrezioni calcaree; terreno ad umidità medio scarsa.						4				
5										5				
6		6.10		Limo sabbioso argilloso con ciottoli; terreno ad umidità media.						6				
7		6.50		Argilla limosa di colore nocciola con livelli limo sabbiosi; terreno ad umidità medio scarsa.						7				
8										8				
9										9				
10		9.40		Limo sabbioso di colore nocciola; terreno ad umidità media.						10				
11		9.50		Sabbia limosa di colore nocciola; terreno ad umidità elevata.						11				
12		10.20		Ghiaia in matrice sabbiosa di colore nocciola; terreno ad umidità da elevata alla totale saturazione idrica da 11.40 m.						12				
13										13				
14		13.90		Argilla limosa di colore da bruno nocciola a grigio; terreno ad umidità da medio scarsa a scarsa.						14				
15		15.30								15				
16										16				
17										17				
18										18				
19										19				
20										20				

Rilascio acqua nel foro di sondaggio

DATA: 12/10/14 15:20 | GMA IN: 10.40 m | QUOTA P.P.: 16:30 | QUOTA H2O: 15.40 m | QUOTA H2O: 15.40 m | QUOTA H2O: 15.40 m

12/10/14 15:20 | 10.40 m | 16:30 | 15.40 m | 15.40 m | 15.40 m

posto in opera piezometro microassurato 2.5°

permette di misurare con lucchetto

**Documentazione fotografica  
sondaggi a carotaggio continuo**

**Carotaggio 2 – Cassetta 1 (da 0,00 a 4,00 m)****Carotaggio 2 – Cassetta 2 (da 4,00 a 8,00 m)**



**Carotaggio 2 – Cassetta 3 (da 8,00 a 12,00 m)****Carotaggio 2 – Cassetta 4 (da 12,00 a 16,00 m)**

**Carotaggio 3 – Cassetta 1 (da 0,00 a 4,00 m)****Carotaggio 3 – Cassetta 2 (da 4,00 a 8,00 m)**

**Carotaggio 3 – Cassetta 3 (da 8,00 a 12,00 m)****Carotaggio 3 – Cassetta 4 (da 12,00 a 16,00 m)**



**Carotaggio 13 – Cassetta 1 (da 0,00 a 4,00 m)****Carotaggio 13 – Cassetta 2 (da 4,00 a 8,00 m)**

### Carotaggio 13 – Cassetta 3 (da 8,00 a 12,00 m)



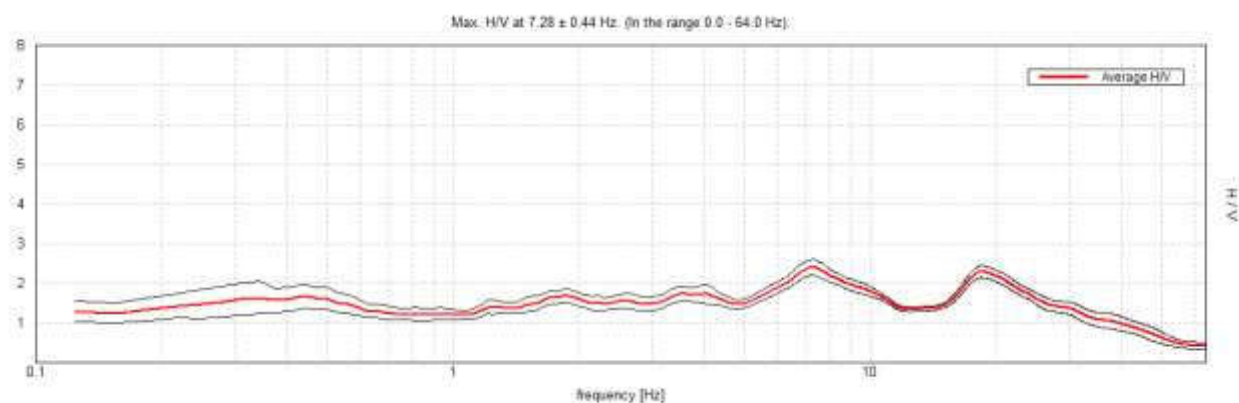
### Carotaggio 13 – Cassetta 4 (da 12,00 a 16,00 m)



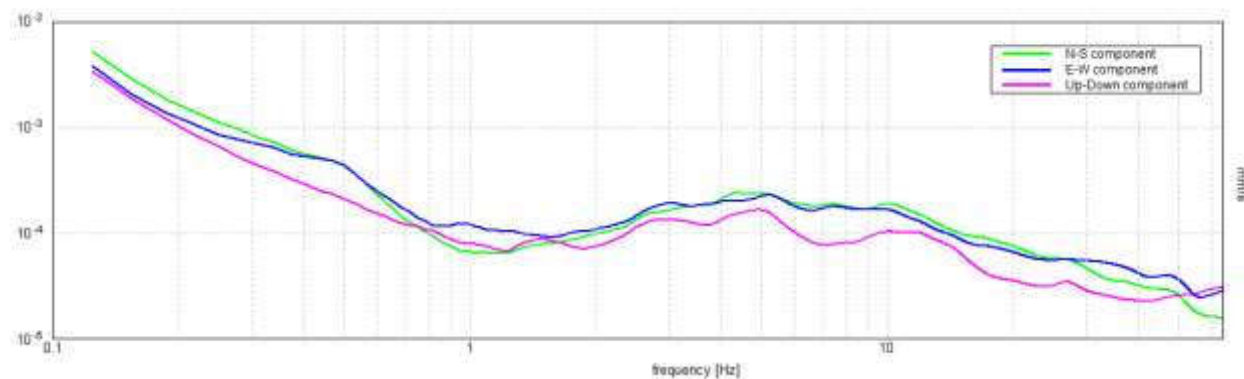
## **Indagine sismica HVSR**

Committente:	SicArchitetture	Data prova:	30/05/2013
Località:	Sasso Marconi (BO)	Ora inizio registrazione:	14:14:09
Cantiere:	ex stabilimento Alfa Wassermann	Ora fine registrazione:	14:34:09
Strumento:	TRZ-0184/01-12	Procedura di Prova:	
Note:	-	Frequenza di campionamento:	128 Hz

## RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

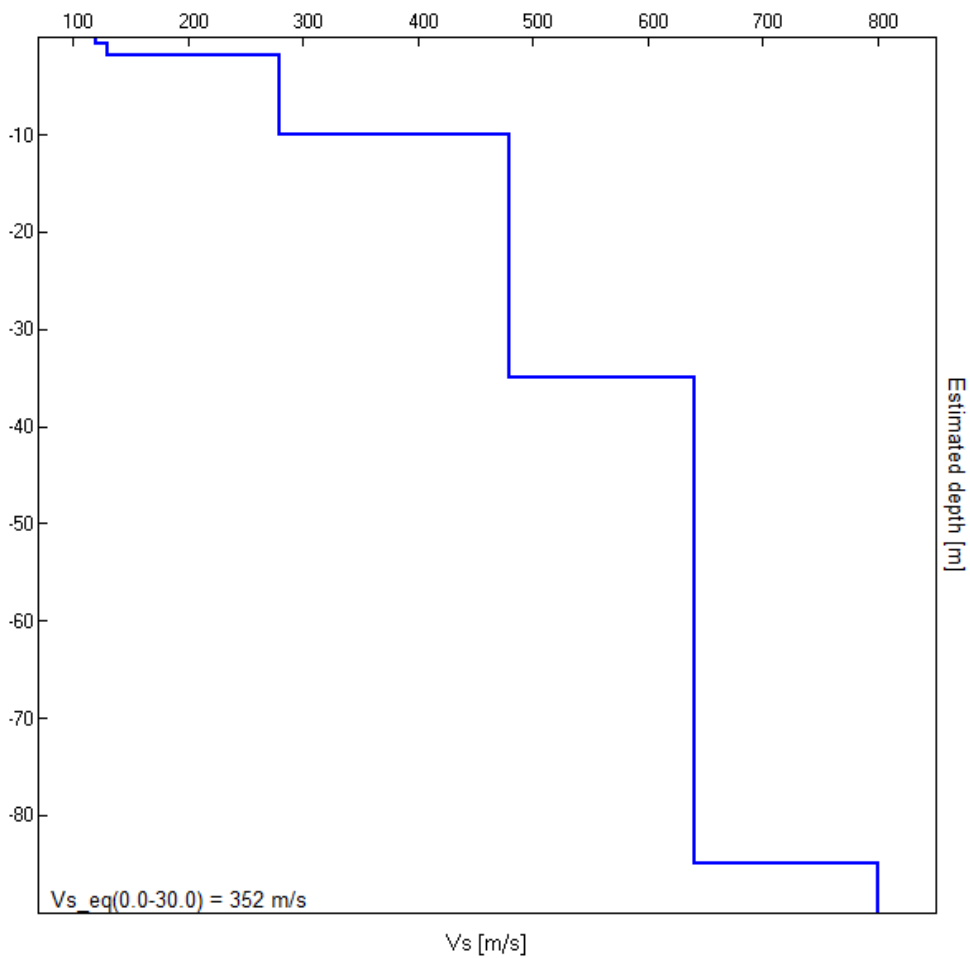


## SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
0.60	0.60	120
1.80	1.20	130
10.00	8.20	280
35.00	25.00	480
85.00	50.00	640
inf.	inf.	800

Vs\_eq(0.0-30.0)= 352 m/s

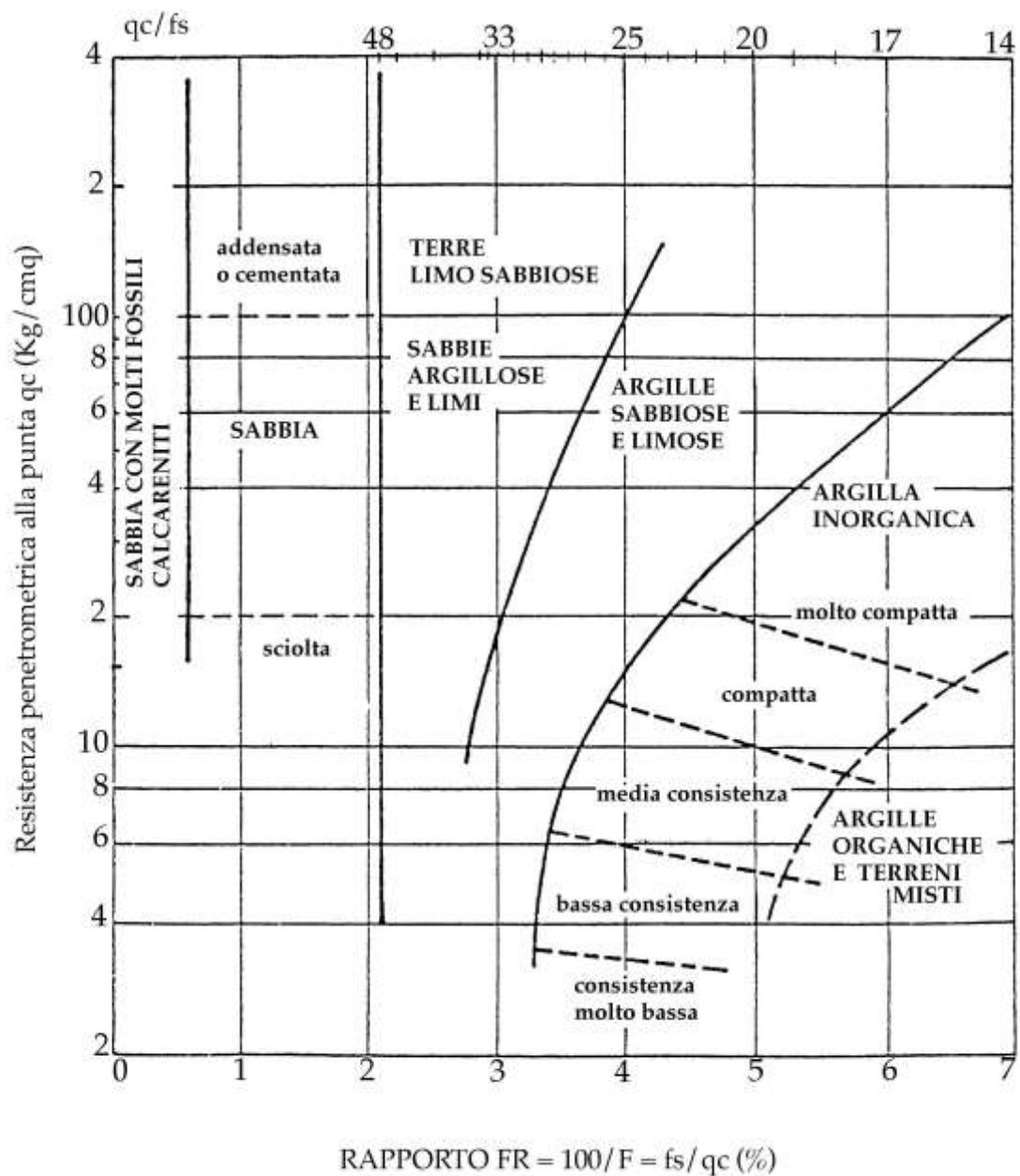


## **Classificazione orientativa dei terreni** (Schmertmann, 1978)



# CLASSIFICAZIONE ORIENTATIVA DEI TERRENI IN BASE AI DATI PENETROMETRICI STATICI $q_c$ E $f_s$

(Schmertmann, 1978)





SICarchitetture

ex stabilimento Alfa Wassermann - Sasso Marconi (BO)

CPT 1

13042001

Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m3	Gamma* kg/m3	Siama*V kg/cm2	CU kg/cm2	FI °	DR %	Mv cm2/Kg	K oriz Kg/cm3	Perm cm/sec
1.00		Argilla limosa	1936	1936	0.194	1.310	0	0	0.007634	2.6200	9.96e-004
1.60		Argilla compatta	1920	1920	0.309	0.850	0	0	0.024510	1.7000	5.48e-005
1.80		Argilla compatta	1928	1928	0.347	1.050	0	0	0.014881	2.1000	9.45e-005
2.00		Sabbia	1850	1850	0.384	0.000	41	87	0.006472	5.1500	2.01e-001
2.20		Limo argilloso	1935	1935	0.423	1.250	0	0	0.013333	1.6667	1.16e-002
2.80		Argilla compatta	1923	1923	0.539	0.917	0	0	0.020455	1.8333	1.72e-004
3.00		Argilla compatta	1926	1926	0.577	1.000	0	0	0.016667	2.0000	3.78e-004
7.60		Ghiaia	1917	1917	1.459	0.774	0	0	0.030829	1.5478	6.55e-005
8.00		Ghiaia	1850	1850	1.533	0.000	39	94	0.003670	13.6250	3.71e-001
8.20		Ghiaia	1850	1850	1.570	0.000	34	59	0.009901	5.0500	3.03e-001
8.60		Ghiaia	1850	1850	1.644	0.000	40	100	0.002833	17.6500	4.17e-001

SICarchitetture

ex stabilimento Alfa Wassermann - Sasso Marconi (BO)

CPT 2

13042002

Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m3	Gamma' kg/m3	Siama'V kg/cm2	CU kg/cm2	FI °	DR %	Mv cm2/Kg	K oriz Kg/cm3	Perm cm/sec
1.00	C	Argilla compatta	1916	1916	0.192	0.760	0	0	0.032250	1.5200	1.84e-005
1.20	C	Limo argilloso	1945	1945	0.231	1.650	0	0	0.010101	2.2000	2.53e-002
1.40	C	Argilla compatta	1924	1924	0.269	0.950	0	0	0.018797	1.9000	1.27e-004
	C	Argilla compatta	1932	1932	0.385	1.167	0	0	0.011688	2.3333	2.34e-004
2.00	C	Argilla compatta	1922	1922	0.423	0.900	0	0	0.021368	1.8000	3.75e-005
2.20	C	Sabbia	1850	1850	0.460	0.000	36	55	0.014493	2.3000	4.37e-002
2.40	C	Argilla compatta	1922	1922	0.576	0.900	0	0	0.021368	1.8000	2.34e-004
3.00	C	Argilla compatta	1928	1928	0.614	1.050	0	0	0.014881	2.1000	9.20e-004
3.20	C	Sabbia	1850	1850	0.651	0.000	34	47	0.015152	2.2000	4.94e-002
3.40	C	Argilla compatta	1932	1932	0.729	1.175	0	0	0.011501	2.3500	4.29e-004
3.80	C	Sabbia	1850	1850	0.803	0.000	36	65	0.008032	4.1500	8.02e-002
4.20	C	Sabbia sciolta	1800	1800	0.839	0.000	32	29	0.016667	1.5000	5.38e-002
4.40	C	Argilla organica/t.	1913	1913	0.877	0.700	0	0	0.014286	2.8000	7.45e-006
4.60	C	Sabbia sciolta	1800	1800	0.913	0.000	31	25	0.017857	1.4000	6.23e-002
4.80	C	Argilla organica/t.	1904	1904	0.951	0.550	0	0	0.018182	2.2000	2.64e-005
5.00	C	Ghiaia	1850	1850	0.988	0.000	37	73	0.008096	5.7500	3.17e-001
5.20	C	Ghiaia	1850	1850	1.025	0.000	41	100	0.003650	13.7000	3.81e-001
5.40	C	Ghiaia	1850	1850	1.062	0.000	37	70	0.008929	5.6000	3.08e-001
5.60	C	Sabbia sciolta	1800	1800	1.098	0.000	31	25	0.016129	1.5500	4.06e-002
5.80	C	Argilla media									
	D		1910	1910	1.556	0.650	0	0	0.015385	1.3000	2.48e-004
8.20											
8.40	B	Ghiaia	1850	1850	1.593	0.000	37	78	0.005714	8.7500	3.44e-001
8.60	B	Ghiaia	1850	1850	1.667	0.000	39	97	0.003236	15.4500	3.75e-001
8.80	B	Sabbia	1850	1850	1.704	0.000	33	49	0.008439	3.9500	1.06e-001
9.00	B	Sabbia	1850	1850	1.778	0.000	34	60	0.006033	5.5250	2.72e-001
9.40	B	Ghiaia	1850	1850	1.852	0.000	40	100	0.002770	18.0500	4.39e-001
9.80	B										

SICarchitetture

ex stabilimento Alfa Wassermann - Sasso Marconi (BO)

CPT 6

13042006

Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m3	Gamma* kg/m3	Siama'V kg/cm2	CU kg/cm2	FI °	DR %	Mv cm2/Kg	K orizz Kg/cm3	Perm cm/sec
0.80		Argilla organica/t. misti	1881	1881	0.150	0.300	0	0	0.022222	1.2000	2.71e-005
1.00		Argilla organica/t.	1900	1900	0.189	0.500	0	0	0.018182	2.0000	7.97e-006
1.20		Argilla compatta	1926	1926	0.227	1.000	0	0	0.016667	2.0000	2.00e-004
1.80		Argilla compatta	1922	1922	0.342	0.900	0	0	0.021368	1.8000	9.79e-005
2.40		Sabbia	1850	1850	0.453	0.000	39	75	0.008299	4.0167	4.61e-002
2.60		Sabbia	1850	1850	0.490	0.000	37	59	0.012346	2.7000	5.78e-002
2.80		Argilla limosa	1944	1944	0.529	1.600	0	0	0.006250	3.2000	3.00e-004
3.20		Argilla molto compatta	1931	1931	0.606	1.125	0	0	0.012698	2.2500	1.31e-004
3.40		Sabbia	1850	1850	0.643	0.000	35	50	0.013889	2.4000	4.04e-002
4.20		Argilla molto compatta	1931	1931	0.798	1.138	0	0	0.012382	2.2750	2.53e-005
4.20	FALDA	Argilla molto compatta	1928	928	0.891	1.050	0	0	0.014881	2.1000	1.43e-005
5.20		Argilla compatta	1916	916	1.001	0.758	0	0	0.032427	1.5167	2.30e-005
6.40		Argilla compatta	1928	928	1.056	1.050	0	0	0.014881	2.1000	2.67e-005
7.00		Argilla compatta	1918	918	1.167	0.792	0	0	0.029150	1.5833	3.90e-005
8.20		Ghiaia	1850	850	1.218	0.000	42	100	0.002836	17.6333	3.96e-001
8.80											

SICarchitettura

ex stabilimento Alfa Wassermann - Sasso Marconi (BO)

CPT 7

13042007

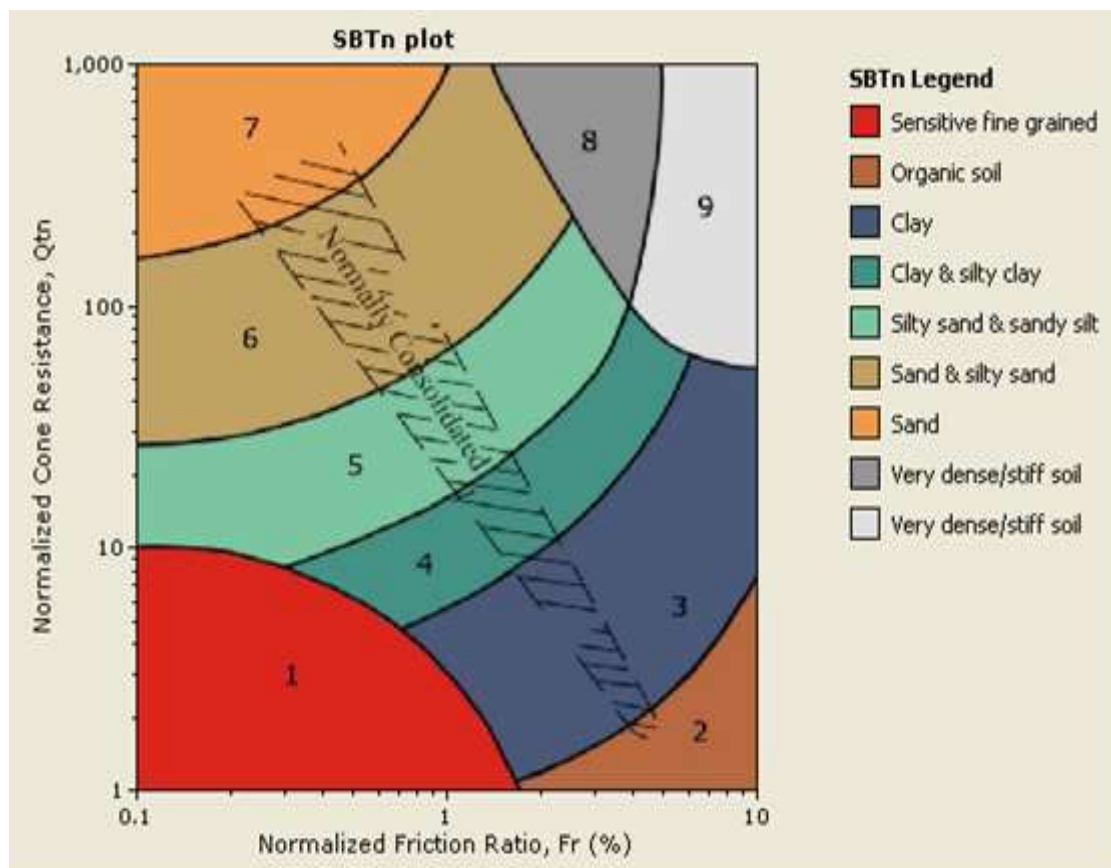
Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m3	Gamma* kg/m3	Sioma*V kg/cm2	CU kg/cm2	FI °	DR %	Mv cm2/Kg	K orizz Kg/cm3	Perm cm/sec
0.40		Argilla organica/t. misti	1884	1884	0.075	0.325	0	0	0.021220	1.3000	6.90e-005
		Argilla compatta									
			1917	1917	0.459	0.775	0	0	0.030722	1.5500	8.47e-005
2.40											
2.60	FALDA	Sabbia	1850	850	0.476	0.000	37	63	0.011494	2.9000	8.37e-002
		Argilla media	1914	914	0.512	0.725	0	0	0.013793	1.4500	2.61e-004
3.00											
3.20		Argilla limosa	1928	928	0.531	1.050	0	0	0.009524	2.1000	4.69e-003
		Argilla compatta									
			1909	909	0.749	0.633	0	0	0.039474	1.2667	1.20e-004
5.60											
5.80		Argilla compatta	1926	926	0.768	1.000	0	0	0.016667	2.0000	3.78e-004
		Argilla compatta	1918	918	0.804	0.800	0	0	0.028409	1.6000	3.52e-005
6.20											
6.60		Limo argilloso	1940	940	0.842	1.425	0	0	0.011696	1.9000	6.25e-003
6.80		Ghiaia	1850	850	0.859	0.000	40	89	0.005780	8.6500	2.98e-001
		Ghiaia									
7.60			1850	850	0.927	0.000	43	100	0.003103	16.1125	4.18e-001

## **Classificazione orientativa dei terreni** *(Robertson, 1990)*



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

(Robertson, 1990)





2023.070/RG

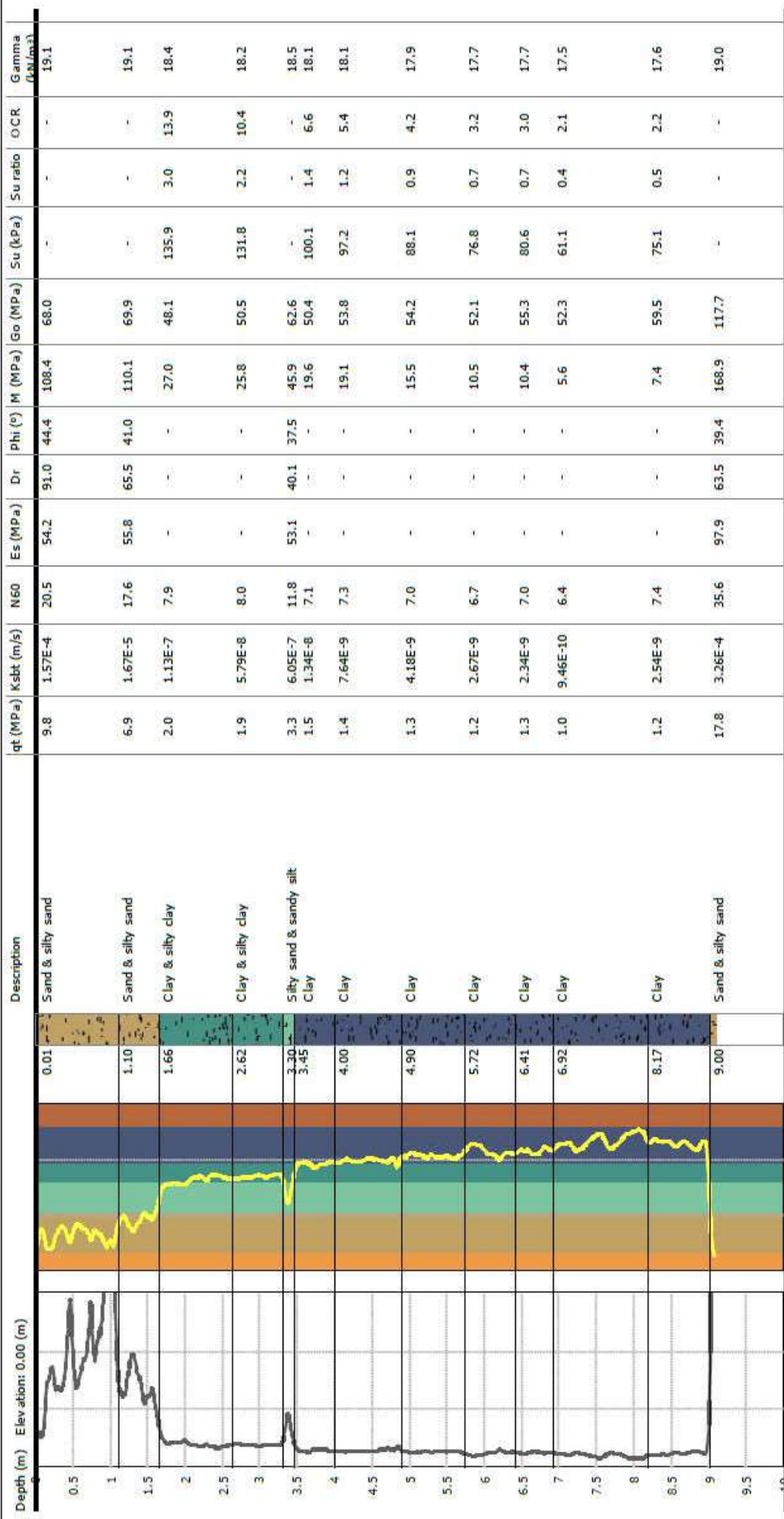


**GEOLOGISMIKI**  
Geotechnical Software

**Geo-Probe S.r.l.**  
Indagini Geognostiche  
40033 Casalecchio di Reno (BO)  
Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072

Project: Galileo Ingegneria  
Location: Sasso Marconi (BO) - ex Alfa Wasserman

**CPTU: 1 23.0462/RSP**  
Total depth: 9.08 m, Date: 25/09/2023  
Cone Type: MK387  
Cone Operator: Dr. Conti



2023.070/RG

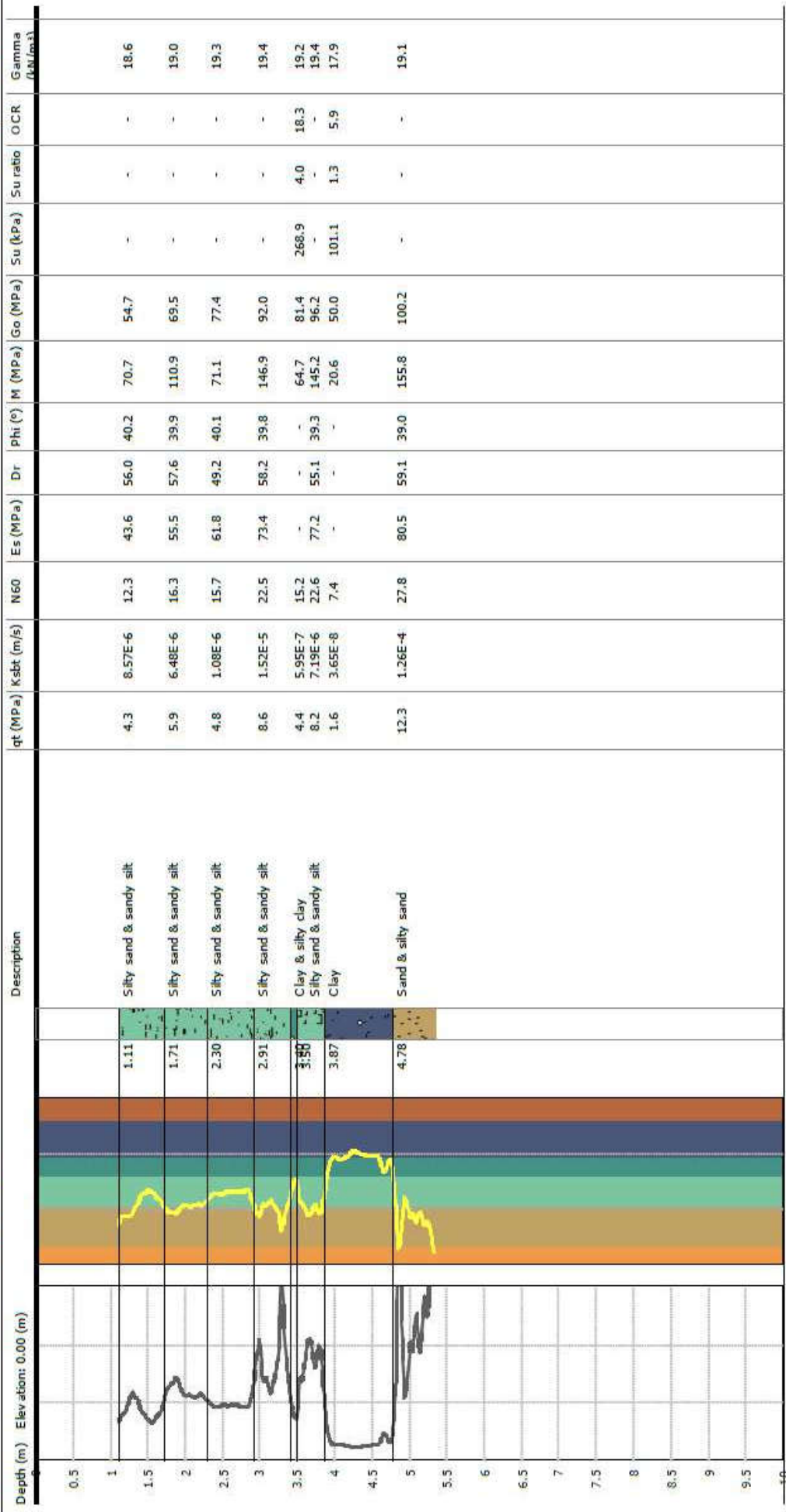


**GEOLOGISMIKI**  
Geotechnical Software

Geo-Probe S.r.l.  
Indagini Geonostiche  
40033 Casalecchio di Reno (BO)  
Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072

Project: Galileo Ingegneria  
Location: Sasso Marconi (BO) - ex Alfa Wasserman

CPTU: 2 23.0464/RSP  
Total depth: 5.34 m, Date: 25/09/2023  
Cone Type: MK3387  
Cone Operator: Dr. Conti



0 5 10 15 20 25 30 35 40  
Tip resistance (MPa)

Ic

2023.070/RG

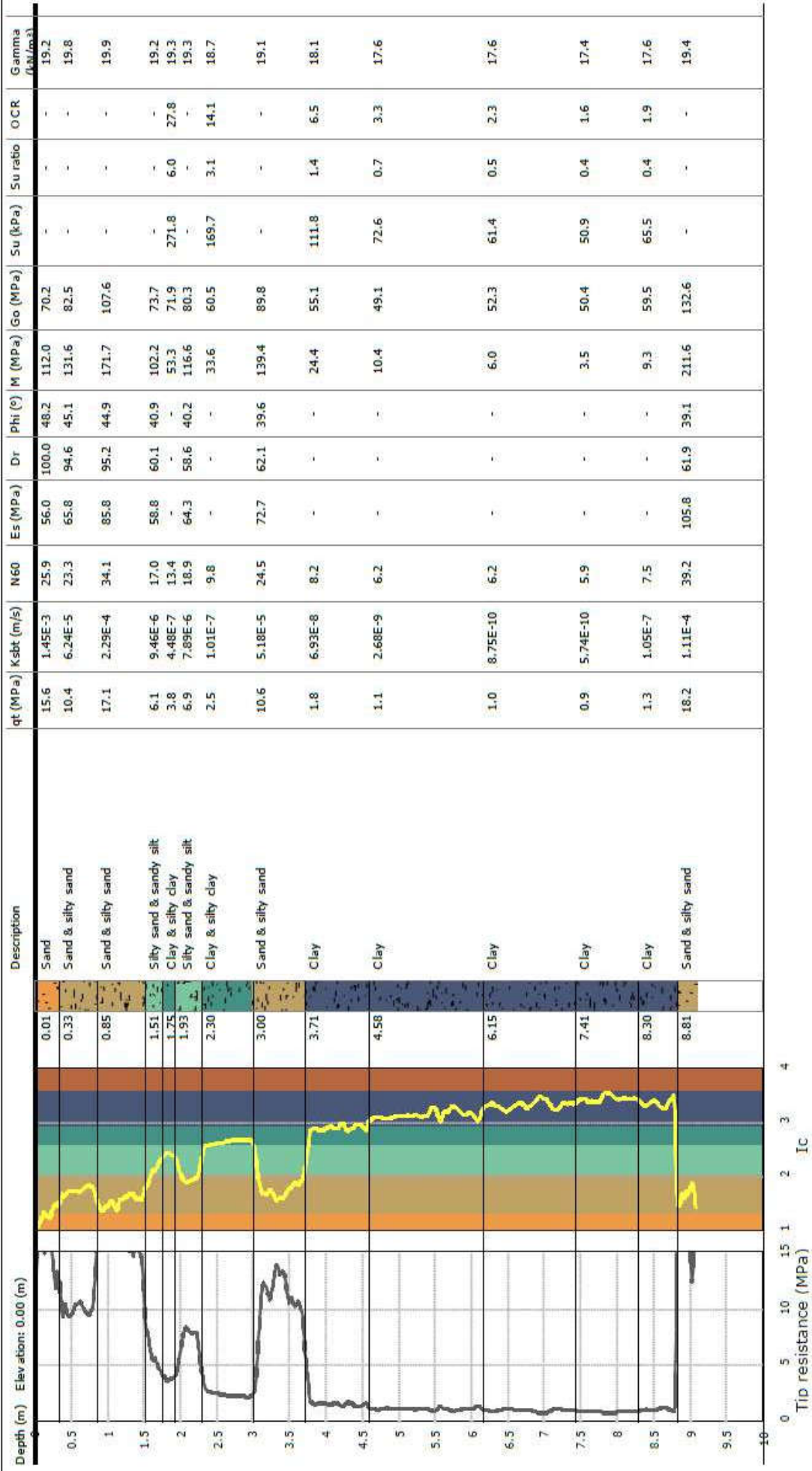


**GEOLOGISMIKI**  
Geotechnical Software

**Geo-Probe S.r.l.**  
Indagini Geognostiche  
40033 Casalecchio di Reno (BO)  
Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072

Project: Galileo Ingegneria  
Location: Sasso Marconi (BO) - ex Alfa Wasserman

CPTU: 3 23.0465/RSP  
Total depth: 9,08 m, Date: 25/09/2023  
Cone Type: MKJ387  
Cone Operator: Dr. Conti





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/m<sup>3</sup>) ::**

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

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<sub>SPT</sub> (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,  $D_r$  (%) ::**

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

**:: State Parameter,  $\psi$  ::**

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

**:: Peak drained friction angle,  $\phi$  (°) ::**

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

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 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<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

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

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

**:: 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<sub>n</sub>: 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<sub>n</sub>: 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<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Effective Stress Friction Angle,  $\phi'$  (°) ::**

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

(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., 5<sup>th</sup> 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

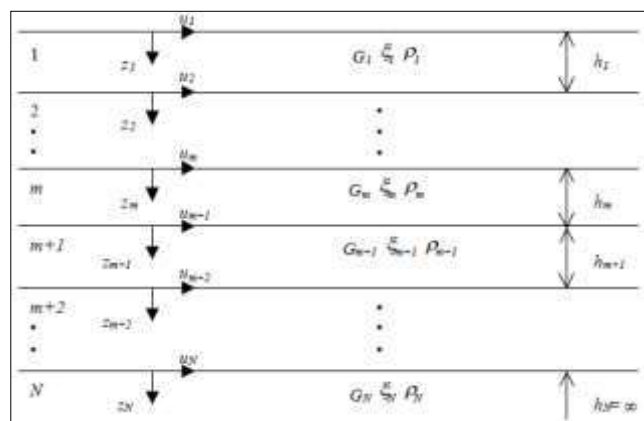
$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

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

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





$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove:  $u$  rappresenta lo spostamento;  $t$  il tempo;  $\rho$  la densità;  $G$  il modulo di deformazione al taglio;  $\mu$  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  $\omega$  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  $\xi$  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  $E$  ed  $F$  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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dove  $\alpha_m^*$  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,

$$\tau_1(0, t) = i k_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

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

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

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  $\gamma$  alla profondità  $z$  e al tempo  $t$  è definita dalla relazione:

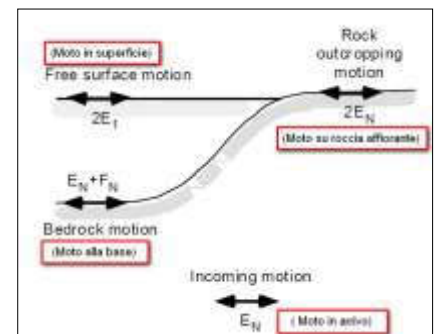
$$\gamma(z, t) = \frac{\delta u}{\delta z} = i k^* (E e^{i k^* z} - F e^{-i k^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

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  $\gamma$ . 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  $\gamma$ . 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  $\rho$  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  $\xi$ , 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  $\xi$  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 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

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