



## COMUNE DI SAN PIETRO IN CASALE (BO)

INTEGRAZIONE ALLO STUDIO GEOLOGICO  
- TECNICO DEI TERRENI DEL PRIMO  
SOTTOSUOLO DI UN'AREA SITA IN VIA  
SAN BENEDETTO, OGGETTO DI PIANO  
URBANISTICO ATTUATIVO – AMBITO 3C.

Committente:

– Arch. Stellato



Codice Lavoro: 2012.036A/RG

Revisione 0.0      Aprile 2019

# 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. DEFINIZIONE DELLA RSL MEDIANTE ANALISI NUMERICA .....	4
3.1 Parametri del sito .....	4
3.2 Dati generali .....	4
3.3 Elaborazione .....	6
4. RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI .....	14
5 VALUTAZIONE INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE .....	17

*ALLEGATI:*

- *procedure di calcolo;*
- *verifiche rischio di liquefazione*

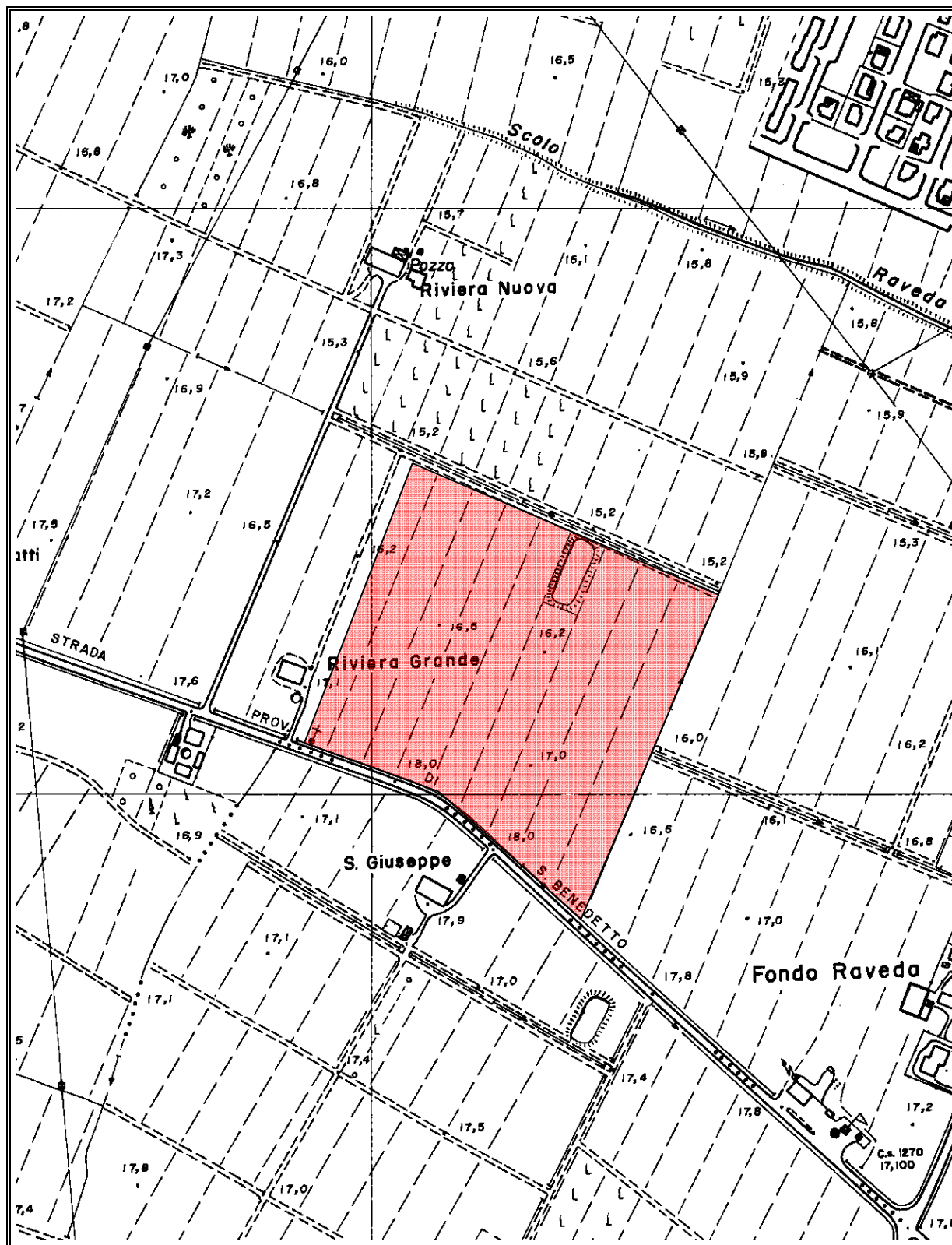
\* \* \*

## 1. PREMESSA


A seguito delle richieste di integrazione della Città Metropolitana di Bologna – Area Pianificazione Territoriale si trasmette, in conformità con le normative vigenti, la seguente integrazione alla relazione geologico-tecnica prodotta nel Marzo 2018, riguardante la risposta sismica locale e la verifica di liquefazione di un'area oggetto di Piano Urbanistico Attuativo.

L'area in esame si ubica in via San Benedetto, in Comune di San Pietro in Casale (BO) (TAV. 1: estratto C.T.R. Scala 1:5.000; elemento n. 203091 –San Pietro in Casale Sud) ed interessa l'Ambito 3C

TAV. 1 - UBICAZIONE AREA IN ESAME



Scala 1:5.000

 Area in esame

## 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.
- Delibera della Giunta della Regione Emilia Romagna progr. N. 2193/2015 del 21 dicembre 2015.
- "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.

### 3. DEFINIZIONE DELLA RSL MEDIANTE ANALISI NUMERICA

#### 3.1 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).

L'analisi numerica della Risposta Sismica Locale (RSL) viene eseguita mediante il codice di calcolo RSL III di Geostru S.r.l.

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

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

#### 3.2 Dati generali

La definizione del modello geotecnico del sottosuolo è stata fatta sulla base di 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.

Il bedrock sismico è stato impostato alla profondità di 120-140 m dal p.c. in corrispondenza del complesso di strati pelitici e sabbioso ghiaiosi denominato nella Cartografia Regionale "Fossolo" a cui si è attribuita una velocità di 650 m/s e ritenuta una scelta più cautelativa in quanto per profondità superiori a 100,0 m l'analisi di RSL/1D tende a sottostimare l'azione sismica a causa della prevalenza dei fenomeni dissipativi su quelli amplificativi.

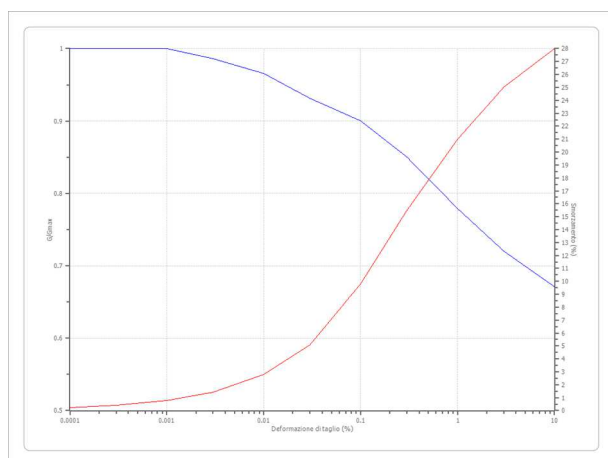
### Stratigrafia

n.	Prof.tà [m]	Spess. [m]	Terreno	Gmax [MPa]	$\gamma$ . [kN/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	1.5	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	32.73	19.0	130.0	6.9
2	1.5	6.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	48.28	18.5	160.0	69.3
3	7.5	50.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	63.08	19.1	180.0	357.0
4	57.5	70.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	241.00	19.3	350.0	921.4
5	127.5	oo	EPRI Rock (1993) 76,50-152,40 metri	904.43	21.0	650.0	1253.6

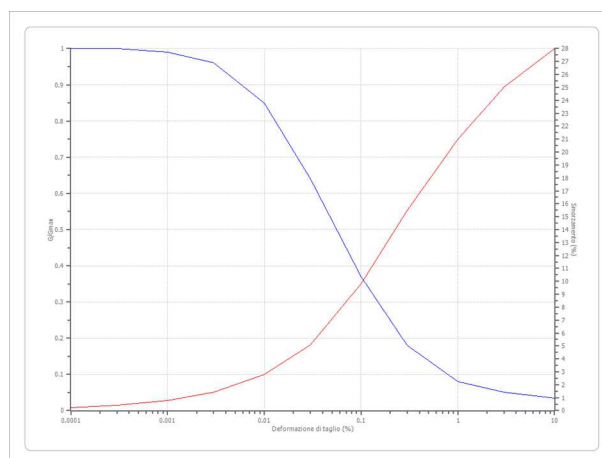
Strato con falda: 2 Strato rilevamento accelerogramma: 5 *Bedrock* – Affiorante (*outcrop*)

Ai singoli strati sono state applicate le seguenti curve di smorzamento:

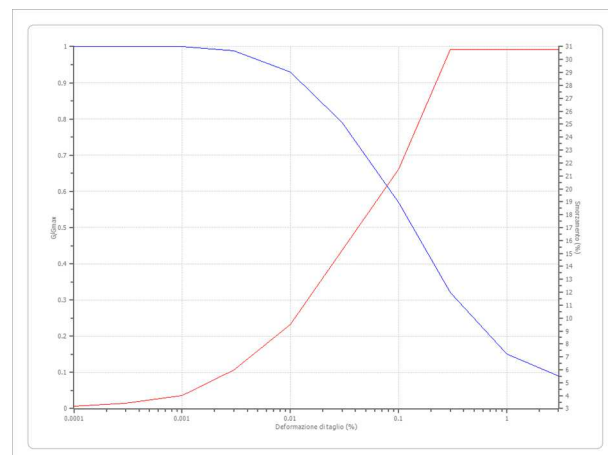
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)



Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)



EPRI Rock (1993) 76,50-152,40 metri



### 3.3 Elaborazione

Per produrre una simulazione di terremoto si è proceduto a calcolare il moto atteso in superficie a partire dai tre segnali di riferimento relativi ad un sito in roccia (A) forniti dalla regione Emilia Romagna e identificati dalle sigle 046, 126 e 354; il moto sismico per un periodo di ritorno di 475 anni in termini di accelerogrammi relativi al sito analizzato è ottenuto moltiplicando le accelerazioni normalizzate dei segnali di riferimento per il valore di  $a_{refg}$  ottenuto da una griglia elaborata da INGV e fornita dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna; per il sito in esame è stato utilizzato il valore del punto della griglia più prossimo all'area in esame per il quale  $a_{refg} = 0,158g$ .



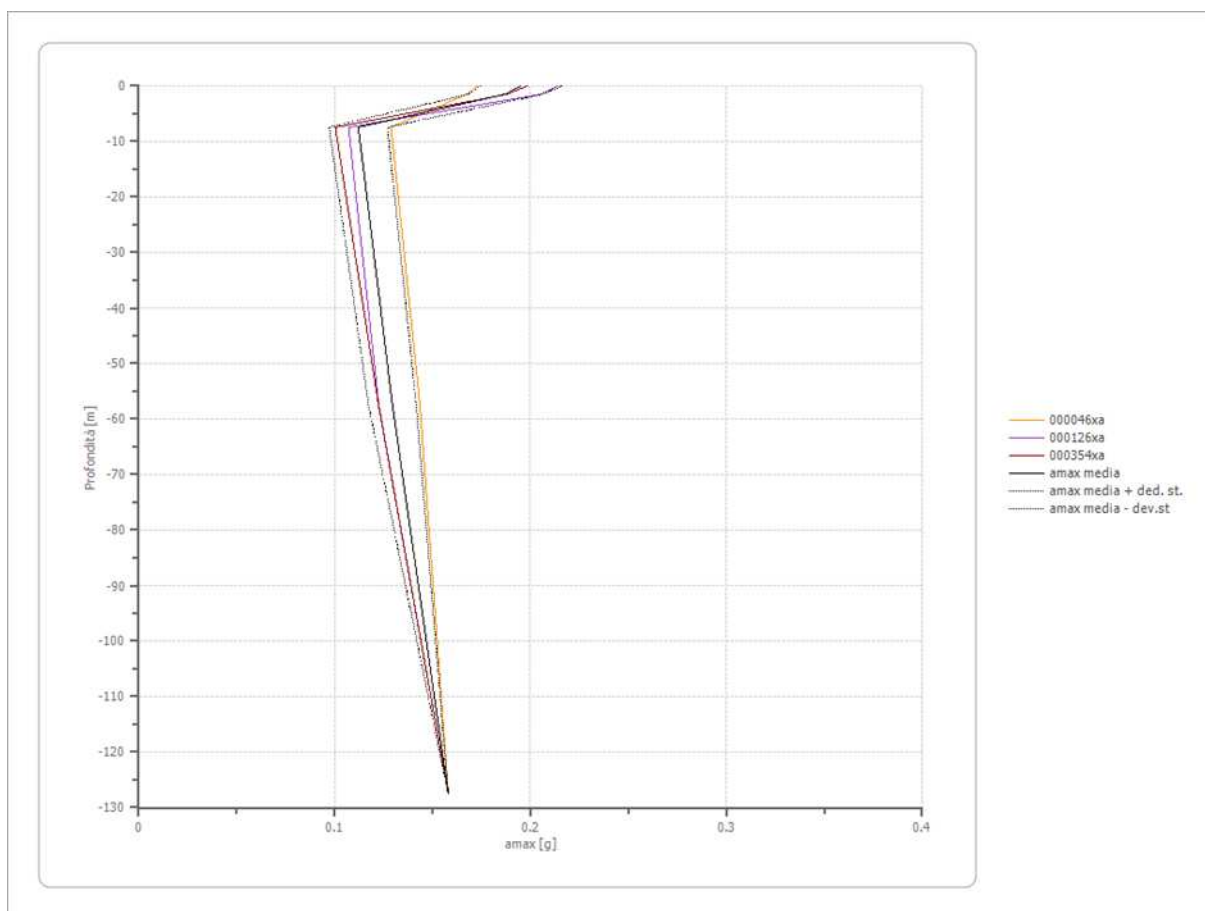
Le impostazioni di analisi adottate sono le seguenti.

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

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

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

Profondità	0.0 [m]	1.5 [m]	7.5 [m]	57.5 [m]	127.5 [m]	--
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	--
Accelerogramma	$P_{ga}$				$P_{ga0}$	$P_{ga}/P_{ga0}$
046 [g]	0.173	0.168	0.129	0.144	0.158	1.09
0126 [g]	0.214	0.206	0.107	0.123	0.158	1.35
0354 [g]	0.199	0.188	0.100	0.122	0.158	1.26
<b>Valore medio</b>	0.195	0.187	0.112	0.130	0.158	<b>1.23</b>



## SLV

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.150	[s]
Tvi	0.700	[s]
Tao	0.280	[s]
Tvo	0.740	[s]
Sami	3.499	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.187	[m/s]
Samo	4.673	[m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.295	[m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.335</b>	<b>[-]</b>
<b>Fv</b>	<b>1.583</b>	<b>[-]</b>
TB	0.136	[s]
TC	0.408	[s]
TD	2.232	[s]
SA(0)	0.238	[g]
SA(TB)	0.615	[g]

Fattori di amplificazione su intensità spettrale

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	FA Housner
0.100	0.500	1.4
0.500	1.000	1.6
0.500	1.500	1.7
0.100	2.500	1.7

Spettro di accelerazione medio SLV

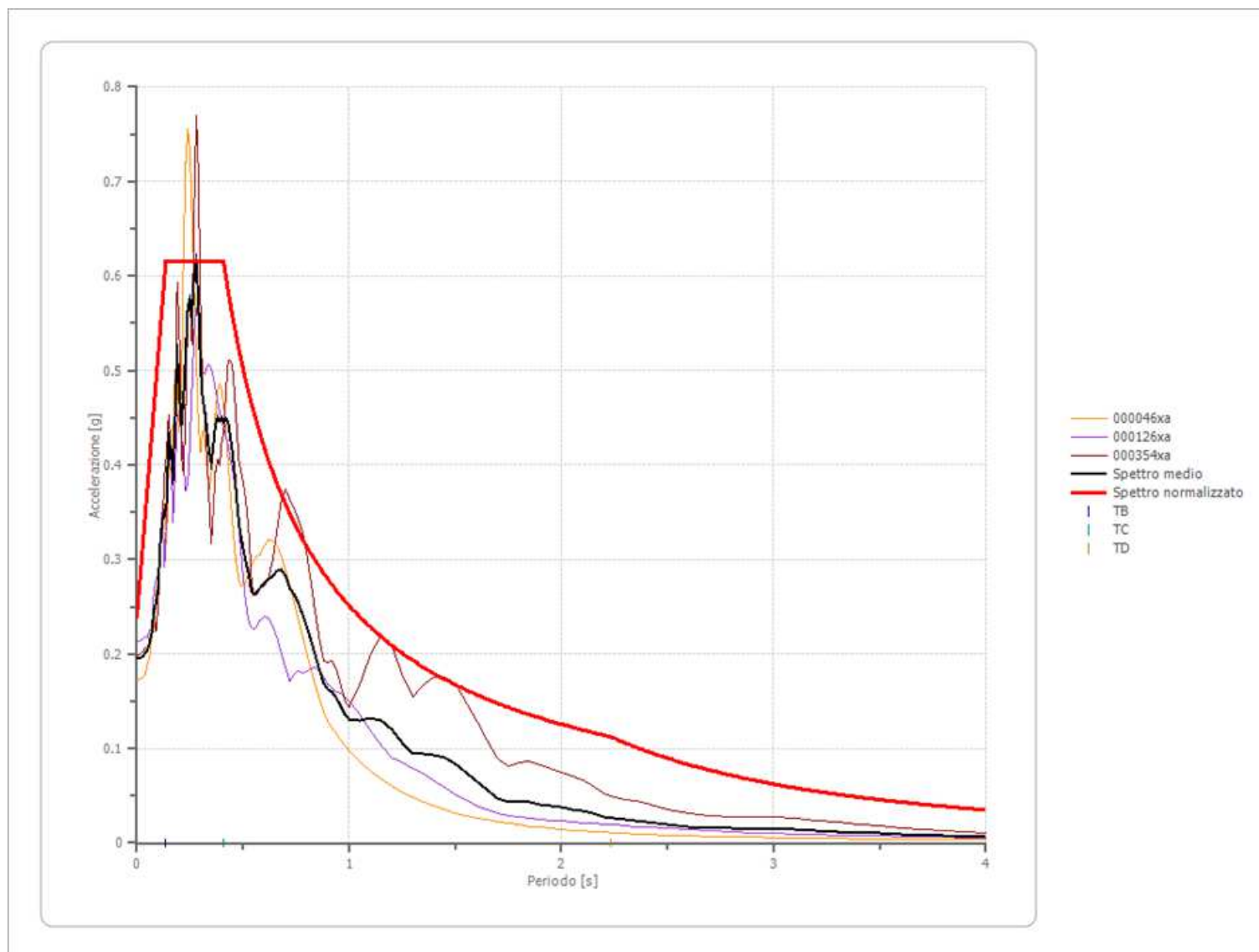
Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.1950	0.26	0.5593	0.52	0.2913	0.98	0.1362	2.25	0.0260
0.01	0.1950	0.27	0.6011	0.53	0.2801	1.00	0.1308	2.30	0.0248
0.02	0.1961	0.28	0.6153	0.54	0.2661	1.05	0.1302	2.35	0.0239
0.03	0.1979	0.29	0.5705	0.55	0.2627	1.10	0.1317	2.40	0.0227
0.04	0.2010	0.30	0.5028	0.56	0.2640	1.15	0.1302	2.50	0.0198
0.05	0.2044	0.31	0.4695	0.57	0.2669	1.20	0.1198	2.60	0.0176
0.06	0.2116	0.32	0.4576	0.58	0.2696	1.25	0.1057	2.70	0.0162
0.07	0.2220	0.33	0.4377	0.60	0.2756	1.30	0.0938	2.80	0.0154
0.08	0.2459	0.34	0.4153	0.62	0.2795	1.35	0.0943	2.90	0.0147
0.09	0.2546	0.35	0.4016	0.64	0.2831	1.40	0.0934	3.00	0.0147
0.10	0.2703	0.36	0.4198	0.66	0.2875	1.45	0.0899	3.10	0.0137
0.11	0.3160	0.37	0.4423	0.68	0.2889	1.50	0.0839	3.20	0.0127
0.12	0.3421	0.38	0.4509	0.70	0.2834	1.55	0.0747	3.30	0.0118
0.13	0.3465	0.39	0.4470	0.72	0.2695	1.60	0.0652	3.40	0.0109
0.14	0.3594	0.40	0.4501	0.74	0.2626	1.65	0.0562	3.50	0.0100
0.15	0.4285	0.41	0.4449	0.76	0.2536	1.70	0.0477	3.60	0.0091
0.16	0.4121	0.42	0.4485	0.78	0.2426	1.75	0.0435	3.70	0.0083
0.17	0.3896	0.43	0.4449	0.80	0.2298	1.80	0.0438	3.80	0.0076
0.18	0.4469	0.44	0.4292	0.82	0.2150	1.85	0.0432	3.90	0.0070
0.19	0.5164	0.45	0.4139	0.84	0.1994	1.90	0.0411	4.00	0.0064
0.20	0.4796	0.46	0.3912	0.86	0.1838	1.95	0.0391		
0.21	0.4428	0.47	0.3651	0.88	0.1691	2.00	0.0376		
0.22	0.4720	0.48	0.3396	0.90	0.1623	2.05	0.0356		
0.23	0.5192	0.49	0.3251	0.92	0.1596	2.10	0.0335		
0.24	0.5684	0.50	0.3125	0.94	0.1531	2.15	0.0311		
0.25	0.5757	0.51	0.3013	0.96	0.1448	2.20	0.0280		

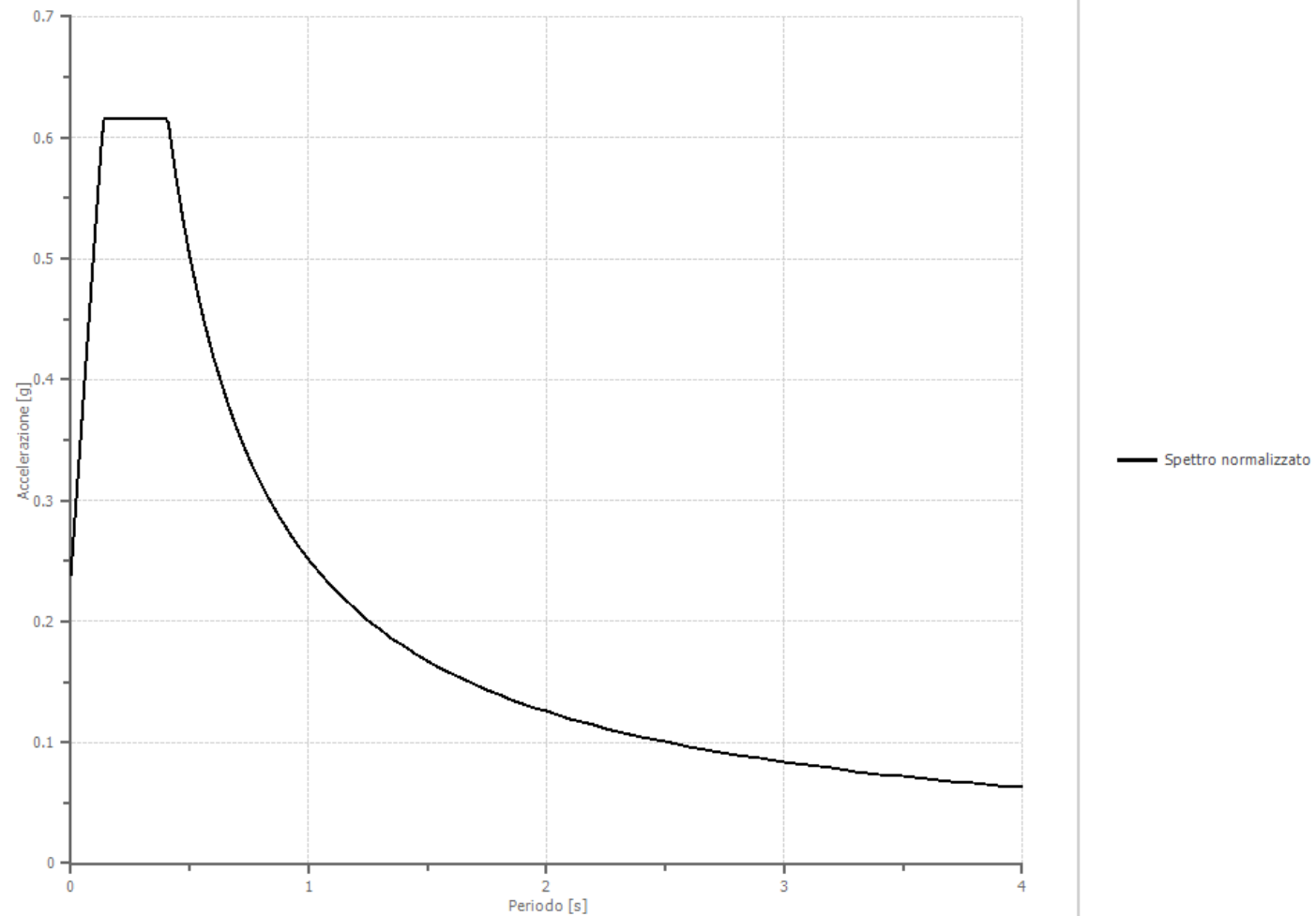
Spettro normalizzato SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2379	0.26	0.6153	0.52	0.4829	0.98	0.2563	2.25	0.1116
0.01	0.2656	0.27	0.6153	0.53	0.4738	1.00	0.2511	2.30	0.1092
0.02	0.2934	0.28	0.6153	0.54	0.4651	1.05	0.2392	2.35	0.1069
0.03	0.3211	0.29	0.6153	0.55	0.4566	1.10	0.2283	2.40	0.1046
0.04	0.3488	0.30	0.6153	0.56	0.4484	1.15	0.2184	2.50	0.1005
0.05	0.3766	0.31	0.6153	0.57	0.4406	1.20	0.2093	2.60	0.0966
0.06	0.4043	0.32	0.6153	0.58	0.4330	1.25	0.2009	2.70	0.0930
0.07	0.4321	0.33	0.6153	0.60	0.4186	1.30	0.1932	2.80	0.0897
0.08	0.4598	0.34	0.6153	0.62	0.4051	1.35	0.1860	2.90	0.0866
0.09	0.4876	0.35	0.6153	0.64	0.3924	1.40	0.1794	3.00	0.0837
0.10	0.5153	0.36	0.6153	0.66	0.3805	1.45	0.1732	3.10	0.0810
0.11	0.5431	0.37	0.6153	0.68	0.3693	1.50	0.1674	3.20	0.0785
0.12	0.5708	0.38	0.6153	0.70	0.3588	1.55	0.1620	3.30	0.0761
0.13	0.5986	0.39	0.6153	0.72	0.3488	1.60	0.1570	3.40	0.0739
0.14	0.6153	0.40	0.6153	0.74	0.3394	1.65	0.1522	3.50	0.0718
0.15	0.6153	0.41	0.6125	0.76	0.3304	1.70	0.1477	3.60	0.0698
0.16	0.6153	0.42	0.5979	0.78	0.3220	1.75	0.1435	3.70	0.0679
0.17	0.6153	0.43	0.5840	0.80	0.3139	1.80	0.1395	3.80	0.0661
0.18	0.6153	0.44	0.5708	0.82	0.3063	1.85	0.1357	3.90	0.0644
0.19	0.6153	0.45	0.5581	0.84	0.2990	1.90	0.1322	4.00	0.0628
0.20	0.6153	0.46	0.5459	0.86	0.2920	1.95	0.1288		
0.21	0.6153	0.47	0.5343	0.88	0.2854	2.00	0.1256		
0.22	0.6153	0.48	0.5232	0.90	0.2790	2.05	0.1225		
0.23	0.6153	0.49	0.5125	0.92	0.2730	2.10	0.1196		
0.24	0.6153	0.50	0.5023	0.94	0.2672	2.15	0.1168		
0.25	0.6153	0.51	0.4924	0.96	0.2616	2.20	0.1142		

Parametri spettro normalizzato SLV

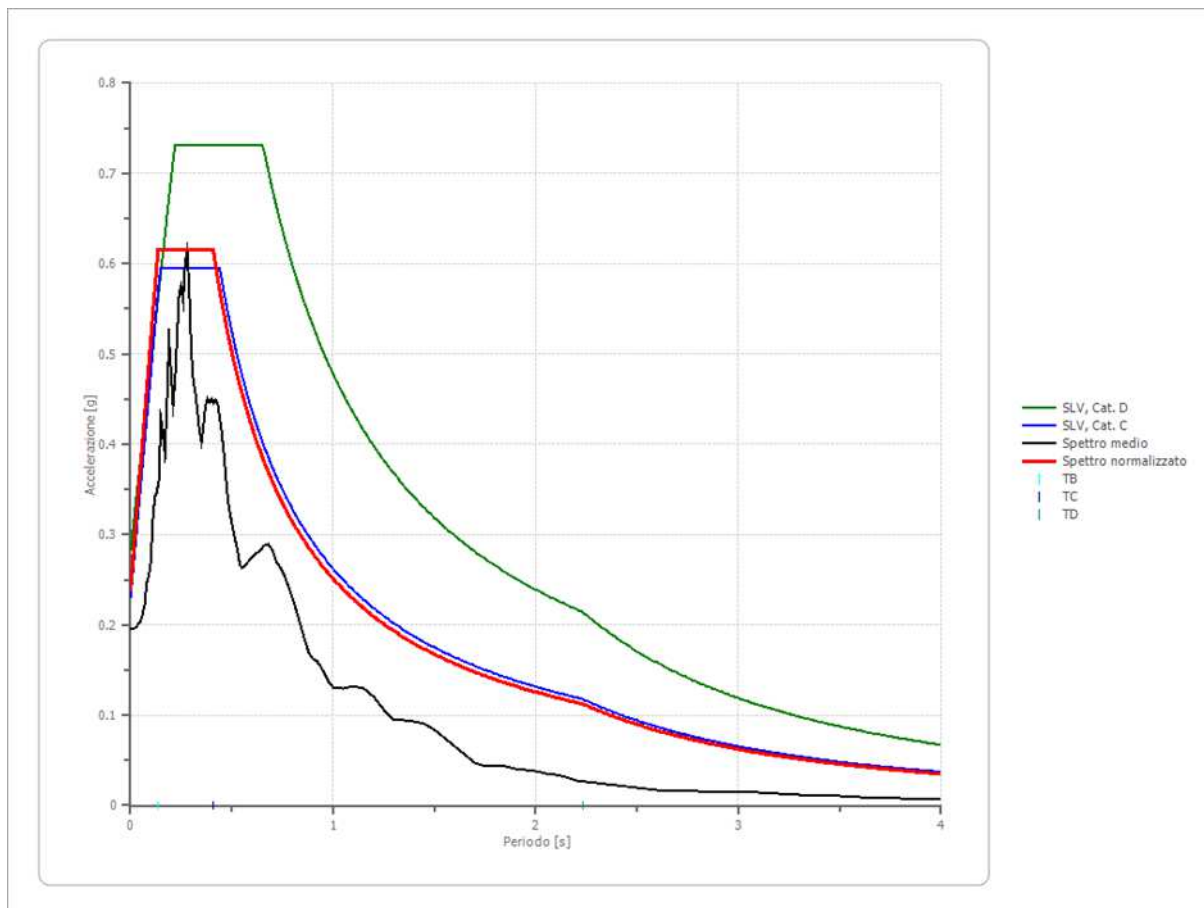
Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.238	2.587	--	0.136	0.408	2.232	0.238	615

**Confronto tra spettri elaborati, spettro medio e spettro normalizzato SLV**

**Spettro normalizzato SLV**

### Confronto con gli spettri di normativa per un suolo di categoria A e B

Gli spettri normalizzati (in rosso), ricavati dall'analisi numerica, sono stati messi a confronto con gli spettri desumibili dall'analisi secondo la procedura semplificata (§ 3.2.2. NTC18) per un sottosuolo di categoria D-T1 (in verde) e C-T1 (in blu).



Dal confronto risulta evidente come la RSL restituisce uno spettro normalizzato meno severo rispetto allo spettro di normativa per un suolo di categoria D.

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

#### 4. RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

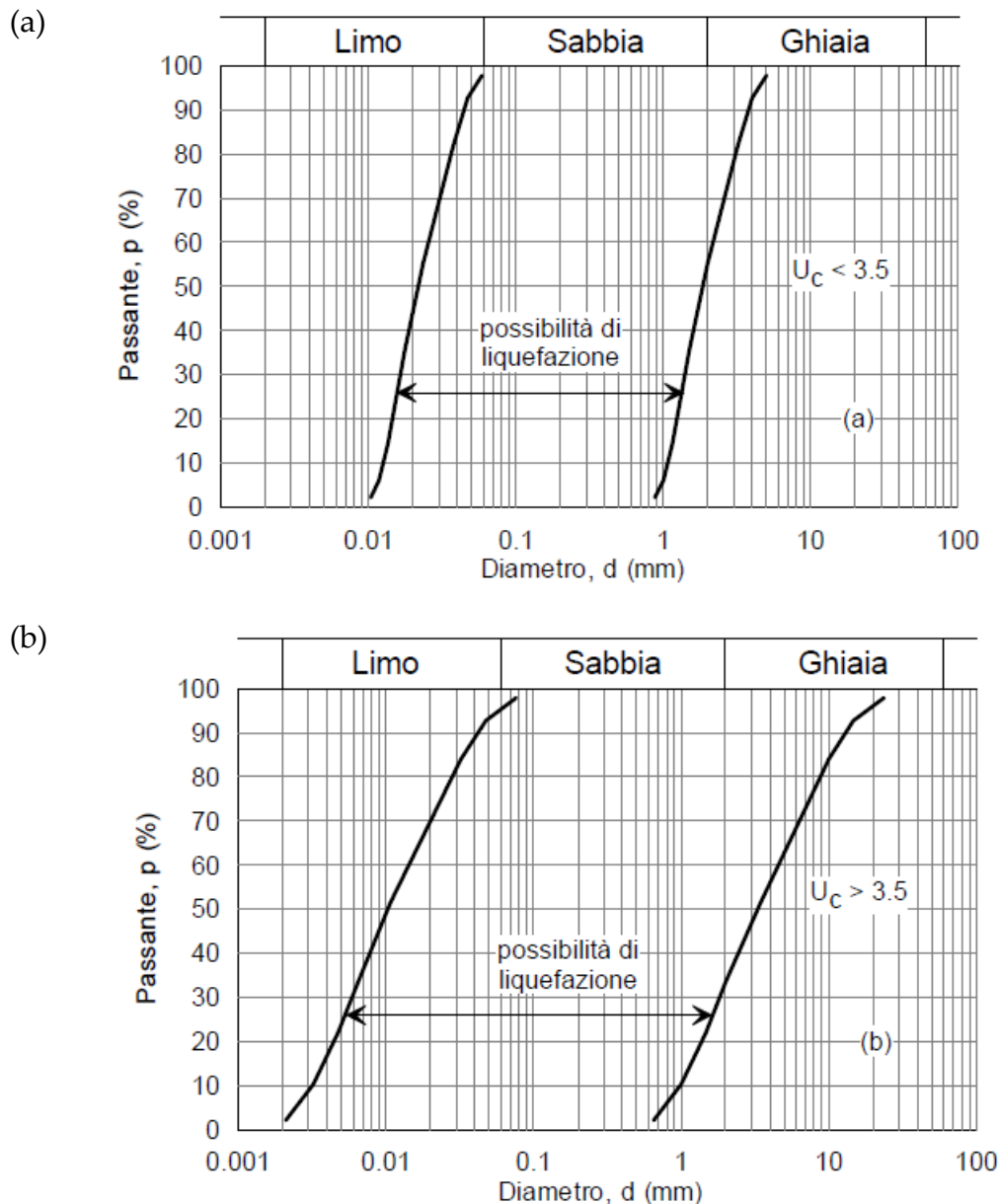
In occasione di un evento sismico particolare attenzione deve essere posta nella liquefazione dei terreni, ovvero la fluidificazione degli stessi con perdita improvvisa della resistenza al taglio, tendenza all'addensamento e conseguente riduzione di volume.

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  $a_{maxs} = 0,238g$  (*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 suddetti terreni è stata rilevata la presenza di una falda freatica di superficie il cui livello statico è stato misurato ad una profondità di 2,50÷2,70 m rispetto al p.c. attuale, presumibilmente soggetta a variazioni stagionali (*non soddisfatta*).
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $(q_{c1N}) > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa; dalle prove penetrometriche eseguite la litologia di superficie è rappresentata da terreni limosi e argillosi con lenti sabbiose di medio addensamento (*non soddisfatta*).
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura (a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in figura (b) per terreni con  $U_c > 3,5$ ; a livello operativo l'applicazione di questo criterio implica l'esecuzione di un sondaggio con prelievo di campioni di sabbia satura.



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

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

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

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

dove:

$\tau_{hm}$  = tensione tangenziale media indotta dal sisma di progetto;

$a_{maxs}$  = accelerazione massima al sito =  $S \cdot a_g = 0,238g$ ;

$\sigma_z$  e  $\sigma'_z$  = valori della tensione litostatica totale ed effettiva alla profondità  $z$  dal p.c.;

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

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

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

La procedura di calcolo si basa sulla seguente equazione:

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

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

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

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

## 5. VALUTAZIONE INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

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

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

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

dove:

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

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

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

Nell'area in esame le valutazioni analitiche hanno espresso un Indice del potenziale di Liquefazione IL variabile da 0,6 a 4,1 traducibile in altri termini in un rischio di liquefazione da "Basso" a "Moderato".

Uno schema delle verifiche eseguite viene riportato in allegato.

Casalecchio di Reno, 19 Aprile 2019



*[Handwritten signature in blue ink]*

# ALLEGATI

2012.036A/RG

## Procedura di calcolo RSL

2012.036A/RG

## 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

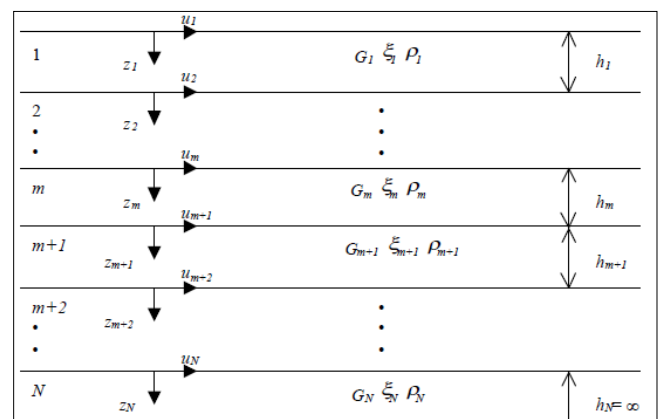
$$\frac{v_{eff}}{v_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

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

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



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

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:

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

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:

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

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

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

Il taglio invece è dato da:

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

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:

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

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

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

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

ovvero

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

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

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

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

Dove  $\alpha_m^*$  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,

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

Da cui  $E_1 = F_1$ .

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

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

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

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

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

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

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

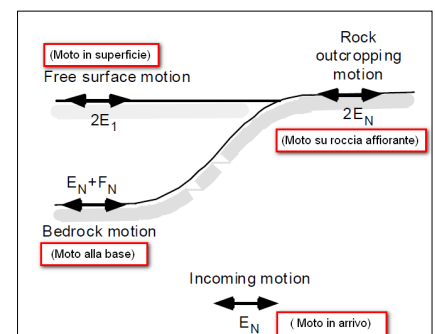
$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (E e^{ik^* z} - F e^{-ik^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

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

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

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

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con



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

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

A è non lineare poiché  $G$  è funzione di  $\gamma$ . 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:

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

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

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000336}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (29)$$

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

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:

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

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

$$S_{vm} = \frac{1}{0.4T_v} \int_{0.3T_v}^{1.2T_v} S_v(T) dT$$

dove

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

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

L'intervallo di integrazione è ridotto rispetto a quello dell'accelerazione perché lo spettro di velocità ha,

generalmente, un andamento più regolare.

Il valore di Fa è pari a

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

Il valore di Fv è pari a

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

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

Periodo TC

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

Periodo TB

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

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

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

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

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

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

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

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

## Schema verifica rischio liquefazione

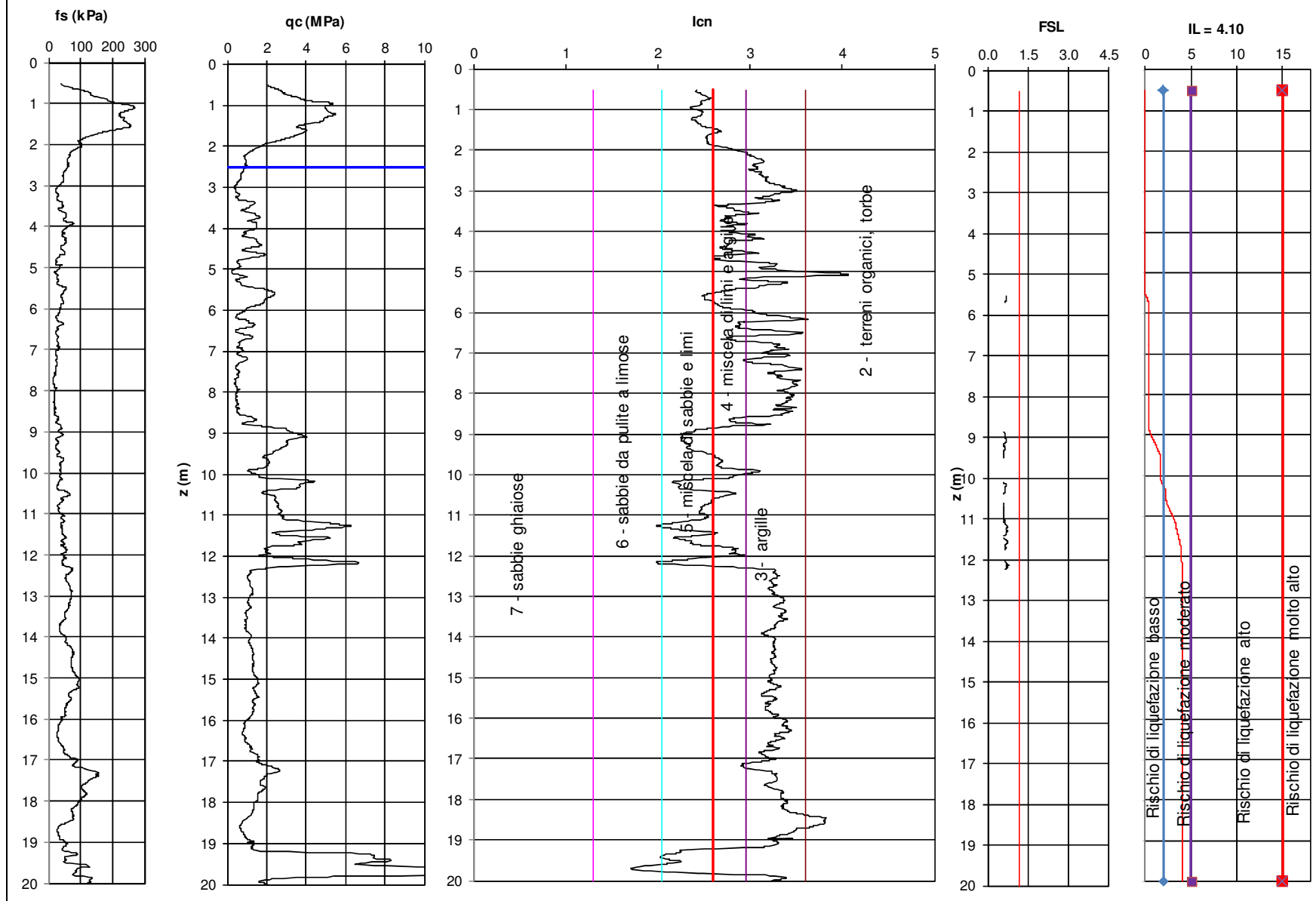
2019.033/RG

**CPTU (piezo cone penetration test)**

1 Committente : Rigone ss

Cantiere: S. Pietro in Casale (BO) via San Benedetto

Codice Lavoro 2012.058

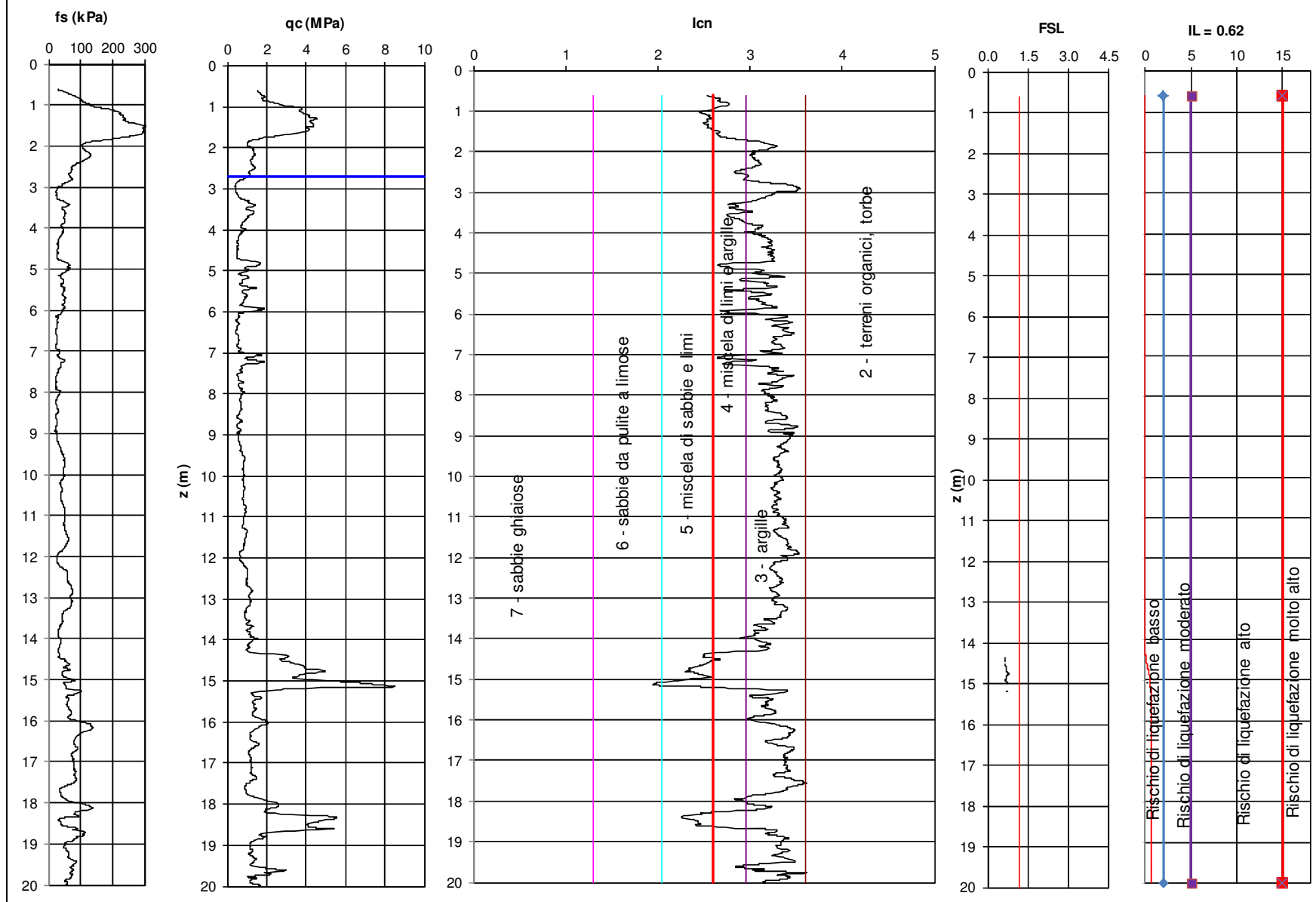


**CPTU (piezo cone penetration test)**

2 Committente : Rigone ss

Cantiere: S. Pietro in Casale (BO) via San Benedetto

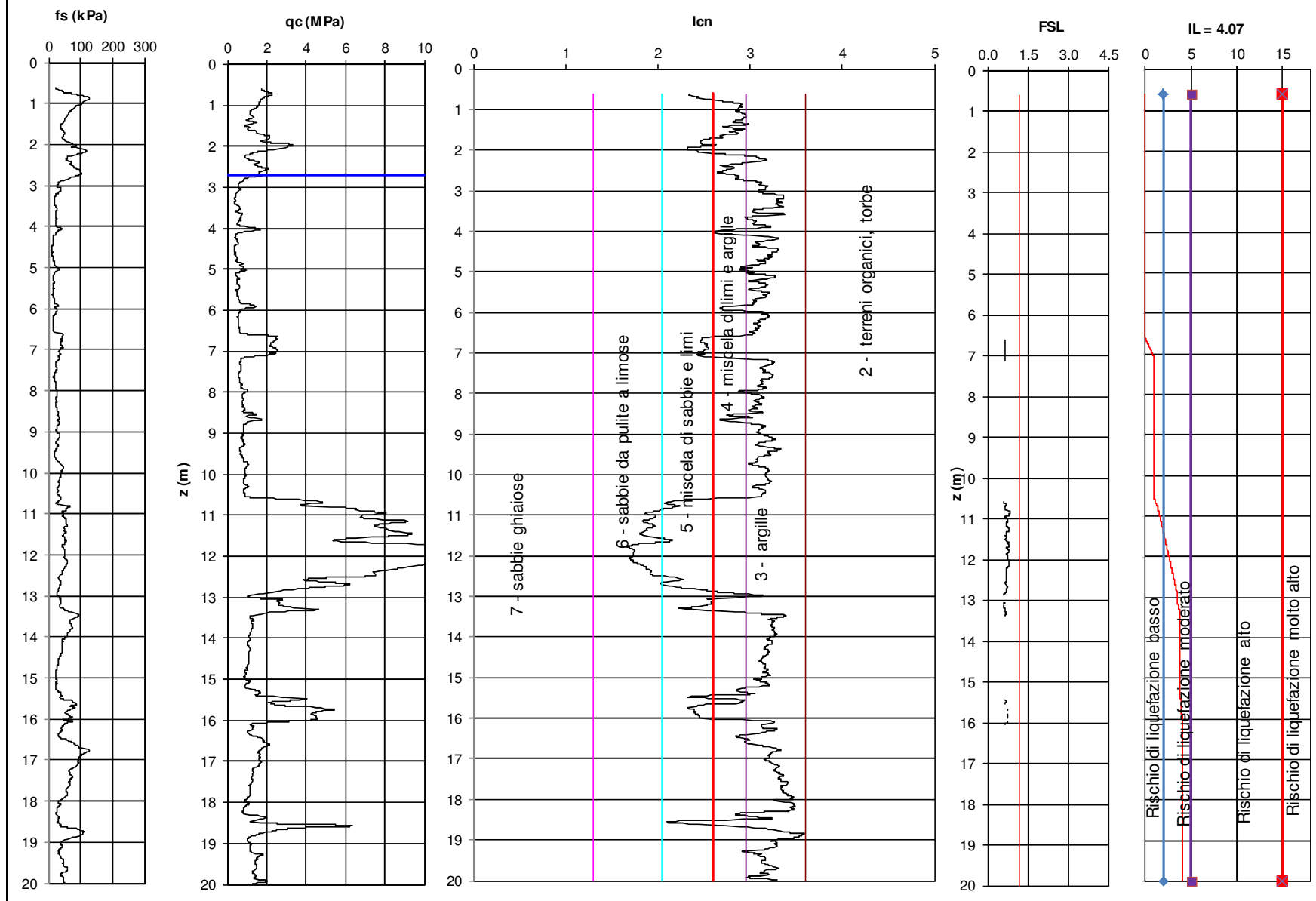
Codice Lavoro 2012.058



**CPTU (piezo cone penetration test)****3** Committente : Rigone ss

Cantiere: S. Pietro in Casale (BO) via San Benedetto

Codice Lavoro 2012.058



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

