

R.3a

**UNIONE DELLA ROMAGNA FAENTINA**  
**Comune di Faenza**

**Studio Tecnico geom.CAVINA-MONTEVECCHI**

corso Matteotti 27  
Faenza

**arch.PAGANI**

fax 0546-680247  
tel.0546-28197

**Piano Particolareggiato**  
**relativo alla scheda di PRG n.165**  
**"Area via Cassanigo (S.Andrea)" - SUB COMPARTO 2**

**UBICAZIONE: Via Bisaura**

REV. Febbraio 2024

**COMMITTENTE**  
**LANZONE DUE SRL**  
**GONI MARIO e MATTEO**

**Integrazione**  
**Relazione Geologica**

**Fg.64 Mapp. 420Parte-419-173-174**  
**12-24-238-297-298-240**

Con la consulenza specialistica di:

TOPOGRAFIA

VALUTAZIONE AMBIENTALE ED ACUSTICA

GEOLOGIA

RETI FOGNARIE-LAMINAZIONE

ILLUMINAZIONE PUBBLICA-ACQUEDOTTO

-Studio Topografico Faenza

-Ing. Conti Franca

-Dott. Geol. Marabini Stefano

-Ing. Paolo Ruggeri

-Energia Studio di  
Progettazione Impiantistica

**PROGETTISTA**



**Studio Geologico**  
**dott. Stefano Marabini**  
Via San Martino, 1  
48018 FAENZA (RA)  
tel. : 348 2680965  
e-mail: stemarabini@libero.it

**BENTINI S.P.A.**  
**GONI MARIO e MATTEO**

**PIANO PARTICOLAREGGIATO**  
relativo alla  
scheda di P.R.G. n.165  
“AREA VIA CASSANIGO (S. ANDREA)” -  
**SUBCOMPARTO B**  
(Comune di Faenza - Ra)

## **INTEGRAZIONE**

**alla**

**RELAZIONE GEOLOGICA 18/07/2019**

(D.M. 17/01/2018, **DGR 476/2021, DGR 564/2021**):

- 1 - **PREMESSA.**
- 2 - **CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO.**
- 3 - **RISCHIO DI LIQUEFAZIONE  
E CEDIMENTI POST-SISMICI.**

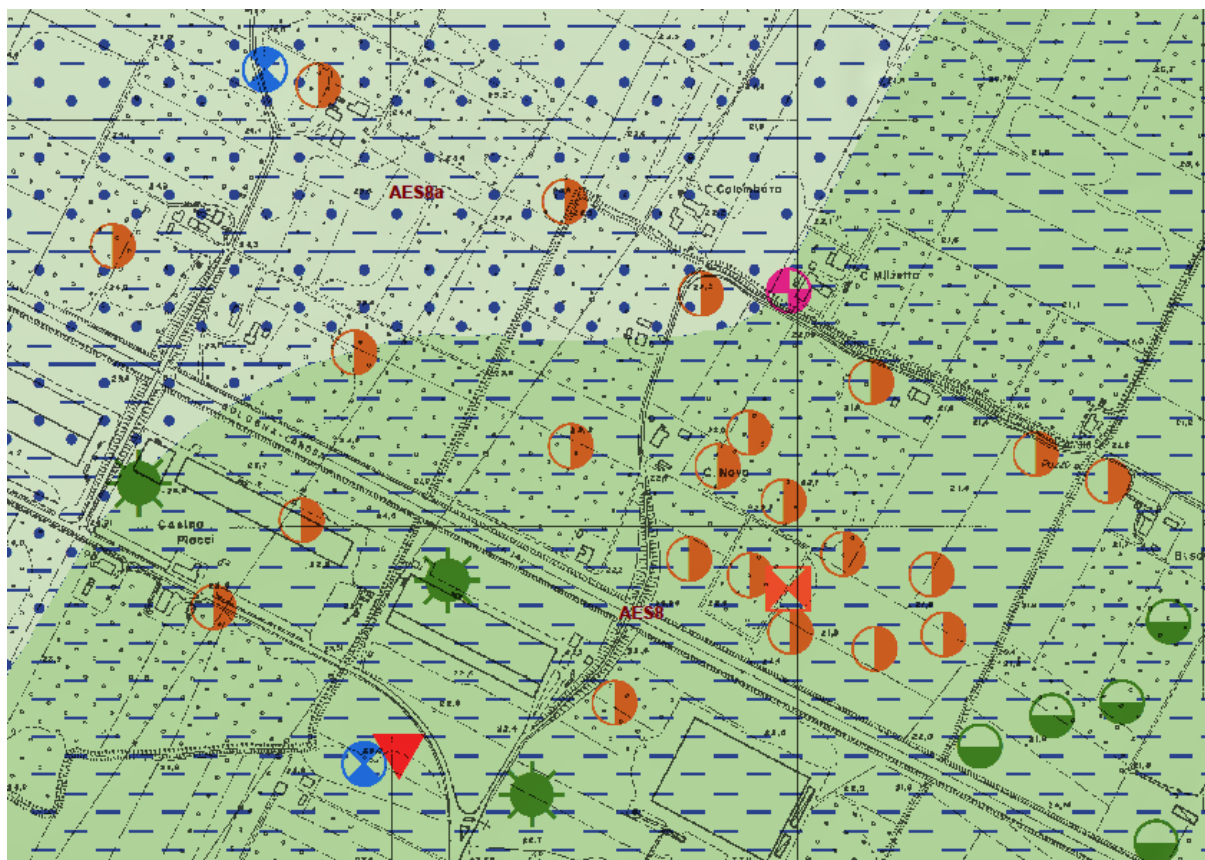
### **allegati:**

- **Richiesta integrazioni da Provincia Ravenna (20 /07/ 2023)**
- **n. 3 grafici e tabelle di penetrometrie statiche (CPT)**
- **Rapporto *Indagine Geofisica con Tromografo* (2023)**
- **Rapporto *Verifica liquefazione e stima cedimenti post-sismici* (2023)**



Faenza, 14 settembre 2023

**Integrazione alla Relazione Geologica 18 / 07 / 2019**



**Ubicazione dell'area di studio nella Carta Geologica Regione Emilia-Romagna, internet.** L'area ricade centralmente in ambito di deposizione alluvionale omogeneo riferito al Subsistema di Ravenna – AES8. I simboli puntuali indicano le indagini geognostiche consultabili nell'Archivio Geognostico Regionale.

**1 - PREMESSA.**

Su incarico delle Proprietà è stata prodotta **nel 2019**, con riferimento a **D.M. 17/01/2018 e DGR 2193/2015**, una analisi geologico-tecnica e del rischio sismico a supporto del **PIANO PARTICOLAREGGIATO** relativo alla **SCHEDA PRG n. 165 "AREA VIA CASSANIGO (S. ANDREA) - Subcomparto B" in Via Bisaura a Faenza (Ra)**, il quale prevede nuova edificazione di tipo produttivo su una superficie pari a circa 7,14ha (v. **PROGETTO dello Studio CAVINA-MONTEVECCHI-PAGANI di Faenza e Relazione Geologica a firma dr. geol. Stefano Marabini, 18 luglio 2019**).

### ***Integrazione alla Relazione Geologica 18 / 07 / 2019***

In considerazione dei caratteri geologici generali dell'ambito di pianura in oggetto posto alcuni km a nord di Faenza, per definire la fattibilità geologica dell'intervento urbanistico sono stati effettuati rilievi morfostratigrafici e idrogeologici e, in particolare, si sono acquisiti i risultati delle seguenti indagini geognostiche e geofisiche *in situ* (v. **Relazione Geologica a firma dr. geol. Stefano Marabini, 18 luglio 2019**):

- **n. 3 penetrometrie statiche (CPT1, CPT 2, CPT 3)** appositamente effettuate all'interno dell'area di studio nel 2019 e **n. 3 penetrometrie statiche (CPT3/08, CPT4/08, CPT 9/08, CPT 10/08)** effettuate all'interno e al contorno dell'area di studio in occasione di un precedente Progetto Urbanistico, spinte a profondità massima di oltre -20m in attraversamento di un substrato alluvionale compatto.
- **n. 2 trivellate geognostiche (T1, T2)** appositamente perforate all'interno dell'area di studio nel 2019 e **n. 3 trivellate geognostiche (T204, T205, T207)** effettuate agli estremi dell'area di studio in occasione di un precedente Progetto Urbanistico, spinte a profondità di -3,2/-7m per l'accertamento litologico e idrogeologico diretto dei terreni superficiali.
- **n. 1 sessione di misure geofisiche mediante tromografo**, per la determinazione della Vs 30 e della Categoria sismica dei terreni a partire dalla frequenza di risonanza del terreno.

Nella presente **Integrazione alla Relazione Geologica 2019** è prodotto di seguito, a riscontro di specifica **Richiesta del Servizio Pianificazione Territoriale della Provincia di Ravenna** (v. allegato), un aggiornamento dell'analisi del rischio sismico con riferimento a **DGR 476/2021 e DGR 564/2021**, che consiste in particolare in:

- **Aggiornamento della classificazione sismica del sito**, previa analisi *ex novo* delle misure geofisiche con "Tromografo" (v. Rapporto in allegato).
- **Ulteriore verifica analitica del rischio di liquefazione** con riferimento alla CPT 1, 2 e 3 appositamente effettuate nel 2029 (v. **grafici e tabelle penetrometriche in allegato**), corredata anche da **stima dei cedimenti permanenti post-sismici**.

## **2 - CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO.**

I risultati delle citate **misure geofisiche mediante "Tromografo"**, che come noto registrano riconoscere la frequenza di risonanza del terreno, sono sintetizzati nei **parametri sismici principali aggiornati rispetto alla Relazione Geologica 2019** (v. allegato geofisico):

- **$V_s 30 = 245 \text{ m/s}$**

**Integrazione alla Relazione Geologica 18 / 07 / 2019**

- Cc (Fattore di amplificazione sismica) (ai sensi **DGR 476/2021, DGR 564/2021**)

PGA = 1,6	SA1 per l'intervallo $0,1s < T_0 < 0,5s = 1,8$
SI1 per l'intervallo $0,1s < T_0 < 0,5s = 1,9$	SA2 per l'intervallo $0,4s < T_0 < 0,8s = 2,3$
SI2 per l'intervallo $0,5s < T_0 < 1,0s = 2,5$	SA3 per l'intervallo $0,7s < T_0 < 1,1s = 2,7$
SI3 per l'intervallo $0,5s < T_0 < 1,5s = 2,7$	SA4 per l'intervallo $0,5s < T_0 < 1,5s = 2,6$

- St (Fattore di amplificazione topografica) = 1 (T = 1)

Quindi, per l'“**AREA VIA CASSANIGO (S. ANDREA) - Subcomparto B**” si prospetta, **con buona attendibilità**, ribadendo la buona coerenza tra sismostratigrafia e stratigrafie penetrometriche, la seguente classificazione dei terreni di fondazione ai sensi **DGR 476/2021, DGR 564/2021**:

**categoria C:** *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate e/o di argille di media consistenza, con spessore variabile da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_s$  30 tra 180-370m/s ( $15 < N_{pt} < 50$ )*

### **3 - RISCHIO LIQUEFAZIONE E CEDIMENTI POST-SISMICI.**

Per la **verifica analitica alla liquefazione**, effettuata come detto con riferimento alle CPT 1, 2 e 3 (v. grafici e tabelle in allegato), è stato utilizzato un **software** sviluppato in base al **metodo di Robertson**, considerando i seguenti valori:

**amax = 0,31 g**

**M = 6,14**

**Falda = 2.4 m**

La stima dei **cedimenti permanenti post-sismici** è stata effettuata utilizzando la **procedura di Tokimatsu e Seed** utilizzando formule correlative per la definizione di **e0 (indice dei vuoti)**, **Cr (indice di riconsolidazione postciclica)**, **Cc (indice di compressione)**.

Le elaborazioni ed i risultati ottenuti, che sono dettagliatamente riportati nei tabulati di cui al **Rapporto in allegato**, sono così significativamente sintetizzabili:

- PL (Indice Potenziale Liquefazione) = 0
- **Cedimenti verticali post-sismici compresi circa tra 1,2 / 1,4 cm.**





**PROVINCIA DI RAVENNA**  
*Medaglia d'Argento al Merito Civile*

**SETTORE VIABILITA'**  
**SERVIZIO Pianificazione Territoriale**

Class. 07-04-04 Fasc. 2023/5 Prot. Cfr. Segnatura.xml

Ravenna, 20/07/2023

Spett.le  
UNIONE DELLA ROMAGNA FAENTINA  
Settore Territorio Servizio Urbanistica  
Ufficio di Piano  
[pec@cert.romagnafaentina.it](mailto:pec@cert.romagnafaentina.it)  
c/a Arch Daniele Babalini  
Arch. Benedetta Lazzari

**Oggetto: FAENZA – PIANO PARTICOLAREGGIATO RELATIVO ALLA SCHEDA DI PRG N. 165  
SUB 2 - AREA CASSANIGO.**

Richiesta integrazioni

Con riferimento al Piano Particolareggiato relativo alla Scheda 165 di PRG Area Cassanigo sub comparto B2, in relazione alla nota dell'Unione della Romagna Faentina di cui al ns PG 33651/2022, analizzata la documentazione trasmessa, con la presente si richiedono le seguenti integrazioni:

- Aggiornamento della relazione geologica rispetto alle ultime normative sugli studi di microzonazione sismica (DGR 476/2021 e DGR 564/2021);
- Integrazione della relazione di VALSAT con apposita sezione relativa alla verifica di conformità ai vincoli e prescrizioni del PTCP vigente, e integrazione dell'analisi dei principali strumenti di pianificazione sovraordinata attualmente vigenti.

Il Servizio scrivente resta a vostra disposizione per eventuali chiarimenti in merito a quanto sopra esposto.

Distinti saluti

**IL DIRIGENTE DEL SETTORE**

(Ing. Paolo Nobile)

Sede del servizio: Piazza Caduti per la Libertà 2, Ravenna  
Responsabile del procedimento: Ing. Paolo Nobile  
Per informazioni contattare: Paesaggista Giulia Dovadoli  
Tel. 0545-258025 - e-mail: [gdovadoli@mail.provincia.ra.it](mailto:gdovadoli@mail.provincia.ra.it)

*Documento firmato digitalmente*

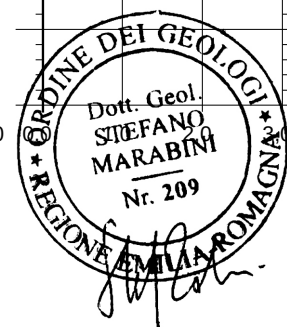
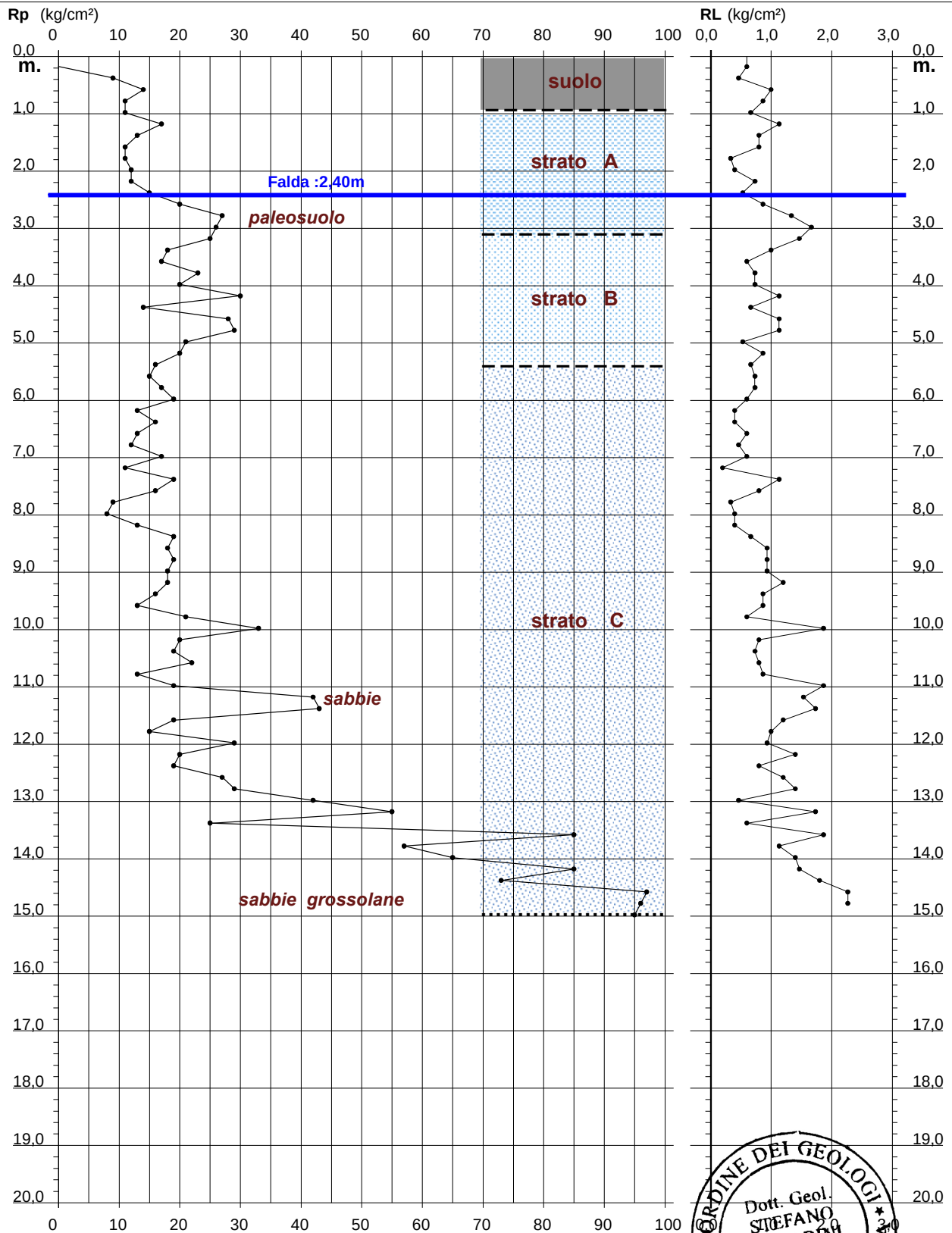


# PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 1

- committente : Dott. Geol. Stefano Marabini  
- lavoro : AREA SCHEDA 165, sub B  
- località : Via Bisaura Faenza

- data : 01/07/2019  
- quota inizio : Piano Campagna  
- prof. falda : 2,40 m da quota inizio  
- scala vert.: 1 : 100

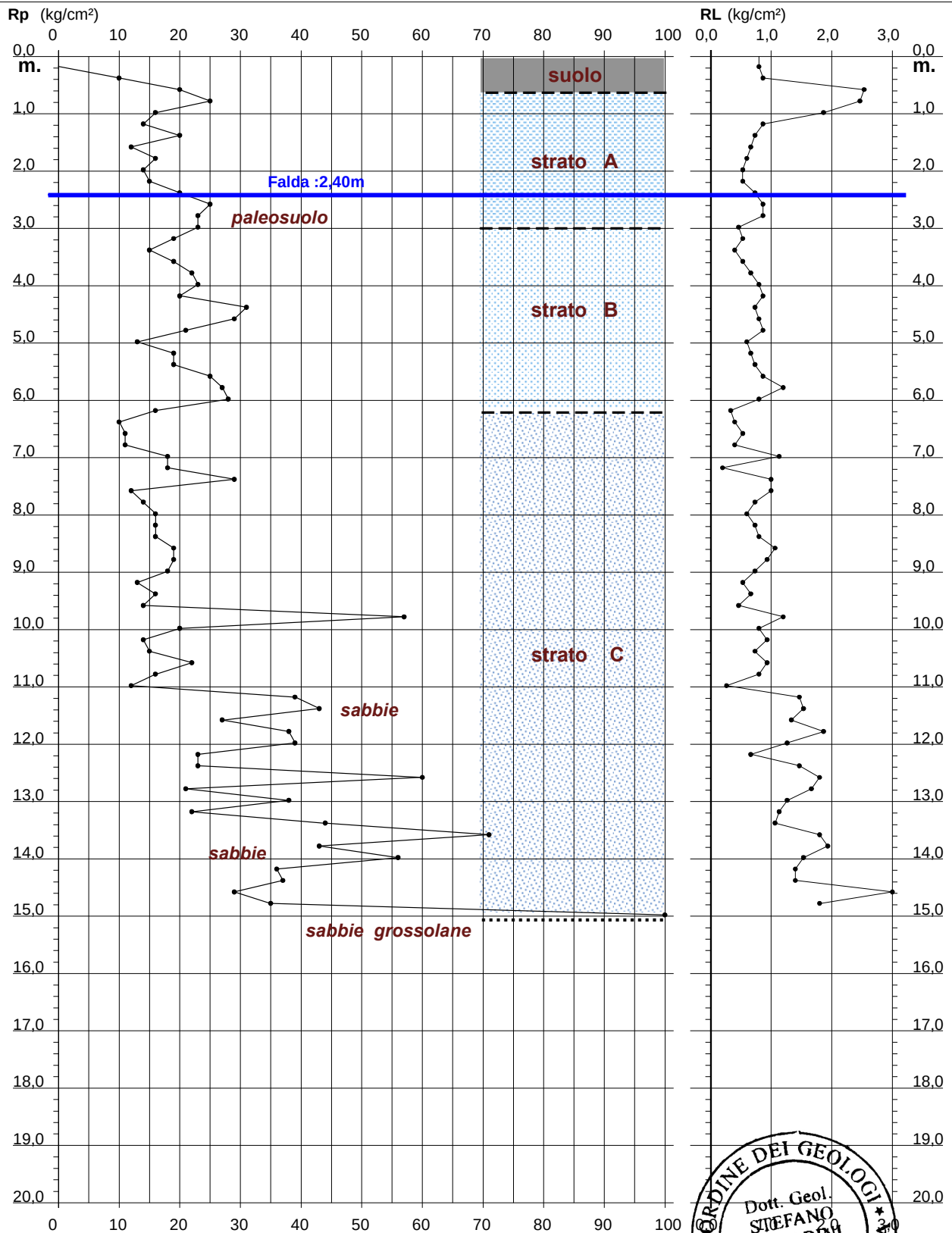


# PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 2

- committente : Dott. Geol. Stefano Marabini  
- lavoro : AREA SCHEDA 165, sub B  
- località : Via Bisaura Faenza

- data : 01/07/2019  
- quota inizio : Piano Campagna  
- prof. falda : 2,40 m da quota inizio  
- scala vert.: 1 : 100



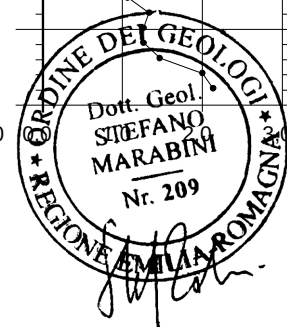
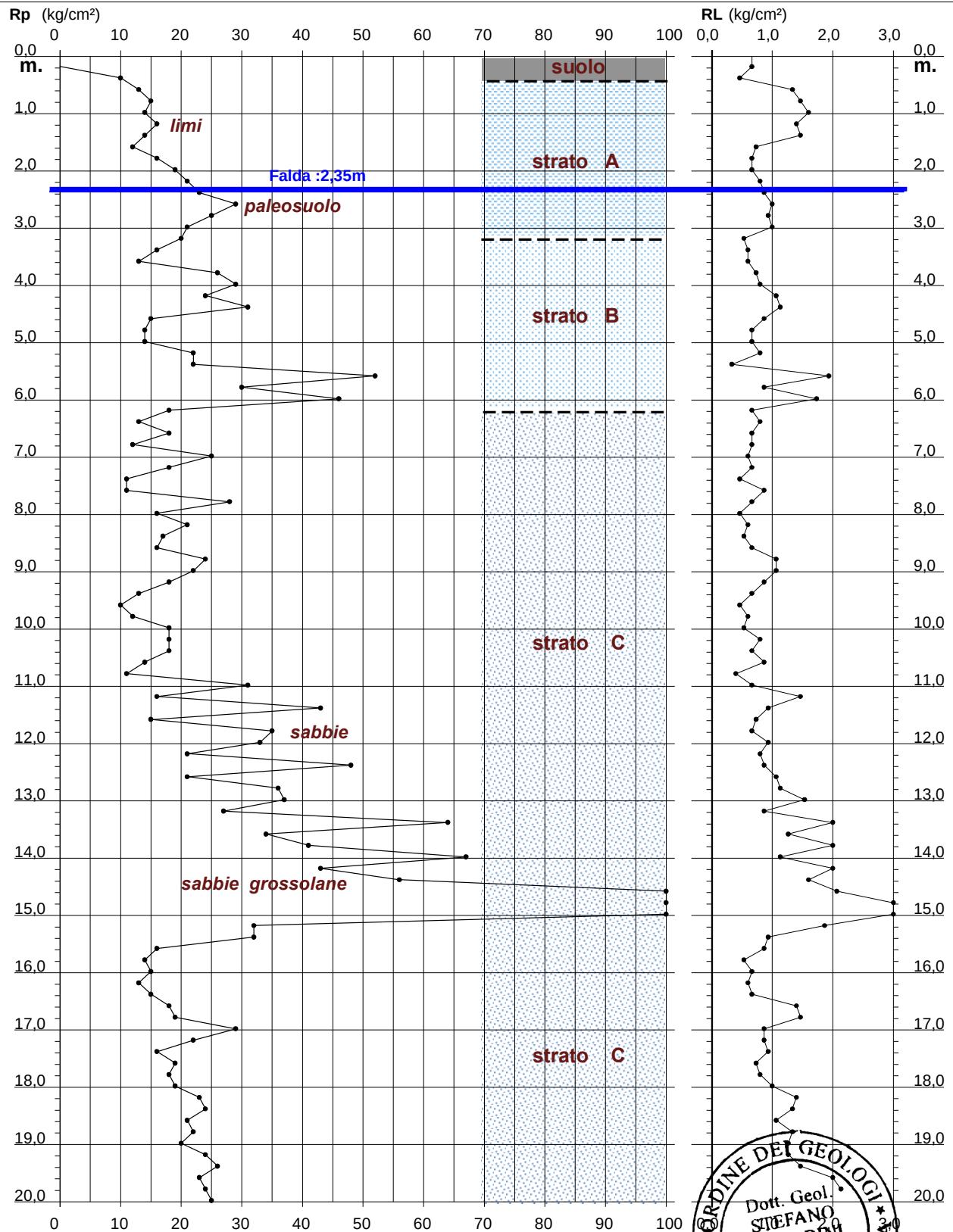


# PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 3

- committente : Dott. Geol. Stefano Marabini  
- lavoro : AREA SCHEDA 165, sub B  
- località : Via Bisaura Faenza

- data : 01/07/2019  
- quota inizio : Piano Campagna  
- prof. falda : 2,35 m da quota inizio  
- scala vert.: 1 : 100





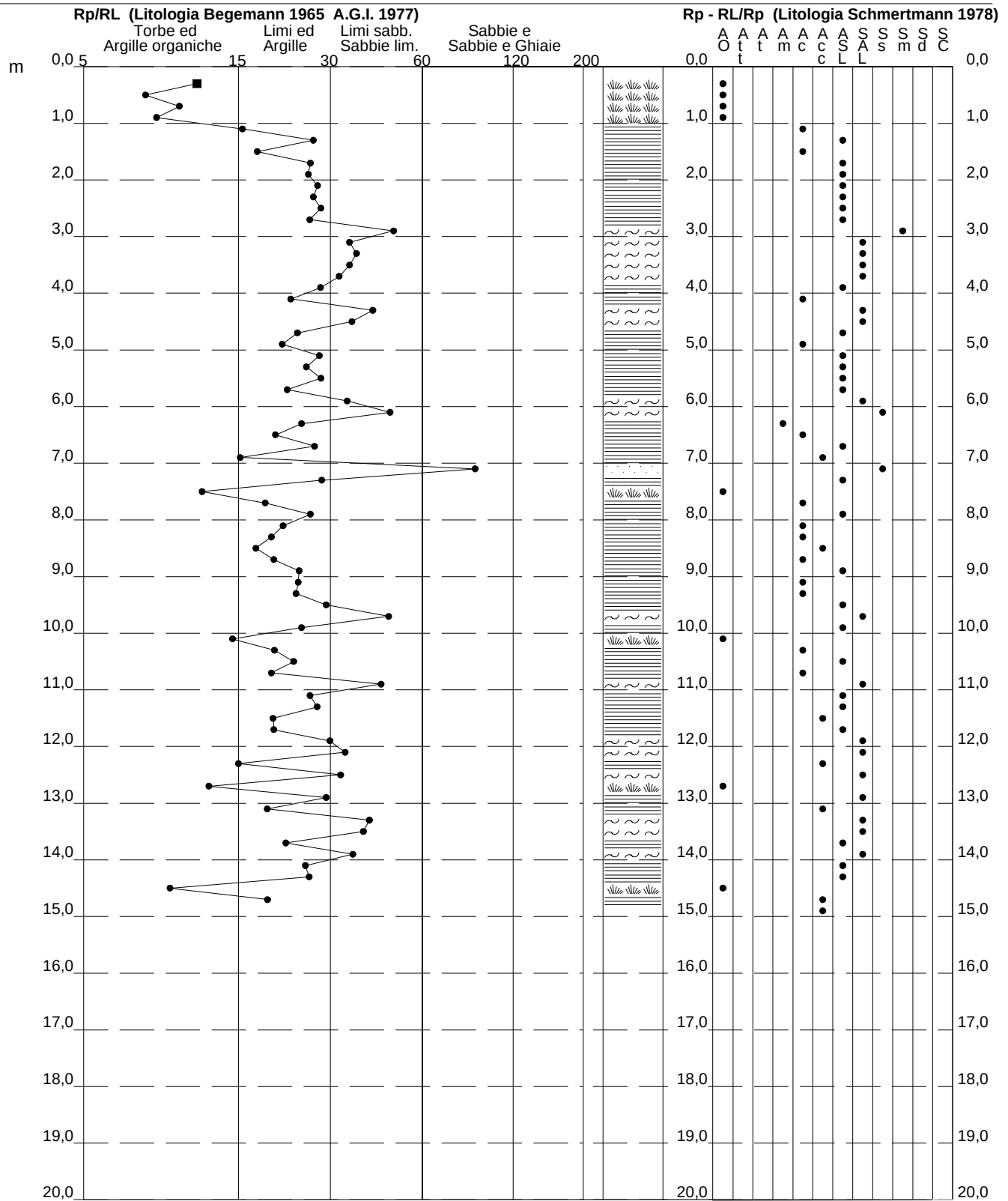
# PROVA PENETROMETRICA STATICA VALUTAZIONI LITOLOGICHE

**CPT 2**

2.010496-071

- committente : Dott. Geol. Stefano Marabini  
 - lavoro : AREA SCHEDA 165, sub B  
 - località : Via Bisaura Faenza  
 - note :

- data : 01/07/2019  
 - quota inizio : Piano Campagna  
 - prof. falda : 2,40 m da quota inizio  
 - scala vert.: 1 : 100



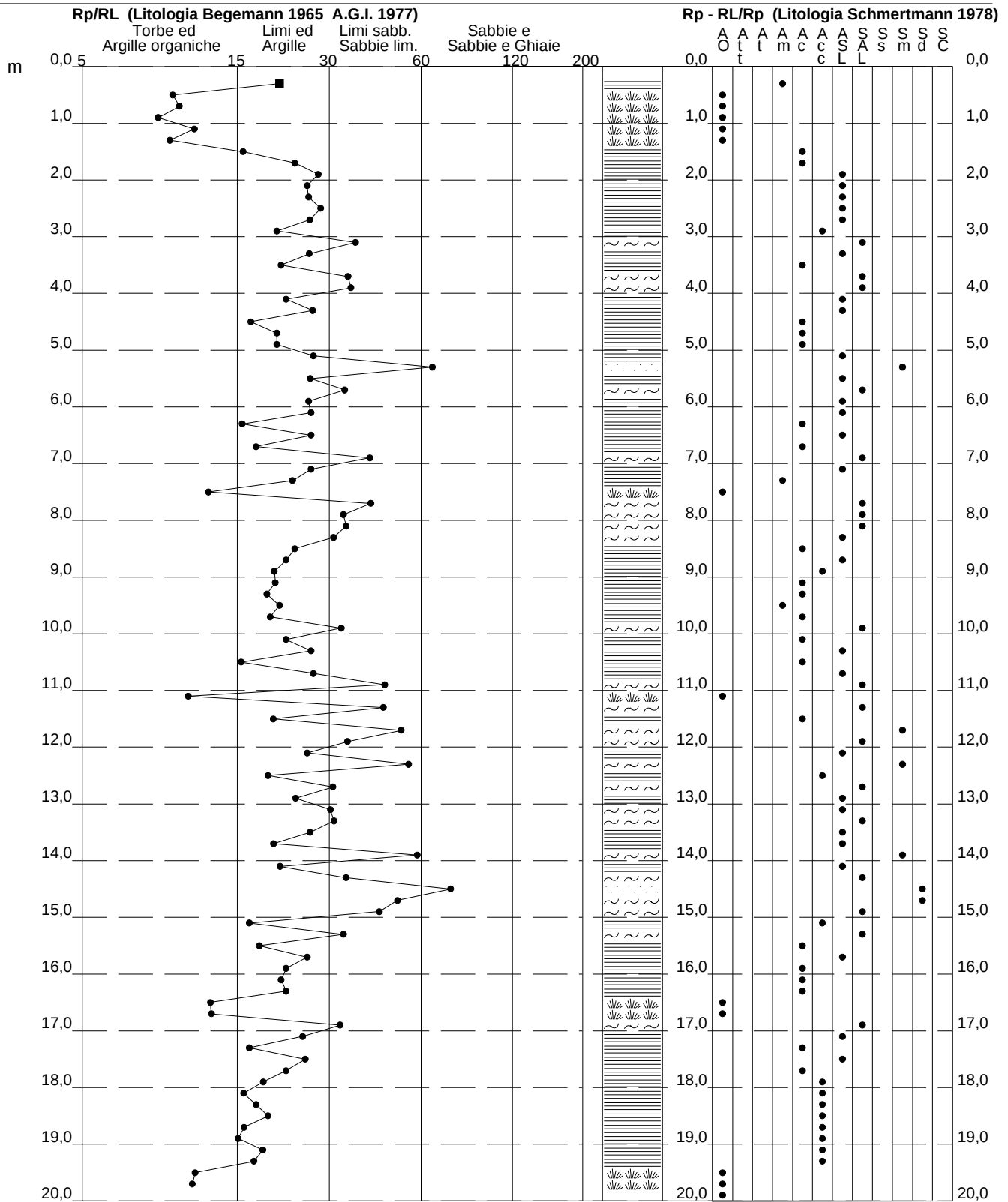
**PROVA PENETROMETRICA STATICA  
VALUTAZIONI LITOLOGICHE**

**CPT 3**

2.010496-071

- committente : Dott. Geol. Stefano Marabini  
- lavoro : AREA SCHEDA 165, sub B  
- località : Via Bisaura Faenza  
- note :

- data : 01/07/2019  
- quota inizio : Piano Campagna  
- prof. falda : 2,35 m da quota inizio  
- scala vert.: 1 : 100













**INDAGINE SISMICA mediante la tecnica del rapporto spettrale H/V a stazione singola eseguita con tromografo digitale TROMINO-Micromed ed elaborazione dei dati mediante software GRILLA-Micromed**

**CANTIERE: via Bisaura – Faenza (RA)**

**LAVORO: “Area Via Cassanigo”- scheda 165 sub B**

**COMMITTENTE: dr. geol. Stefano Marabini**



*Faenza, Luglio 2019/Agosto 2023*

*Dr. Geol. Bruno Gardegni*



## **INDAGINE GEOFISIC. e INTERPRETAZIONE**

Scopo della presente relazione è la caratterizzazione sismica dell' "AREA VIA CASSANIGO (S. ANDREA)" (Scheda n. 165 PRG del Comune di Faenza), posta in ambito di piana alluvionale ed interessata da specifico "Progetto Unitario".

Allo scopo è stata eseguita in posizione centrale una indagine sismica utilizzando un tomografo digitale Tromino-Micromed, avvalendosi del metodo di Nakamura sul rapporto spettrale H/, che fornisce una valutazione diretta della  $V_{s30}$  in base all'individuazione delle discontinuità sismiche e della profondità della formazione rocciosa.

Questa tecnica dei rapporti spettrali o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) con apparecchio tomografico **TROMINO** permette inoltre di misurare la frequenza caratteristica di risonanza del sito, parametro che è utilizzabile in termini di risposta sismica locale (RSL) per progettare edifici non con la stessa frequenza di risonanza del terreno, in modo da evitare l'effetto di doppia risonanza pericoloso per la stabilità degli edifici.

La  $V_{s30}$  viene calcolata o meglio stimata mediante un codice di calcolo apposito attraverso il software **GRILLA**, è necessario conoscere la profondità di un riflettore stratigrafico (prova penetrometrica o sondaggio) e riconoscibile dalla curva H/V.

La tecnica HVSR si basa in parte sulla sismica tradizionale dei microtrempi, cioè di oscillazioni molto piccole rispetto al sisma; il metodo di acquisizione dei dati è quindi detto passivo in quanto il rumore non è generato come ad esempio dalle esplosioni della sismica attiva.

I dati sono stati acquisiti con un frequenza base di 128 Hz e convertiti in file ASCII mediante il software Grilla, e il rumore sismico è stato registrato nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo di 30 minuti, suddiviso in intervalli della durata di 8 sec.

Successivamente si è operato alla costruzione di un modello teorico HVSR e, tramite un algoritmo, all'adattamento della curva sperimentale e quella teorica. Le acquisizioni rispettano le indicazioni del processo SESAME.

Nel presente studio, che sfrutta la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale H/V = 1) con quello misurato in superficie, la frequenza di risonanza del terreno è regolata dalla formula:

$$f = V_s / 4H$$

dove f è la frequenza e H lo spessore dello strato sismico.

Di seguito si riportano i dati relativi all'acquisizione sismica:

Inizio registrazione: 13/07/19 10:27:41      Fine registrazione: 13/07/19 10:47:41

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".      Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

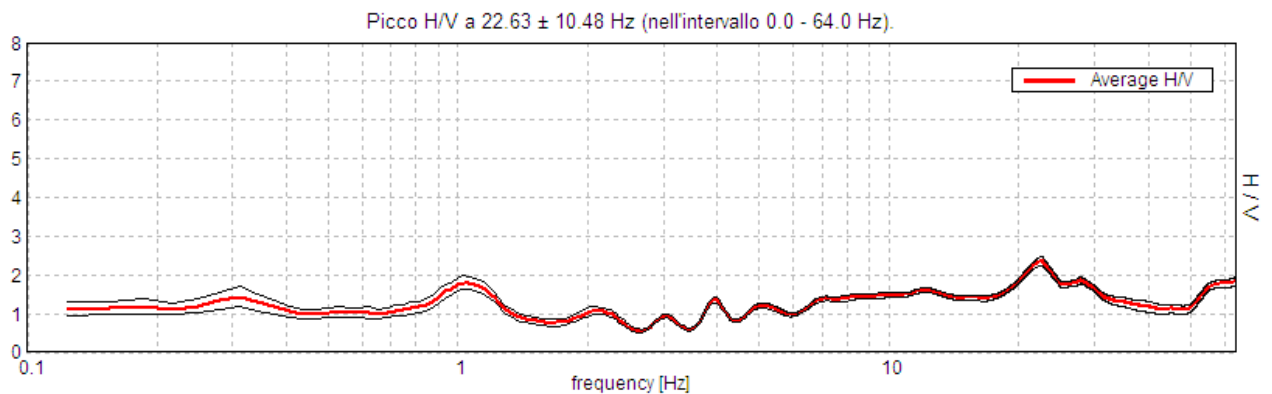
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

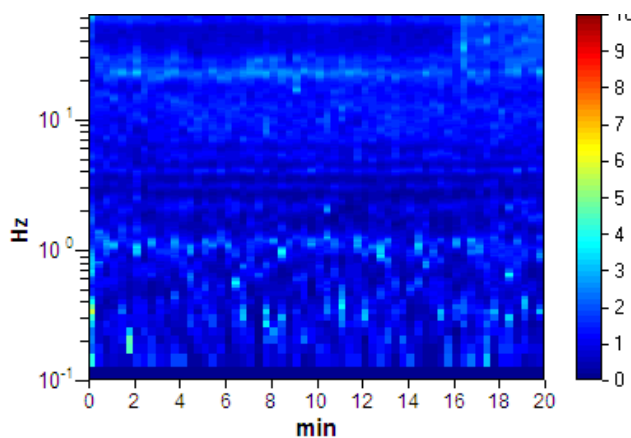
Lisciamento: 10%

Nel grafico che segue è rappresentata la curva sperimentale H/V frutto dell'elaborazione mediante algoritmo dei microtremori registrato dall'apparecchiatura, in ascissa la frequenza di risonanza del terreno, in ordinata il rapporto H/V:

#### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

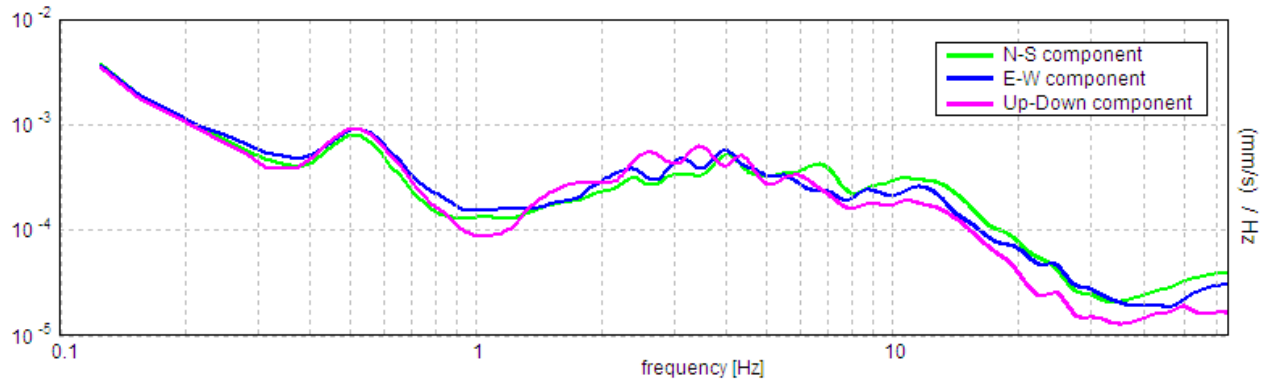


#### H/V TIME HISTORY

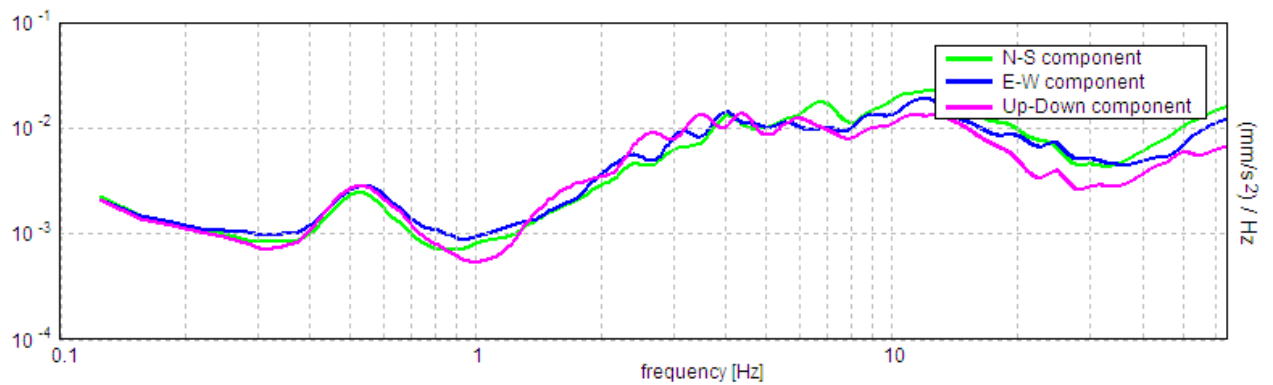


Nei grafici successivi l'andamento della traccia nelle 3 componenti N-S, E-W e verticale:

### SINGLE COMPONENT SPECTRA (VELOCITA')



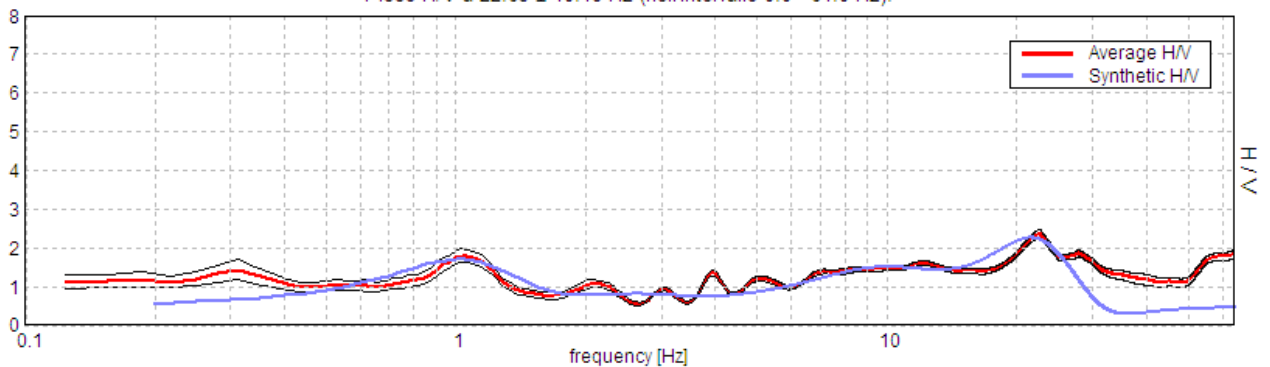
### SINGLE COMPONENT SPECTRA (ACCELERAZIONE)



Il grafico sotto rappresenta l'elaborazione della traccia sperimentale da cui si ricava la Vs30 e relativa categoria di suolo, la curva blu è la curva teorica risultato dell'elaborazione, devono essere il più possibile coincidenti;

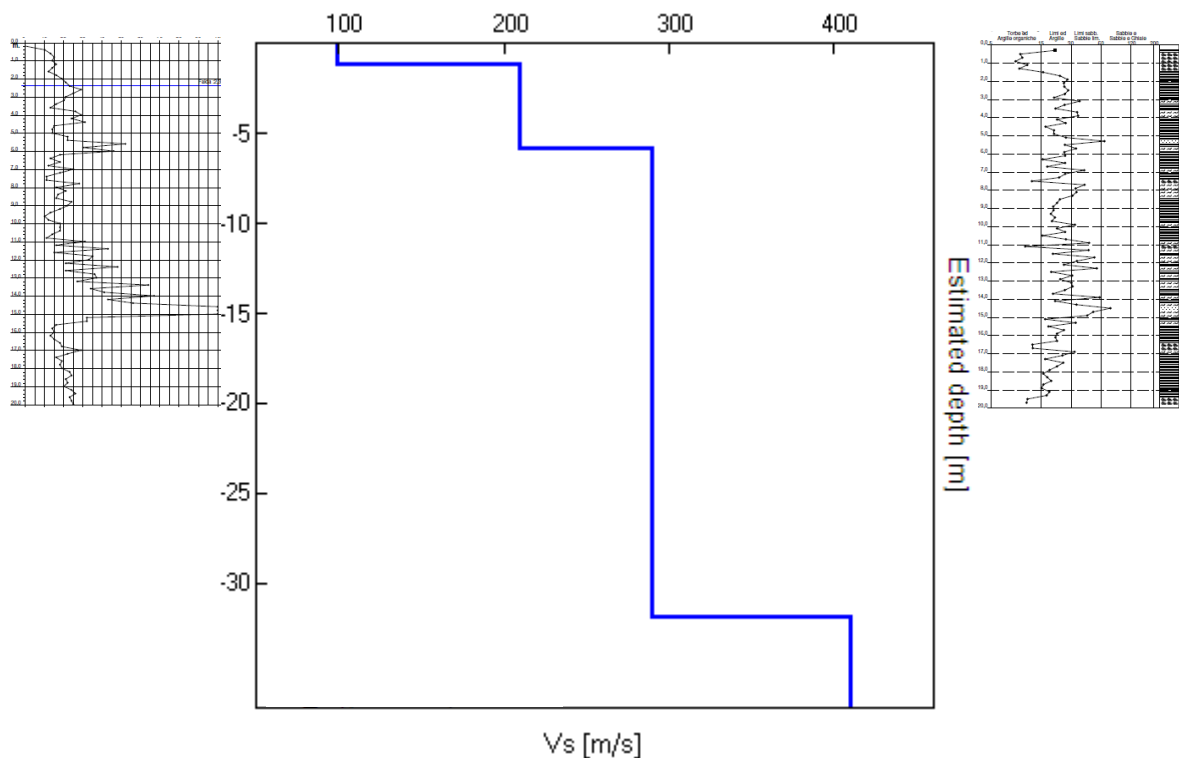
### EXPERIMENTAL VS SYNTHETIC H/V

Picco H/V a  $22.63 \pm 10.48$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



A seguire uno schema dei sismostrati nei quali è stato suddiviso il sottosuolo, ciascuno caratterizzato da uno specifico valore Vs, e quindi il relativo grafico dell'andamento della Vs in profondità,.

Litologia indicativa da tabella 1	Profondità totale [m]	Sismostrati [m]	Vs [m/s]
Terreno vegetale	1.20	1.20	100
Limi e argille sab. tenere	5.90	4.70	210
Limi e argille sab. medie	31.90	26.00	290
Limi e argille sab. compatte	61.90	30.00	410
Limi e argille sab. compatte	91.90	30.00	390
Substrato argilloso non rigido	inf.	inf.	600



Il valore medio risultante dall'elaborazione fornisce la seguente Vs30, valore che non va assunto come dato certo, ma considerando un margine di errore almeno del 20%.

$$V_{s30} = 245 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$$

Il valore ottenuto classifica il terreno come **sito C**.

	Descrizione del profilo stratigrafico	Vs30 (m/s)
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti 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.	180 – 360

La frequenza di risonanza caratteristica o di riferimento del terreno è  $F_0 \cong 22 \text{ Hz}$



**PARAMETRI SISMICI da GEOSTRU**

Tipo di elaborazione: FONDAZIONI

**Sito in esame: C**

Coordinate espresse in ED50:      Latitudine: 44,33141°      Longitudine: 11,894549°  
 Coordinate espresse in WGS84:      Latitudine: 44.330472°      Longitudine: 11.893572°

**Classe d'uso II: costruzioni con normale affollamento di persone, assenza di funzioni pubbliche e sociali importanti, industrie con attività non pericolose per l'ambiente, ponti, strade e opere infrastrutturali non ricadenti in classe d'uso III e IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza, dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.**

**Siti di riferimento:**

	<b>ID</b>	<b>Latitudine °</b>	<b>Longitudine °</b>	<b>Distanza</b>
Sito 1	17626	44,3240	11,8832	1222,723
Sito 2	17627	44,3249	11,9531	4711,069
Sito 3	17405	44,3749	11,9518	6639,351
Sito 4	17404	44,3740	11,8819	4835,636

Categoria suolo: C      Categoria topografica: T1  
 Vita nominale opera: 50 anni      Coefficiente Cu: 1,0

**Parametri sismici:**

	<b>P<sub>VR</sub> %</b>	<b>Tr (anni)</b>	<b>ag (g)</b>	<b>Fo (-)</b>	<b>Tc* (s)</b>
Operatività SLO	81	30	0,063	2,422	0,262
Danno SLD	63	50	0,080	2,409	0,271
Salvaguardia vita SLV	10	475	<b>0,199</b>	2,411	0,305
Prevenzione collasso SLC	5	975	0,251	2,456	0,317

P<sub>VR</sub> = probabilità di superamento nel periodo di riferimento V<sub>R</sub> = 35 anni

Tr = periodo di riferimento

ag = accelerazione di gravità

Fo = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orr.

Tc = periodo di inizio del tratto di velocità costante dello spettro di accelerazione orr.

**Coefficienti sismici:**

	<b>Ss (-)</b>	<b>Cc (-)</b>	<b>St (-)</b>	<b>Kh (-)</b>	<b>Kv (-)</b>	<b>Amax (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Beta (-)</b>
SLO	1,500	1,630	1,000	0,019	0,009	0,924	0,200
SLD	1,500	1,620	1,000	0,024	0,012	1,179	0,200
SLV	<b>1,410</b>	1,550	<b>1,000</b>	0,067	0,034	<b>2,745</b>	0,240
SLC	1,330	1,530	1,000	0,093	0,047	3,274	0,280

Ss = amplificazione stratigrafica      Cc = coeff. funz. categoria

St = amplificazione topografica      Amax = acc. max attesa al sito

Kh = coeff. sismico verticale Kv = coeff. Sismico orizzontale Beta = coeff. riduzione acc.max

Zona 1 = 0,35g      **Zona 2 = 0,25g**      Zona 3 = 0,15g      Zona 4 = 0,05g

**Valore di  $a_{refg}$  per il comune di Faenza = 0,2022**

dove  $a_{refg}$  = accelerazione massima orizzontale di picco al suolo, cioè per  $T = 0$ , espressa in frazione dell'accelerazione di gravità  $g$  ( $a_{refg}$ )

**Categorie topografiche del terreno**

<b>T1</b>	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolate con inclinazione media $i < 15^\circ$	St = 1
<b>T2</b>	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	St = 1.2
<b>T3</b>	Rilievi con larghezza in cresta minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i < 30^\circ$	St = 1.2
<b>T4</b>	Rilievi con larghezza in cresta minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	St = 1.4

**Categorie suolo di fondazione**

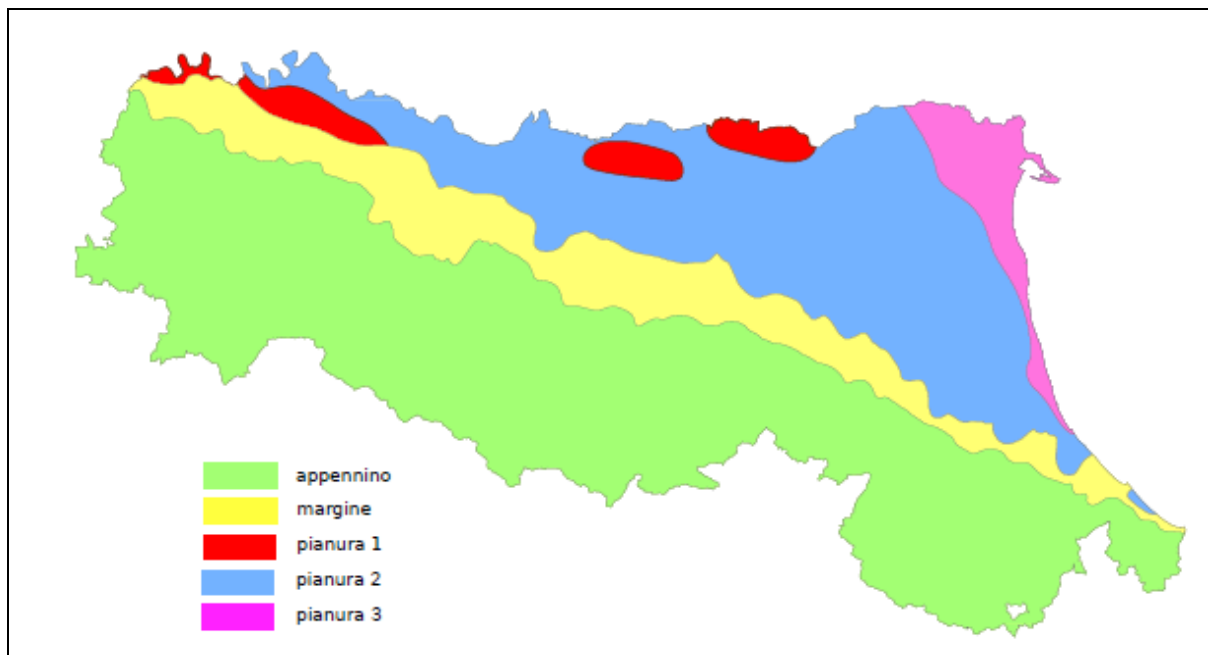
	Descrizione del profilo stratigrafico	$V_{s30}$ (m/s)
<b>C</b>	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.	180 – 360

**Parametri per il profilo stratigrafico**

S = 1,25, sabbie e ghiaie mediamente addensate, argille media consistenza, Tipo C;

**ELEMENTI di MICROZONAZIONE SISMICA**

Si considerano i coefficienti di amplificazione sismica relativi alla fascia di velocità relativa a 250 m/s.



Localizzazione indicativa degli ambienti geomorfologici e litostratigrafici

**Tabella per il calcolo dei coefficienti di amplificazione sismica**

(DGR n.630 del 29/04/2019 aggiornamento DGR n.476 del 12/04/2021)

**F.A. P.G.A.:** accelerazione di picco orizzontale a periodo  $T=0$  alla superficie del sito.

**F.A. S.I.:** Intensità spettrale di risposta in velocità relativo a tre intervalli.

**F.A. S.A.:** Intensità spettrale di risposta in accelerazione relativo a quattro intervalli.

**MARGINE APPENNINICO-PADANO di tipo B: caratterizzato da spessore dei terreni fini superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini;**

Vs30	150	200	<b>250</b>	300	350	400
F.A. P.G.A	1.6	1.6	<b>1.6</b>	1.6	1.6	1.5

Fattore di Amplificazione **PGA**

Vs30	150	200	<b>250</b>	300	350	400
F.A SI1	1.9	1.9	<b>1.9</b>	1.8	1.7	1.6
F.A SI2	2.9	2.8	<b>2.5</b>	2.3	2.1	2.0
F.A SI3	3.3	3.1	<b>2.7</b>	2.4	2.2	2.0

Fattori di Amplificazione **SI1** ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ), **SI2** ( $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ), **SI3** ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ )

Vs30	150	200	<b>250</b>	300	350	400
F.A. SA1	1,8	1,8	<b>1,8</b>	1,7	1,7	1,5
F.A SA2	2,6	2,6	<b>2,3</b>	2,1	1,9	1,7
F.A SA3	3,1	2,9	<b>2,7</b>	2,4	2,3	2,1
F.A SA4	3,0	2,9	<b>2,6</b>	2,3	2,1	1,9

F.A. **SA1** ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ), **SA2** ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ), **SA3** ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) e **SA4** ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ )

**CONCLUSIONI**

- Il terreno indagato e classificabile come **sito C**;
- La velocità stimata è pari a **Vs30 = 245 m/s**;
- Il manufatto previsto è classificato come **classe d'uso II**;
- La frequenza caratteristica del sito è **Fo  $\cong$  22,6 Hz**;
- La frequenza secondaria del sito è **Fo  $\cong$  1,2 Hz**;
- L'accelerazione di gravità del sito è **ag = 0,199 (SLV)**;
- L'accelerazione massima è **Amax = 2,745 (SLV)**;
- L'accelerazione massima orizzontale di picco al suolo, cioè per  $T = 0$ , espressa in frazione dell'accelerazione di gravità per il comune di Faenza è **g (a<sub>refg</sub>) = 0,2022**;

- La categoria topografica è **T1**;
- L'area è classificabile come **Margine di tipo B**;
- Si assumono come coefficienti di amplificazione sismica quelli relativi alla fascia di velocità pari a 250 m/s;
- Si riportano coefficienti di amplificazione sismica su base regionale, tali coefficienti non sono vincolanti ai fini della progettazione (Margine appenninico-padano di tipo B):

<b>PGA = 1,6</b>	<b>SA1 per l'intervallo <math>0,1s &lt; T_0 &lt; 0,5s = 1,8</math></b>
<b>SI1 per l'intervallo <math>0,1s &lt; T_0 &lt; 0,5s = 1,9</math></b>	<b>SA2 per l'intervallo <math>0,4s &lt; T_0 &lt; 0,8s = 2,3</math></b>
<b>SI2 per l'intervallo <math>0,5s &lt; T_0 &lt; 1,0s = 2,5</math></b>	<b>SA3 per l'intervallo <math>0,7s &lt; T_0 &lt; 1,1s = 2,7</math></b>
<b>SI3 per l'intervallo <math>0,5s &lt; T_0 &lt; 1,5s = 2,7</math></b>	<b>SA4 per l'intervallo <math>0,5s &lt; T_0 &lt; 1,5s = 2,6</math></b>

*Faenza, Luglio 2019/Agosto 2023*

*Dr. Geol. Bruno Gardegni*



## **VERIFICA LIQUEFAZIONE E STIMA CEDIMENTI POST-SISMICI**

**CANTIERE: via Bisaura – Faenza (RA)**

**LAVORO: “Area Via Cassanigo”- scheda 165 sub B**

**COMMITTENTE: dr. geol. Stefano Marabini**



*Faenza, Agosto 2023*

*Dr. Geol. Bruno Gardegni*



## **PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Scopo della presente relazione geologica è la caratterizzazione sismica del primo sottosuolo di un'area ubicata nel territorio del Comune di Faenza in via Bisaura, per la quale sono disponibili i risultati geognostici ed idrogeologici (profondità media falda di circa 2,4 m) di **n. 3 prove penetrometriche statiche CPT 20 ton**, di cui 2 fino a 15 m di profondità e 1 fino a 20 m di profondità, i quali hanno consentito la definizione dei parametri geotecnici richiesti ai sensi delle seguenti Normative **(v.**

### **Relazione Geologica Piano Particolareggiato):**

- Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 11 marzo 1988 “norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, esecuzione e collaudo delle opere di sostegno delle terre e di fondazione”;
- relativa Circolare applicativa Ministero dei Lavori Pubblici 24 settembre 1988 n.30483;
- Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 9 gennaio 1996 n.218/24/3 “istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica”;
- Decreto Ministeriale 16/01/1996 “norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”.

Recentemente tutta la normativa vigente è stata sostanzialmente modificata da:

- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274 del 20 marzo 2003 “primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”
- Ordinanza n. 3316 del 2 ottobre 2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri;
- Ordinanza n. 3379 del 5 novembre 2004 della Presidenza del Consiglio dei Ministri;
- Ordinanza n. 3431 del 3 maggio 2005 della Presidenza del Consiglio dei Ministri;
- Ordinanza n. 3452 del 1 agosto 2005 della Presidenza del Consiglio dei Ministri;
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 settembre 2005 “Norme tecniche per le costruzioni”;
- Ordinanza n. 3467 del 13 ottobre 2005 della Presidenza del Consiglio dei Ministri;
- D.M. 14 gennaio 2008: Norme tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- Circolare Cons. Sup. LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione del D.M. 14 gennaio 2008 aggiornata al 7 marzo 2008;
- Circolare Cons. Sup. LL.PP. n° 617/2009: Istruzioni per l'applicazione del D.M. del 14/01/2008.
- Delibera della Giunta Regionale 21 dicembre 2015, n. 2193: Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”, di cui alla delibera dell'Assemblea legislativa 2/05/2007, n. 112;



- D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120 - Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164;
- D.M. 17 gennaio 2018: Nuove norme tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- Aggiornamento studi di micro zonazione sismica DGR 476/2021e DGR 564/2021.

## **VERIFICA alla LIQUEFAZIONE**

Per quanto riguarda la **liquefazione** deve esserne verificata la suscettibilità quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati o lenti spesse di sabbie sciolte in falda, in generale si assume che vengano trascurati i livelli sabbiosi di spessore uguale o minore di 0,6 m confinati all'interno di strati coesivi e immersi in falda, in quanto non presentano uno spessore tale da consentire il fenomeno della liquefazione, nel caso specifico, dalle prove eseguite troviamo strati di limi sabbiosi di spessore inferiore a 0,6 m con valori medi di  $R_p$  immersi in falda, in teoria non suscettibili di liquefazione, per precauzione procediamo ugualmente ad una verifica.

Si può trascurare il pericolo di liquefazione quando:

**1** - la magnitudo attesa è inferiore a 5;

**2** - l'accelerazione massima attesa in superficie è minore di 0.1g;

**3** - terreni con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:

- la frazione di fine, FC, è superiore al 20%, con indice di plasticità  $IP > 10\%$ ;

-  $FC \geq 35\%$  e resistenza  $(N1)_{60} > 20$  oppure  $qc_{1N} > 95$  oppure  $VS1 > 200$  m/s;

-  $FC \leq 5\%$  e resistenza  $(N1)_{60} > 25$  oppure  $qc_{1N} > 160$  oppure  $VS1 > 220$  m/s

$(N1)_{60}$ ,  $qc_{1N}$ ,  $VS1$  sono i valori normalizzati dell'indice NSPT della Standard Penetration Test, della resistenza di punta  $qc$  della prova CPT e della velocità di propagazione delle onde di taglio da prove geofisiche;

**4** - distribuzione granulometrica esterna per oltre il 50% al fuso indicato in Fig. 1a nel caso di materiale con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  ed in Fig. 1b per coefficienti di uniformità  $> 3.5$ .

**5** - profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

**6** - copertura di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3 m, oppure con spessore maggiore di 5 m per magnitudo maggiori di  $M > 7$ .

**7** - un ulteriore motivo di esclusione dalla verifica di liquefazione è dato dal valore della densità relativa  $D_r$  del deposito, Gibbs ha eseguito diversi studi su risultati di vari autori stabilendo che una densità relativa pari a 70% è valore limite tra terreni liquefacibili e non liquefacibili (Manuale di

geotecnica per l'ingegneria civile" di Nunziante Marino, Maggioli Editore, 2006), di conseguenza tutti i terreni con  $D_r > 70\%$  vengono automaticamente esclusi dalla verifica alla liquefazione.

Per valutare il pericolo di liquefazione è stato adottato il metodo di Robertson e Wride (1997), che parte dai risultati delle prove CPT, per giungere a un fattore di sicurezza calcolato sulla stima dei seguenti parametri:

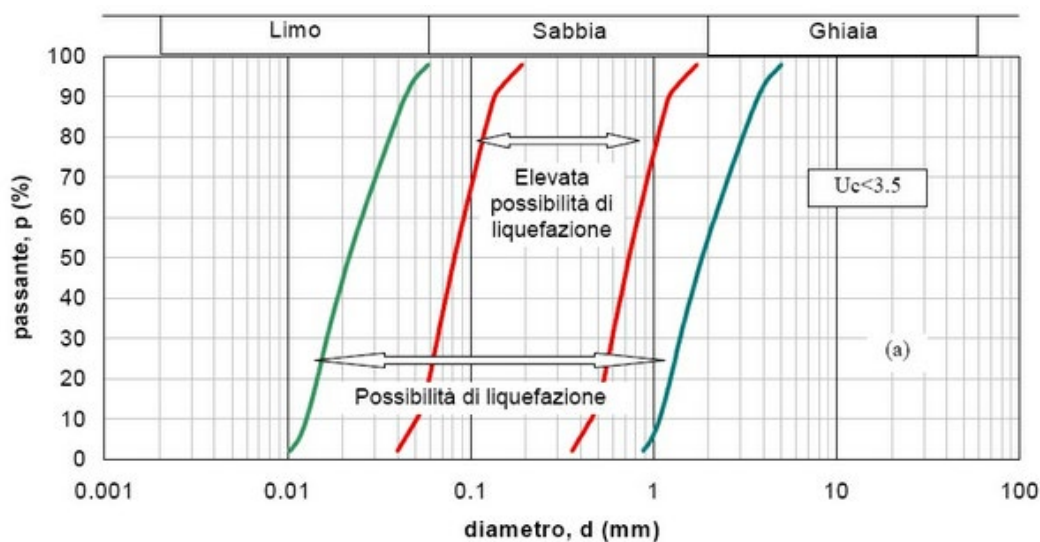
$$F_L(z) = (CRR_{M=7,5; \sigma'v=1atm} / CSR) \cdot MSF K_\sigma \quad \text{ove:}$$

CRR = resistenza ciclica del terreno

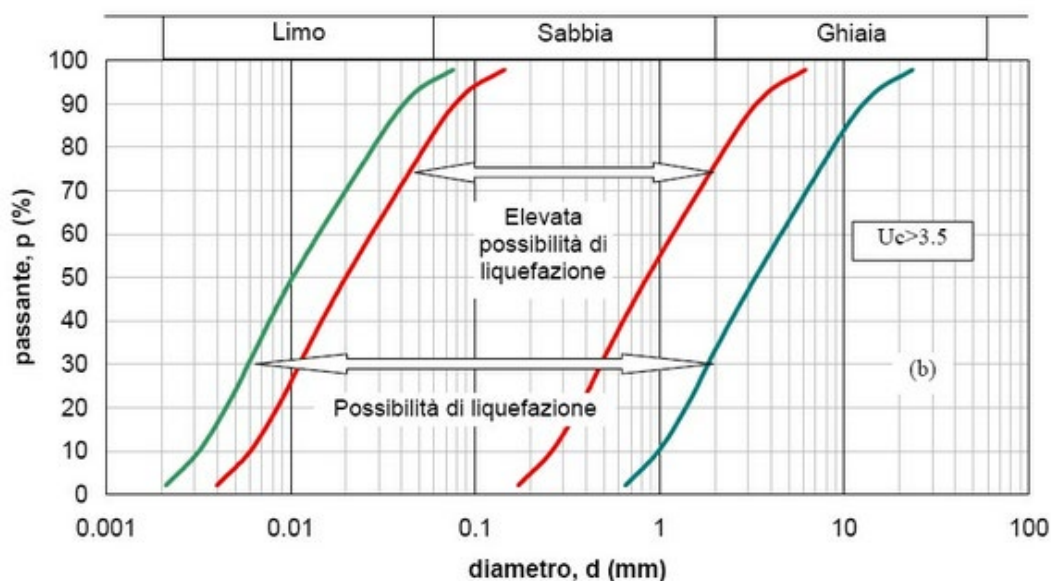
CSR = rapporto tensionale ciclico

MSF = fattore scala della magnitudo = 1,69 (5,5)/1,48 (6,0)/1,30 (6,5)/1,14 (7,0)/1,00 (7,5)/ 0,88 (8,0)

$K_\sigma$  è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata.



**Figura 4.5.9 – Fasce granulometriche critiche  $U_c < 3.5$**



**Figura 4.5.10 – Fasce granulometriche critiche  $U_c > 3.5$**

L' indice del potenziale di liquefazione IPL è una misura degli effetti della liquefazione basata sulla larghezza e profondità delle zone liquefacibili e su casi storici di liquefazione. Il metodo implementato in Liquiter per il calcolo del potenziale di liquefazione IPL utilizzato è quello di Sonmez (2003).

Il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione è definito da:

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

dove:

$$F_{(0)} = 0 \text{ se } FSL \geq 1.2$$

$$F_{(z)} = 2 \cdot 10^6 \cdot e^{(-18.427FSL)} \text{ se } 1.2 > FSL > 0.95$$

$$F_{(z)} = 1 - FSL \text{ se } FSL \leq 0.95$$

si indica con  $z_{crit}$  la profondità massima alla quale strati liquefatti producono effetti in superficie:

$$\text{se } z_{crit} = 20 \text{ m} \rightarrow w_{(z)} = 10 - 0.5 \cdot z$$

$$\text{se } z_{crit} = 10 \text{ m} \rightarrow w_{(z)} = 20 - 2 \cdot z$$

Tradizionalmente la profondità critica è assunta pari a 20 m, ma recentemente Ozocak e Sert (2010), sulla base di evidenze sperimentali successive ai terremoti di Adapazari (Turchia) del 1999 e sulla base delle curve limite per manifestazioni di liquefazioni in superficie di Ishihara (1985), hanno proposto di assumere per terremoti di magnitudo "usuale" la profondità critica di 10 m. Le classi di potenziale di liquefazione, secondo la proposta di Sonmez (2003), sono i seguenti:

Tab. I – Classi di pericolosità di liquefazione secondo Sonmez (2003)

<b>Indice del potenziale di liquefazione,</b>	<b>Pericolosità di liquefazione</b>
LPI = 0	Nulla
0 < LPI < 2	Bassa
2 < LPI < 5	Moderata
5 < LPI < 15	Alta
LPI > 15	Molto alta

Tab. II - Classi di probabilità di liquefazione secondo Chen e Juang (2000)

<b>Classe</b>	<b>Probabilità di liquefazione,</b>	<b>Giudizio di pericolosità</b>
5	PL ≥ 0.85	Liquefazione quasi certa
4	0.65 ≤ PL < 0.85	Liquefazione molto probabile
3	0.35 ≤ PL < 0.65	Liquefazione e non liquefazione ugualmente
2	0.15 ≤ PL < 0.35	Liquefazione improbabile
1	PL < 0.15	Non liquefazione quasi certa

## SEED E IDRISSE

Il metodo utilizzato dal software Loadcap per la valutazione della liquefacibilità di un terreno sabbioso saturo durante un evento sismico è quello proposto da Seed e Idriss, il più noto e utilizzato dei metodi semplificati.

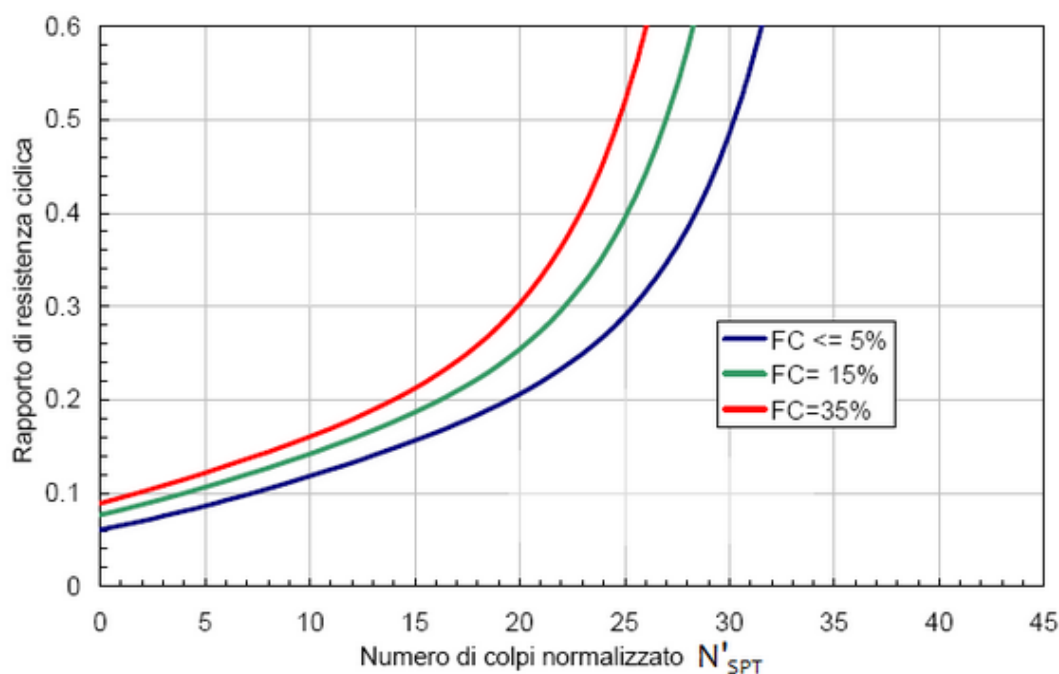
Si basa sul numero di colpi della prova Standard Penetration Test e richiede solo la conoscenza di pochi parametri geotecnici: *la granulometria, la densità relativa, il peso di volume.*

Con tale metodo il fattore di resistenza alla liquefazione FS viene valutato dal rapporto tra la capacità di resistenza normalizzata (R) e la domanda di resistenza ciclica (T), moltiplicato per un fattore di scala valutato considerando un evento sismico atteso di magnitudo M=6.5 che assume un valore costante pari a 1.19 (condizione peggiore).

La capacità di resistenza normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale viene espressa dalla seguente relazione:

$$R = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}}$$

e può essere determinata dal grafico rappresentato in Fig. 4.5.11, funzione di parametri desunti da prove SPT opportunamente corretti e normalizzati.



**Figura 4.5.11** – Correlazione fra capacità di resistenza ciclica e numeri di colpi corretto della prova penetrometrica dinamica ( $N'_{SPT}$ )

La domanda di resistenza ciclica viene espressa dalla relazione:

$$T = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

dove:

g accelerazione di gravità;

$\sigma_v$   $\sigma'_v$  rispettivamente la tensione verticale totale e quella efficace alla profondità considerata;

$r_d = 1 - 0.015z$  coefficiente correttivo che tiene conto della deformabilità del terreno al passaggio delle onde sismiche di taglio.

Nell'espressione della domanda di resistenza (T), per tenere conto del carattere sporadico dei picchi di accelerazione, si corregge lo sforzo massimo ciclico indotto dall'evento sismico del 35% ottenendo un valore di "sforzo equivalente uniforme".

Se  $FS > 1.3$  il deposito viene considerato non liquefacibile.

Poiché l'area di studio è inserita all'interno della 2° categoria ed il terreno di studio ricade nella classe C, per il calcolo dell'azione sismica si considera un'accelerazione massima pari a :

$$A_{max} = S \cdot a_g = 1,25 \times 0,25 = 0,31g = 3.04 \text{ m/s}^2$$

$A_{max}$  = accelerazione massima al p.c.

G = accelerazione di gravità (9,8 m/s<sup>2</sup>)

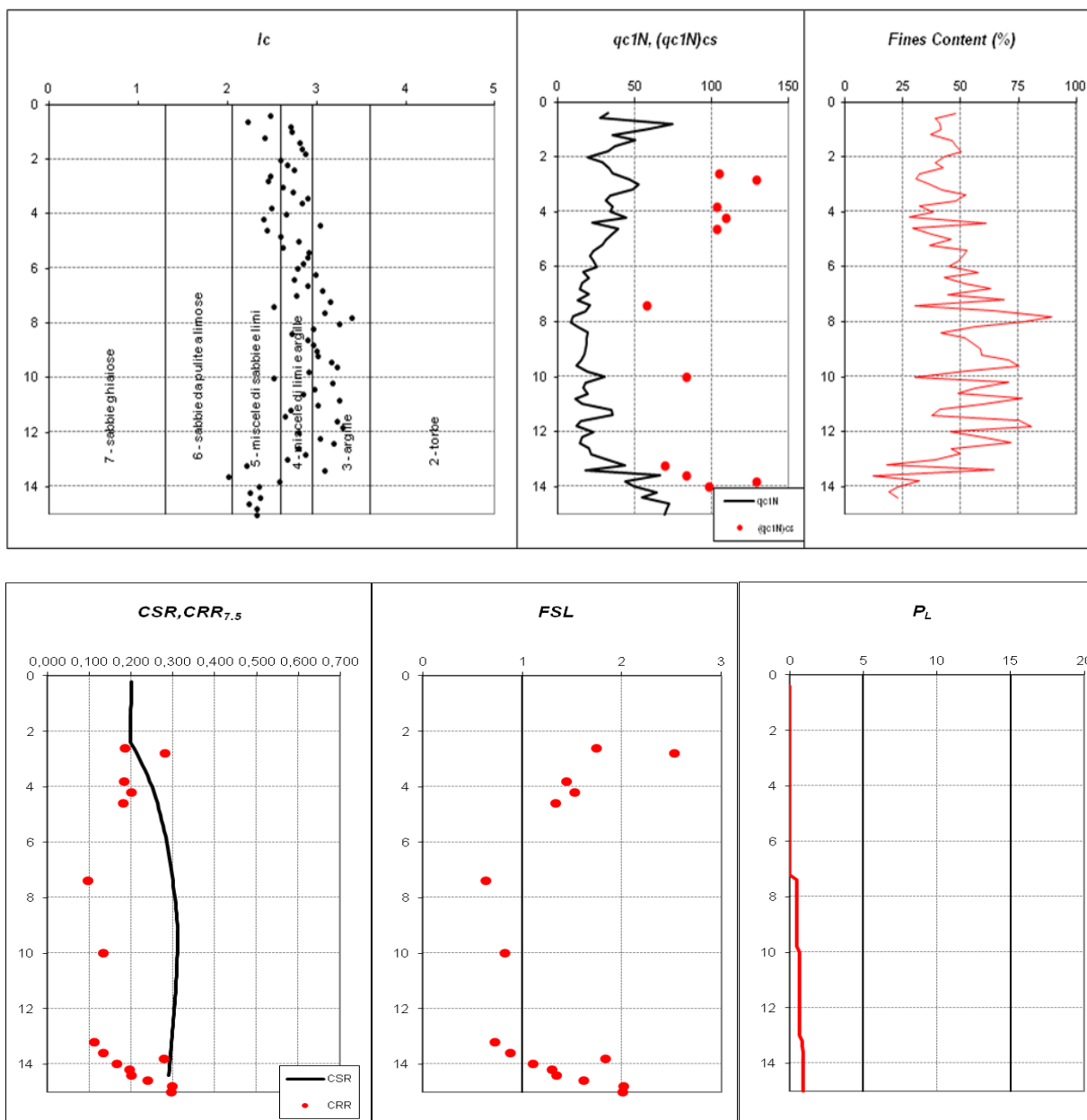
In allegato vengono riportate le tabelle riassuntive dei valori calcolati per ogni prova CPT eseguita (v. grafici e tabelle in **Relazione Geologica Piano Particolareggiato**):

### CPT1

prof	sv0	u	s' v0	CSR	LP	LL	Fs	Q	lc	classe	CRR	FSL	PL
0,2	0,037	0	0,037	0,201	---	---							
0,4	0,074	0	0,074	0,201	9	18	0,600	120,622	2,474	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0,6	0,111	0	0,111	0,201	14	21	0,467	125,126	2,221	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0,8	0,148	0	0,148	0,200	11	26	1,000	73,324	2,711	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1	0,185	0	0,185	0,200	11	24	0,867	58,459	2,722	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,2	0,222	0	0,222	0,200	17	27	0,667	75,577	2,417	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
1,4	0,259	0	0,259	0,199	13	30	1,133	49,193	2,805	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,6	0,296	0	0,296	0,199	11	23	0,800	36,162	2,835	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,8	0,333	0	0,333	0,199	11	23	0,800	32,033	2,872	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
2	0,37	0	0,37	0,198	12	17	0,333	31,432	2,589	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
2,2	0,407	0	0,407	0,198	12	18	0,400	28,484	2,674	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
2,4	0,444	0,001	0,443	0,198	15	26	0,733	32,858	2,741	limo arg. - argilla	-	-	0,000
2,6	0,481	0,021	0,46	0,207	20	28	0,533	42,433	2,478	sabbia lim.-limo	0,187	1,750	0,000
2,8	0,518	0,041	0,477	0,214	27	40	0,867	55,518	2,447	sabbia lim.-limo	0,280	2,530	0,000
3	0,555	0,061	0,494	0,221	26	46	1,333	51,508	2,618	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,2	0,592	0,081	0,511	0,228	25	50	1,667	47,765	2,725	limo arg. - argilla	-	-	0,000

3,4	0,629	0,101	0,528	0,234	18	40	1,467	32,900	2,902	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,6	0,666	0,121	0,545	0,239	17	32	1,000	29,971	2,829	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,8	0,703	0,141	0,562	0,245	23	32	0,600	39,674	2,495	sabbia lim.-limo	0,183	1,446	0,000
4	0,74	0,161	0,579	0,250	20	31	0,733	33,264	2,653	limo arg. - argilla	-	-	0,000
4,2	0,777	0,181	0,596	0,254	30	41	0,733	49,032	2,406	sabbia lim.-limo	0,201	1,528	0,000
4,4	0,814	0,201	0,613	0,259	14	31	1,133	21,511	3,035	argilla	-	-	0,000
4,6	0,851	0,221	0,63	0,263	28	38	0,667	43,094	2,442	sabbia lim.-limo	0,182	1,341	0,000
4,8	0,888	0,241	0,647	0,266	29	46	1,133	43,450	2,586	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
5	0,925	0,261	0,664	0,270	21	38	1,133	30,233	2,801	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,2	0,962	0,281	0,681	0,273	20	28	0,533	27,956	2,622	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,4	0,999	0,301	0,698	0,276	16	29	0,867	21,491	2,915	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,6	1,036	0,321	0,715	0,279	15	25	0,667	19,530	2,891	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,8	1,073	0,341	0,732	0,282	17	28	0,733	21,758	2,845	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6	1,11	0,361	0,749	0,285	19	30	0,733	23,885	2,781	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6,2	1,147	0,381	0,766	0,287	13	22	0,600	15,474	2,984	argilla	-	-	0,000
6,4	1,184	0,401	0,783	0,290	16	22	0,400	18,922	2,745	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6,6	1,221	0,421	0,8	0,292	13	19	0,400	14,724	2,892	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6,8	1,258	0,441	0,817	0,294	12	21	0,600	13,148	3,065	argilla	-	-	0,000
7	1,295	0,461	0,834	0,296	17	24	0,467	18,831	2,772	limo arg. - argilla	-	-	0,000
7,2	1,332	0,481	0,851	0,298	11	20	0,600	11,361	3,144	argilla	-	-	0,000
7,4	1,369	0,501	0,868	0,300	19	22	0,200	20,312	2,510	sabbia lim.-limo	0,098	0,632	0,472
7,6	1,406	0,521	0,885	0,302	16	33	1,133	16,490	3,087	argilla	-	-	0,000
7,8	1,443	0,541	0,902	0,303	9	21	0,800	8,378	3,395	argilla	-	-	0,000
8	1,48	0,561	0,919	0,305	8	13	0,333	7,095	3,253	argilla	-	-	0,000
8,2	1,517	0,581	0,936	0,306	13	19	0,400	12,268	2,962	argilla	-	-	0,000
8,4	1,554	0,601	0,953	0,307	19	25	0,400	18,306	2,715	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,6	1,591	0,621	0,97	0,309	18	28	0,667	16,916	2,893	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,8	1,628	0,641	0,987	0,310	19	33	0,933	17,601	2,958	argilla	-	-	0,000
9	1,665	0,661	1,004	0,311	18	32	0,933	16,270	3,002	argilla	-	-	0,000
9,2	1,702	0,681	1,021	0,312	18	32	0,933	15,963	3,008	argilla	-	-	0,000
9,4	1,739	0,701	1,038	0,312	16	34	1,200	13,739	3,169	argilla	-	-	0,000
9,6	1,776	0,721	1,055	0,311	13	26	0,867	10,639	3,227	argilla	-	-	0,000
9,8	1,813	0,741	1,072	0,311	21	34	0,867	17,898	2,904	limo arg. - argilla	-	-	0,000
10	1,85	0,761	1,089	0,310	33	42	0,600	28,604	2,514	sabbia lim.-limo	0,133	0,831	0,172
10,2	1,887	0,781	1,106	0,310	20	48	1,867	16,377	3,174	argilla	-	-	0,000
10,4	1,924	0,801	1,123	0,309	19	31	0,800	15,206	2,968	argilla	-	-	0,000
10,6	1,961	0,821	1,14	0,309	22	33	0,733	17,578	2,852	limo arg. - argilla	-	-	0,000
10,8	1,998	0,841	1,157	0,308	13	25	0,800	9,509	3,247	argilla	-	-	0,000
11	2,035	0,861	1,174	0,307	19	32	0,867	14,451	3,009	argilla	-	-	0,000
11,2	2,072	0,881	1,191	0,307	42	70	1,867	33,525	2,712	limo arg. - argilla	-	-	0,000
11,4	2,109	0,901	1,208	0,306	43	66	1,533	33,850	2,643	limo arg. - argilla	-	-	0,000
11,6	2,146	0,921	1,225	0,305	19	45	1,733	13,758	3,228	argilla	-	-	0,000
11,8	2,183	0,941	1,242	0,304	15	33	1,200	10,320	3,292	argilla	-	-	0,000
12	2,22	0,961	1,259	0,303	29	44	1,000	21,271	2,793	limo arg. - argilla	-	-	0,000
12,2	2,257	0,981	1,276	0,302	20	34	0,933	13,905	3,030	argilla	-	-	0,000
12,4	2,294	1,001	1,293	0,301	19	40	1,400	12,920	3,187	argilla	-	-	0,000
12,6	2,331	1,021	1,31	0,300	27	39	0,800	18,831	2,795	limo arg. - argilla	-	-	0,000
12,8	2,368	1,041	1,327	0,299	29	47	1,200	20,069	2,865	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13	2,405	1,061	1,344	0,298	42	63	1,400	29,461	2,670	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13,2	2,442	1,081	1,361	0,297	55	62	0,467	38,617	2,216	sabbia lim.-limo	0,111	0,723	0,194
13,4	2,479	1,101	1,378	0,296	25	51	1,733	16,343	3,087	argilla	-	-	0,000
13,6	2,516	1,121	1,395	0,295	85	94	0,600	59,128	2,013	sabbie da pulite a	0,134	0,878	0,080
13,8	2,553	1,141	1,412	0,293	57	85	1,867	38,560	2,575	sabbia lim.-limo	0,278	1,835	0,000
14	2,59	1,161	1,429	0,292	65	82	1,133	1,816	2,353	sabbia lim.-limo	0,167	1,106	0,000

14,2	2,627	1,181		1,446	0,291	85	106	1,400	56,966	2,246	sabbia lim.-limo	0,196	1,301	0,000
14,4	2,664	1,201		1,463	0,290	73	95	1,467	48,077	2,359	sabbia lim.-limo	0,201	1,342	0,000
14,6	2,701	1,221		1,48	0,288	97	124	1,800	63,716	2,242	sabbia lim.-limo	0,241	1,616	0,000
14,8	2,738	1,241		1,497	0,287	96	130	2,267	62,299	2,321	sabbia lim.-limo	0,299	2,015	0,000
15	2,775	1,261		1,514	0,286	95	129	2,267	60,915	2,331	sabbia lim.-limo	0,296	2,008	0,000



Il calcolo ha evidenziato come non sussiste il rischio di liquefazione in caso di sisma, dai grafici sopra si evidenzia che il **fattore di sicurezza  $FSL \geq 1$**  mentre il **potenziale di liquefazione è nullo  $PL = 0$** . La verifica è stata effettuata fino a 15 m di profondità, con falda a -2,4 m e magnitudo massima attesa pari a  $M = 6,1$ , l'accelerazione di gravità per la zona 2 è  $a_g = 0,25g$  mentre l'accelerazione massima  $A_{max} = 0,31g$  per categoria suolo C e coefficiente topografico  $S = 1,25$ .

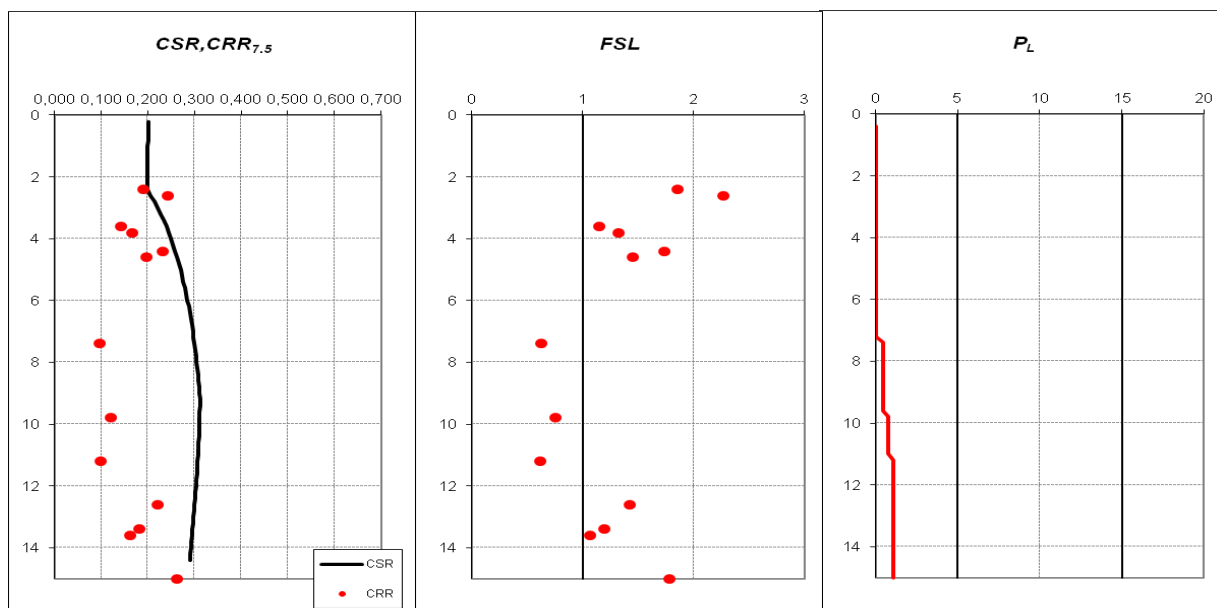
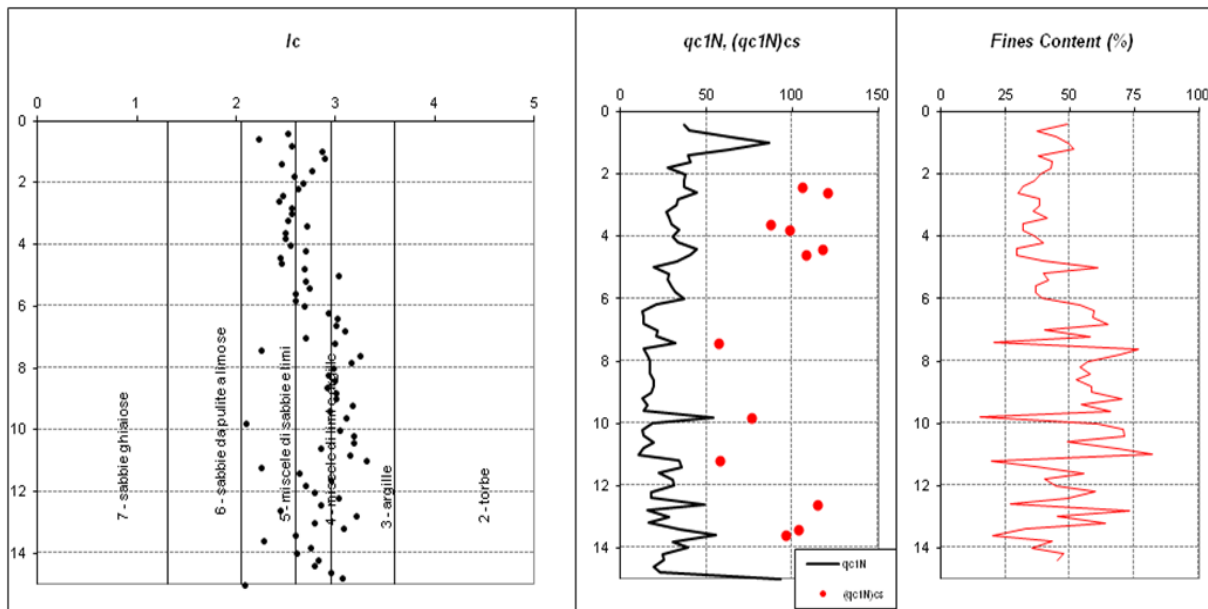


**CPT2**

prof	sv0	u	s' v0	CSR	LP	LL	Fs	Q	Ic	classe	CRR	FSL	PL
0.2	0,037	0	0,037	0,201	----	----							
0.4	0,074	0	0,074	0,201	10	22	0,800	134,135	2,515	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0.6	0,111	0	0,111	0,201	20	33	0,867	179,180	2,222	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0.8	0,148	0	0,148	0,200	25	63	2,533	167,919	2,552	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
1	0,185	0	0,185	0,200	16	53	2,467	85,486	2,862	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1.2	0,222	0	0,222	0,200	14	42	1,867	62,063	2,889	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1.4	0,259	0	0,259	0,199	20	33	0,867	76,220	2,448	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
1.6	0,296	0	0,296	0,199	12	23	0,733	39,541	2,752	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1.8	0,333	0	0,333	0,199	16	26	0,667	47,048	2,579	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
2	0,37	0	0,37	0,198	14	23	0,600	36,838	2,664	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
2.2	0,407	0	0,407	0,198	15	23	0,533	35,855	2,617	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
2.4	0,444	0,001	0,443	0,198	20	28	0,533	44,144	2,464	sabbia lim.-limo	0,190	1,855	0,000
2.6	0,481	0,021	0,46	0,207	25	36	0,733	53,302	2,432	sabbia lim.-limo	0,242	2,267	0,000
2.8	0,518	0,041	0,477	0,214	23	36	0,867	47,132	2,548	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
3	0,555	0,061	0,494	0,221	23	36	0,867	45,435	2,559	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
3.2	0,592	0,081	0,511	0,228	19	26	0,467	36,023	2,510	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
3.4	0,629	0,101	0,528	0,234	15	23	0,533	27,218	2,710	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3.6	0,666	0,121	0,545	0,239	19	25	0,400	33,640	2,491	sabbia lim.-limo	0,142	1,145	0,000
3.8	0,703	0,141	0,562	0,245	22	30	0,533	37,895	2,489	sabbia lim.-limo	0,167	1,324	0,000
4	0,74	0,161	0,579	0,250	23	33	0,667	38,446	2,536	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
4.2	0,777	0,181	0,596	0,254	20	32	0,800	32,253	2,689	limo arg. - argilla	-	-	0,000
4.4	0,814	0,201	0,613	0,259	31	44	0,867	49,243	2,445	sabbia lim.-limo	0,232	1,733	0,000
4.6	0,851	0,221	0,63	0,263	29	40	0,733	44,681	2,447	sabbia lim.-limo	0,197	1,449	0,000
4.8	0,888	0,241	0,647	0,266	21	33	0,800	31,085	2,687	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5	0,925	0,261	0,664	0,270	13	26	0,867	18,185	3,032	argilla	-	-	0,000
5.2	0,962	0,281	0,681	0,273	19	28	0,600	26,488	2,688	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5.4	0,999	0,301	0,698	0,276	19	29	0,667	25,789	2,727	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5.6	1,036	0,321	0,715	0,279	25	36	0,733	33,516	2,587	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
5.8	1,073	0,341	0,732	0,282	27	40	0,867	35,419	2,594	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
6	1,11	0,361	0,749	0,285	28	46	1,200	35,901	2,676	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6.2	1,147	0,381	0,766	0,287	16	28	0,800	19,390	2,928	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6.4	1,184	0,401	0,783	0,290	10	15	0,333	11,259	3,013	argilla	-	-	0,000
6.6	1,221	0,421	0,8	0,292	11	17	0,400	12,224	3,006	argilla	-	-	0,000
6.8	1,258	0,441	0,817	0,294	11	19	0,533	11,924	3,093	argilla	-	-	0,000
7	1,295	0,461	0,834	0,296	18	24	0,400	20,030	2,694	limo arg. - argilla	-	-	0,000
7.2	1,332	0,481	0,851	0,298	18	35	1,133	19,586	2,993	argilla	-	-	0,000
7.4	1,369	0,501	0,868	0,300	29	32	0,200	31,833	2,244	sabbia lim.-limo	0,097	0,626	0,479
7.6	1,406	0,521	0,885	0,302	12	27	1,000	11,971	3,246	argilla	-	-	0,000
7.8	1,443	0,541	0,902	0,303	14	29	1,000	13,921	3,148	argilla	-	-	0,000
8	1,48	0,561	0,919	0,305	16	27	0,733	15,800	2,976	argilla	-	-	0,000
8.2	1,517	0,581	0,936	0,306	16	25	0,600	15,473	2,928	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8.4	1,554	0,601	0,953	0,307	16	27	0,733	15,158	2,991	argilla	-	-	0,000
8.6	1,591	0,621	0,97	0,309	19	31	0,800	17,947	2,908	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8.8	1,628	0,641	0,987	0,310	19	35	1,067	17,601	2,997	argilla	-	-	0,000
9	1,665	0,661	1,004	0,311	18	32	0,933	16,270	3,002	argilla	-	-	0,000
9.2	1,702	0,681	1,021	0,312	13	24	0,733	11,066	3,165	argilla	-	-	0,000
9.4	1,739	0,701	1,038	0,312	16	24	0,533	13,739	2,942	limo arg. - argilla	-	-	0,000
9.6	1,776	0,721	1,055	0,311	14	24	0,667	11,587	3,101	argilla	-	-	0,000
9.8	1,813	0,741	1,072	0,311	57	64	0,467	51,480	2,099	sabbia lim.-limo	0,122	0,757	0,253
10	1,85	0,761	1,089	0,310	20	38	1,200	16,667	3,036	argilla	-	-	0,000
10.2	1,887	0,781	1,106	0,310	14	26	0,800	10,952	3,173	argilla	-	-	0,000
10.4	1,924	0,801	1,123	0,309	15	29	0,933	11,644	3,175	argilla	-	-	0,000
10.6	1,961	0,821	1,14	0,309	22	33	0,733	17,578	2,852	limo arg. - argilla	-	-	0,000
10.8	1,998	0,841	1,157	0,308	16	30	0,933	12,102	3,143	argilla	-	-	0,000
11	2,035	0,861	1,174	0,307	12	24	0,800	8,488	3,312	argilla	-	-	0,000
11.2	2,072	0,881	1,191	0,307	39	43	0,267	31,006	2,253	sabbia lim.-limo	0,098	0,619	0,343
11.4	2,109	0,901	1,208	0,306	43	65	1,467	33,850	2,630	limo arg. - argilla	-	-	0,000
11.6	2,146	0,921	1,225	0,305	27	50	1,533	20,289	2,953	argilla	-	-	0,000
11.8	2,183	0,941	1,242	0,304	38	58	1,333	28,838	2,692	limo arg. - argilla	-	-	0,000
12	2,22	0,961	1,259	0,303	39	67	1,867	29,214	2,779	limo arg. - argilla	-	-	0,000
12.2	2,257	0,981	1,276	0,302	23	42	1,267	16,256	3,021	argilla	-	-	0,000
12.4	2,294	1,001	1,293	0,301	23	33	0,667	16,014	2,849	limo arg. - argilla	-	-	0,000
12.6	2,331	1,021	1,31	0,300	60	82	1,467	44,022	2,445	sabbia lim.-limo	0,220	1,420	0,000
12.8	2,368	1,041	1,327	0,299	21	48	1,800	14,041	3,203	argilla	-	-	0,000
13	2,405	1,061	1,344	0,298	38	63	1,667	26,484	2,786	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13.2	2,442	1,081	1,361	0,297	22	41	1,267	14,370	3,078	argilla	-	-	0,000
13.4	2,479	1,101	1,378	0,296	44	61	1,133	30,131	2,590	sabbia lim.-limo	0,182	1,192	0,000
13.6	2,516	1,121	1,395	0,295	71	87	1,067	49,092	2,272	sabbia lim.-limo	0,162	1,066	0,000
13.8	2,553	1,141	1,412	0,293	43	70	1,800	28,645	2,746	limo arg. - argilla	-	-	0,000
14	2,59	1,161	1,429	0,292	56	85	1,933	37,376	2,601	limo arg. - argilla	-	-	0,000



14,2	2,627	1,181	1,446	0,291	36	59	1,533	23,080	2,825	limo arg. - argilla lim.	-	-	0,000
14,4	2,664	1,201	1,463	0,290	37	58	1,400	23,470	2,785	limo arg. - argilla lim.	-	-	0,000
14,6	2,701	1,221	1,48	0,288	29	50	1,400	17,770	2,953	argilla	-	-	0,000
14,8	2,738	1,241	1,497	0,287	35	81	3,067	21,551	3,065	argilla	-	-	0,000
15	2,775	1,261	1,514	0,286	127	154	1,800	82,051	2,080	sabbia lim.-limo sab.	0,263	1,783	0,000

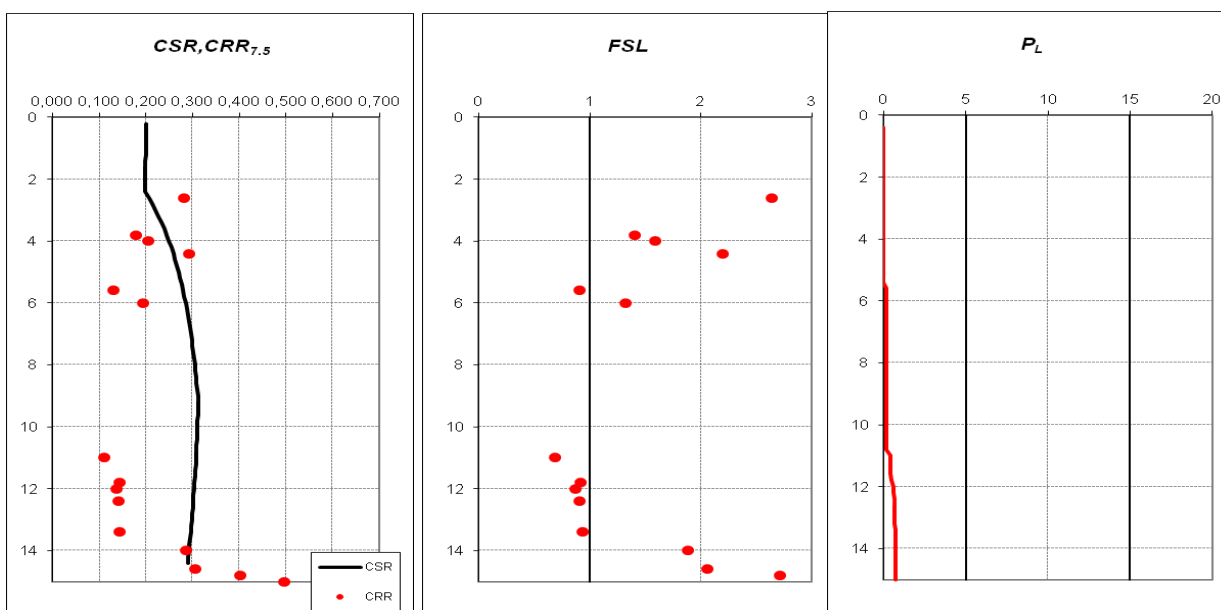
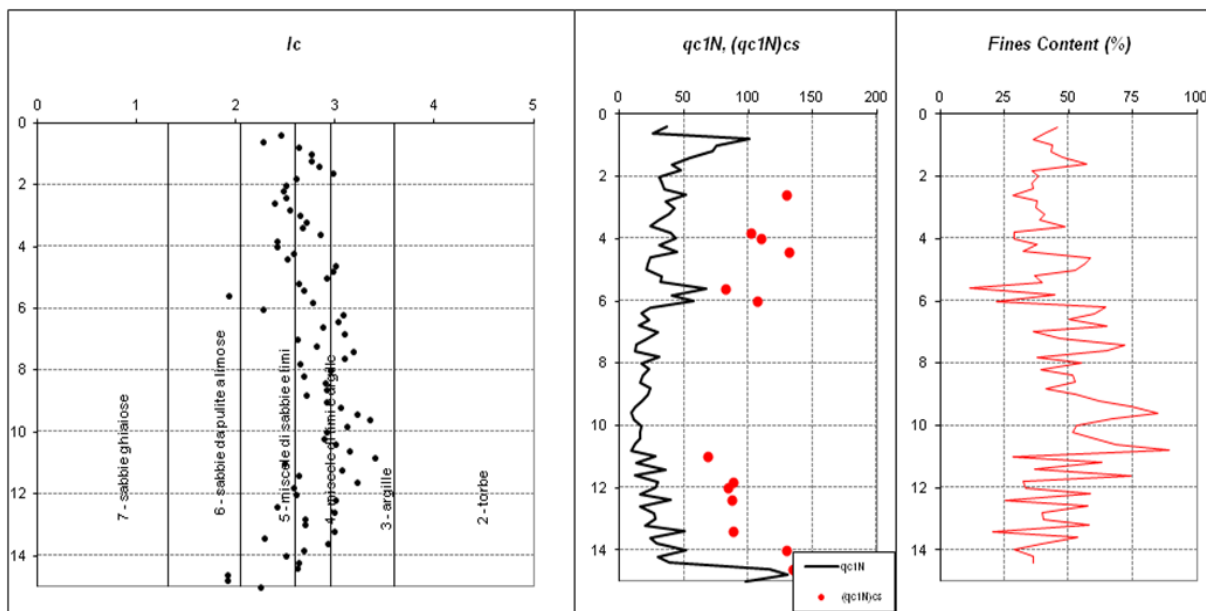


Il calcolo ha evidenziato come non sussiste il rischio di liquefazione in caso di sisma, dai grafici sopra si evidenzia che il **fattore di sicurezza FSL  $\geq 1$**  mentre il **potenziale di liquefazione è nullo PL = 0**. La verifica è stata effettuata fino a 15 m di profondità, con falda a -2,4 m e magnitudo massima attesa pari a  $M = 6,1$ , l'accelerazione di gravità per la zona 2 è  $ag = 0,25g$  mentre l'accelerazione massima  $Amax = 0,31g$  per categoria suolo C e coefficiente topografico  $S = 1,25$ .

**CPT3**

prof	sv0	u	s' v0	CSR	LP	LL	Fs	Q	Ic	classe	CRR	FSL	PL
0,2	0,037	0	0,037	0,201	----	----							
0,4	0,074	0	0,074	0,201	10	20	0,667	134,135	2,448	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0,6	0,111	0	0,111	0,201	13	20	0,467	116,117	2,267	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
0,8	0,148	0	0,148	0,200	15	35	1,333	100,351	2,623	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1	0,185	0	0,185	0,200	14	36	1,467	74,676	2,756	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,2	0,222	0	0,222	0,200	16	40	1,600	71,072	2,752	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,4	0,259	0	0,259	0,199	14	35	1,400	53,054	2,830	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
1,6	0,296	0	0,296	0,199	12	34	1,467	39,541	2,980	argilla	-	5,000	0,000
1,8	0,333	0	0,333	0,199	16	27	0,733	47,048	2,608	limo arg. - argilla	-	5,000	0,000
2	0,37	0	0,37	0,198	19	29	0,667	50,351	2,504	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
2,2	0,407	0	0,407	0,198	21	31	0,667	50,597	2,472	sabbia lim.-limo	-	5,000	0,000
2,4	0,444	0,001	0,443	0,198	23	35	0,800	50,916	2,498	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
2,6	0,481	0,021	0,46	0,207	29	42	0,867	61,998	2,390	sabbia lim.-limo	0,281	2,635	0,000
2,8	0,518	0,041	0,477	0,214	25	40	1,000	51,325	2,540	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
3	0,555	0,061	0,494	0,221	21	35	0,933	41,387	2,639	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,2	0,592	0,081	0,511	0,228	20	35	1,000	37,980	2,703	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,4	0,629	0,101	0,528	0,234	16	24	0,533	29,112	2,669	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,6	0,666	0,121	0,545	0,239	13	22	0,600	22,631	2,848	limo arg. - argilla	-	-	0,000
3,8	0,703	0,141	0,562	0,245	26	35	0,600	45,012	2,418	sabbia lim.-limo	0,178	1,407	0,000
4	0,74	0,161	0,579	0,250	29	40	0,733	48,808	2,417	sabbia lim.-limo	0,205	1,591	0,000
4,2	0,777	0,181	0,596	0,254	24	36	0,800	38,965	2,573	sabbia lim.-limo	-	-	0,000
4,4	0,814	0,201	0,613	0,259	31	47	1,067	49,243	2,507	sabbia lim.-limo	0,293	2,194	0,000
4,6	0,851	0,221	0,63	0,263	15	32	1,133	22,459	3,000	argilla	-	-	0,000
4,8	0,888	0,241	0,647	0,266	14	27	0,867	20,266	2,974	argilla	-	-	0,000
5	0,925	0,261	0,664	0,270	14	24	0,667	19,691	2,907	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,2	0,962	0,281	0,681	0,273	22	32	0,667	30,893	2,623	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,4	0,999	0,301	0,698	0,276	22	34	0,800	30,087	2,685	limo arg. - argilla	-	-	0,000
5,6	1,036	0,321	0,715	0,279	52	57	0,333	71,278	1,920	sabbie da pulite a	0,131	0,909	0,133
5,8	1,073	0,341	0,732	0,282	30	59	1,933	39,518	2,773	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6	1,11	0,361	0,749	0,285	46	59	0,867	59,933	2,265	sabbia lim.-limo	0,195	1,322	0,000
6,2	1,147	0,381	0,766	0,287	18	44	1,733	22,001	3,084	argilla	-	-	0,000
6,4	1,184	0,401	0,783	0,290	13	23	0,667	15,091	3,023	argilla	-	-	0,000
6,6	1,221	0,421	0,8	0,292	18	30	0,800	20,974	2,867	limo arg. - argilla	-	-	0,000
6,8	1,258	0,441	0,817	0,294	12	22	0,667	13,148	3,095	argilla	-	-	0,000
7	1,295	0,461	0,834	0,296	25	35	0,667	28,423	2,618	limo arg. - argilla	-	-	0,000
7,2	1,332	0,481	0,851	0,298	18	27	0,600	19,586	2,811	limo arg. - argilla	-	-	0,000
7,4	1,369	0,501	0,868	0,300	11	21	0,667	11,096	3,182	argilla	-	-	0,000
7,6	1,406	0,521	0,885	0,302	11	18	0,467	10,841	3,093	argilla	-	-	0,000
7,8	1,443	0,541	0,902	0,303	28	41	0,867	29,442	2,648	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8	1,48	0,561	0,919	0,305	16	26	0,667	15,800	2,950	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,2	1,517	0,581	0,936	0,306	21	28	0,467	20,815	2,681	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,4	1,554	0,601	0,953	0,307	17	26	0,600	16,208	2,895	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,6	1,591	0,621	0,97	0,309	16	24	0,533	14,855	2,912	limo arg. - argilla	-	-	0,000
8,8	1,628	0,641	0,987	0,310	24	34	0,667	22,667	2,710	limo arg. - argilla	-	-	0,000
9	1,665	0,661	1,004	0,311	22	38	1,067	20,254	2,906	limo arg. - argilla	-	-	0,000
9,2	1,702	0,681	1,021	0,312	18	34	1,067	15,963	3,047	argilla	-	-	0,000
9,4	1,739	0,701	1,038	0,312	13	26	0,867	10,849	3,219	argilla	-	-	0,000
9,6	1,776	0,721	1,055	0,311	10	20	0,667	7,795	3,343	argilla	-	-	0,000
9,8	1,813	0,741	1,072	0,311	12	19	0,467	9,503	3,122	argilla	-	-	0,000
10	1,85	0,761	1,089	0,310	18	27	0,600	14,830	2,914	limo arg. - argilla	-	-	0,000
10,2	1,887	0,781	1,106	0,310	18	26	0,533	14,569	2,889	limo arg. - argilla	-	-	0,000
10,4	1,924	0,801	1,123	0,309	18	30	0,800	14,315	3,005	argilla	-	-	0,000
10,6	1,961	0,821	1,14	0,309	14	24	0,667	10,561	3,137	argilla	-	-	0,000
10,8	1,998	0,841	1,157	0,308	11	24	0,867	7,780	3,392	argilla	-	-	0,000
11	2,035	0,861	1,174	0,307	31	37	0,400	24,672	2,483	sabbia lim.-limo	0,110	0,691	0,285
11,2	2,072	0,881	1,191	0,307	16	26	0,667	11,694	3,063	argilla	-	-	0,000
11,4	2,109	0,901	1,208	0,306	43	65	1,467	33,850	2,630	limo arg. - argilla	-	-	0,000
11,6	2,146	0,921	1,225	0,305	15	29	0,933	10,493	3,214	argilla	-	-	0,000
11,8	2,183	0,941	1,242	0,304	35	46	0,733	26,423	2,580	sabbia lim.-limo	0,143	0,913	0,073
12	2,22	0,961	1,259	0,303	33	43	0,667	24,448	2,599	sabbia lim.-limo	0,136	0,869	0,108
12,2	2,257	0,981	1,276	0,302	21	35	0,933	14,689	2,997	argilla	-	-	0,000
12,4	2,294	1,001	1,293	0,301	48	60	0,800	35,349	2,415	sabbia lim.-limo	0,142	0,911	0,070
12,6	2,331	1,021	1,31	0,300	21	34	0,867	14,251	2,987	argilla	-	-	0,000
12,8	2,368	1,041	1,327	0,299	36	52	1,067	25,344	2,689	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13	2,405	1,061	1,344	0,298	37	54	1,133	25,740	2,693	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13,2	2,442	1,081	1,361	0,297	27	50	1,533	18,044	2,994	argilla	-	-	0,000
13,4	2,479	1,101	1,378	0,296	64	77	0,867	44,645	2,277	sabbia lim.-limo	0,143	0,938	0,042
13,6	2,516	1,121	1,395	0,295	34	64	2,000	22,569	2,928	limo arg. - argilla	-	-	0,000
13,8	2,553	1,141	1,412	0,293	41	60	1,267	27,229	2,676	limo arg. - argilla	-	-	0,000
14	2,59	1,161	1,429	0,292	67	97	2,000	45,073	2,496	sabbia lim.-limo	0,285	1,887	0,000

14,2	2,627	1,181	1,446	0,291	43	60	1,133	27,920	2,623	limo arg. - argilla lim.	-	-	0,000
14,4	2,664	1,201	1,463	0,290	56	86	2,000	36,457	2,619	limo arg. - argilla lim.	-	-	0,000
14,6	2,701	1,221	1,48	0,288	156	180	1,600	103,580	1,911	sabbie da pulite a	0,307	2,058	0,000
14,8	2,738	1,241	1,497	0,287	177	208	2,067	116,407	1,909	sabbie da pulite a	0,403	2,715	0,000
15	2,775	1,261	1,514	0,286	134	186	3,467	86,674	2,246	sabbia lim.-limo sab.	0,496	3,362	0,000



Il calcolo ha evidenziato come non sussiste il rischio di liquefazione in caso di sisma, dai grafici sopra si evidenzia che il **fattore di sicurezza  $FSL \geq 1$**  mentre il **potenziale di liquefazione è nullo  $PL = 0$** . La verifica è stata effettuata fino a 15 m di profondità, con falda a -2,35 m e magnitudo massima attesa pari a  $M = 6,1$ , l'accelerazione di gravità per la zona 2 è  $ag = 0,25g$  mentre l'accelerazione massima  $Amax = 0,31g$  per categoria suolo C e coefficiente topografico  $S = 1,25$ .

## STIMA DEI CEDIMENTI POST-SISMICI

Nel presente capitolo viene fatta una stima dei cosiddetti cedimenti post-sismici, ossia dei cedimenti permanenti di riconsolidazione conseguenti ad un terremoto. Un'azione dinamica, quale quella dovuta a un evento sismico, può produrre in terreni molli (terreni coesivi) o poco addensati (terreni granulari) un riordino dello scheletro solido che si traduce in un addensamento e quindi in una consolidazione, determinando così un cedimento, denominato appunto “cedimento post-sismico”.

Il cedimento post-sismico:

- è conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali (pressioni neutre) che si possono accumulare durante un terremoto (la dissipazione di tali pressioni neutre può generare dei cedimenti permanenti anche se non si raggiunge la condizione di liquefazione);
- può verificarsi sia in terreni granulari poco addensati e in presenza di falda ad una certa profondità dal piano campagna (generalmente a quote inferiori ai 15 metri da p.c.), sia in terreni coesivi soffici.

La stima viene effettuata con riferimento a disposizioni normative e a metodi proposti da vari autori della letteratura scientifica che hanno analizzato il fenomeno.

A livello normativo la D.A.L. 112/2007 della Regione Emilia Romagna all'Allegato 3 fornisce le “Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento”; la delibera stabilisce i criteri per una caratterizzazione sismica piuttosto spinta, quali la stima del potenziale di liquefazione, i cedimenti post-sismici in terreni granulari (saturi e non) e coesivi, l'identificazione dei pendii potenzialmente instabili. Le procedure indicate dalla D.A.L. 112/2007 sono sostanzialmente identiche a quelle indicate nel documento “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica – Parte I e Parte II” della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile (Settembre 2008).

Nello studio in questione la stima dei cedimenti post-sismici è stata condotta con riferimento:

- alla procedura di cui all'Allegato 3 della D.A.L. 112/2007 della Regione Emilia Romagna per i terreni coesivi;
- al metodo di Tokimatsu e Seed (1987) per gli strati di terreno granulari saturi.

Il cedimento post-sismico viene valutato in depositi coesivi molto soffici ( $C_u \leq 70$  kPa) e plastici ( $I_p \geq 30\%$ ) in cui si prevede un incremento di pressioni interstiziali  $\Delta u / \sigma'_0 \geq 0.3$  durante il terremoto di riferimento.

L'entità dei cedimenti di riconsolidazione (cedimenti post-sismici) può essere valutata con l'espressione:

$$\Delta H = \epsilon_{vr} \cdot H$$

dove H è l'altezza dello spessore dello strato e  $\epsilon_{vr}$  è la deformazione volumetrica post-ciclica

data dalla seguente espressione:

$$\epsilon_{vr} = (\alpha Cr) / (1 + e_0) \log [ 1 / (1 - \Delta u / \sigma'_0) ]$$

- $\alpha$  = costante sperimentale compresa tra 1 e 1,5;
- $e_0$  = indice dei vuoti iniziale;
- $Cr$  = indice di riconsolidazione post-ciclica ricavabile in prima approssimazione dalla relazione:

$$Cr = 0.225 Cc$$

- $Cc$  = indice di compressione
- $\Delta u / \sigma'_0$  = incremento delle pressioni interstiziali durante il sisma

In prima approssimazione  $Cc$  può essere stimato con la relazione empirica

$$Cc = 0.0348 + 0.0162 I_p$$

Dalla bibliografia risulta che tale parametro può essere anche stimato tramite la relazione:

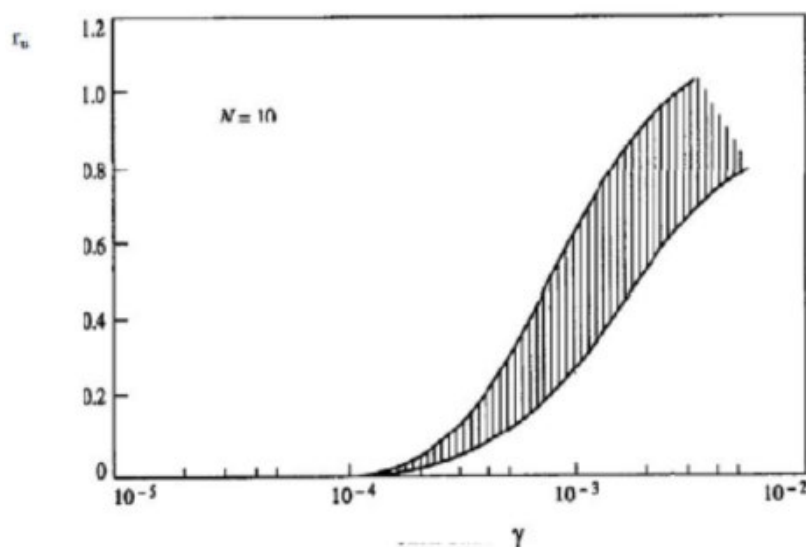
$$Cc = (1 + e_0) \sigma_{va} / 0.435 M_0$$

$M_0$  = modulo di deformazione edometrica

$\sigma_{va}$  = carico verticale efficace.

Il rapporto di pressione interstiziale  $\Delta u / \sigma'_0$  può essere valutato con l'abaco di figura 10 dell'Allegato A3 della D.A.L. 112/2007 in funzione dell'ampiezza della deformazione di taglio massima indotta dal terremoto.

$$\gamma_{max} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$



**Figura 10:** Valore del rapporto di pressione interstiziale  $r_u$  in funzione della deformazione di taglio indotta dal terremoto

Il calcolo dei cedimenti post – sismici in terreni granulari saturi, secondo il metodo Tokimatsu e Seed (1987), ha origine dalla seguente formula:

$$\Delta H = \varepsilon_v \cdot H_0$$

in cui  $H_0$  è la potenza dello strato deformabile e  $\varepsilon_v$  è la deformazione volumetrica unitaria.

I cedimenti indotti dipendono dallo stato di addensamento, dall'entità della deformazione di taglio e dell'incremento delle pressioni neutre  $\Delta u$  indotte dal sisma.

La deformazione volumetrica  $\varepsilon_v$  viene stimata attraverso un abaco proposto dai citati Tokimatsu e Seed, ricavato per sabbie pulite.

Per la stima della deformazione volumetrica  $\varepsilon_v$  tramite l'abaco occorre conoscere il valore dei parametri:

- $CSR_M = 7.5$  la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma, normalizzata per terremoti di magnitudo  $M = 7.5$
- $(N1)_{60}$  = numero di colpi  $N_{spt}$  corretto.

La procedura suggerisce che la stima delle deformazioni venga eseguita per terreni incoerenti con densità relativa  $< 75\%$ .

**Nota:** Esistono delle relazioni empiriche che consentono di valutare, in modo approssimato, l'indice di compressione. Nel caso di terreni granulari sono funzioni della densità relativa, nel caso di terreni coesivi dell'indice di plasticità.

Nel caso di terreni coesivi, *Loadcap* calcola il rapporto di pressione interstiziale come:

$$\Delta u / \sigma'_0 = \beta [ \log ( \gamma_{max} / \gamma_v ) ]$$

dove  $\sigma'_0$  è il valore iniziale della pressione media efficace alla profondità considerata;

$$\sigma'_0 = \sigma'_{v0} ( 1 + 2k_0 ) / 3$$

$\sigma'_{v0}$  è la pressione verticale efficace e  $k_0$  il coefficiente di spinta a riposo

$\gamma_{max}$  è la deformazione di taglio massima raggiunta durante il sisma;

$\beta$  è posto circa uguale a 0.45 (*coefficiente sperimentale*);

$\gamma_v$  è la deformazione di soglia volumetrica, determinabile da prove cicliche di laboratorio.

Ma può anche essere valutata, in prima approssimazione, con la relazione che segue

$$\gamma_v = A (OCR-1) + B$$

OCR è il grado di sovraconsolidazione, A e B sono coefficienti sperimentali che possono essere calcolati per interpolazione lineare dalla Tab 4.7.5.1.

<b>I<sub>p</sub> [%]</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
20	0.4 10 <sup>-3</sup>	0.6 10 <sup>-3</sup>
40	1.2 10 <sup>-3</sup>	1.1 10 <sup>-3</sup>
55	2.5 10 <sup>-3</sup>	1.2 10 <sup>-3</sup>

**Tab.4.7.5.1** - Valori suggeriti per i coefficienti A e B

Il rapporto di pressione interstiziale, nel caso di terreni incoerenti liquefacibili, viene determinato per interpolazione lineare dai valori riportati in Tab. 4.7.5.2 in funzione dell'ampiezza della deformazione massima indotta dal terreno.

<b>g<sub>max</sub> [%]</b>	<b>r<sub>u</sub>=Δ<sub>u</sub>/σ'<sub>0</sub></b>
0.005	0.2
0.1	0.4
0.2	0.6
0.4	0.8
5	0.95

**Tab. 4.7.5.2-** Rapporto di pressione interstiziale r<sub>u</sub> in funzione di γ<sub>max</sub>

L'ampiezza della deformazione di taglio massima g<sub>max</sub> si calcola dalla relazione seguente:

$$\gamma_{\max} = 0.65 ( a_{\max,s} / g ) \sigma_v r_d 1/G$$

**a<sub>max,s</sub>** è il picco di accelerazione al piano campagna del sisma di progetto;

**g** è l'accelerazione di gravità;

**σ<sub>v</sub>** è la tensione totale verticale;

**r<sub>d</sub>** coefficiente riduttivo dell'azione sismica che mette in conto la deformabilità del sottosuolo determinato dalla relazione r<sub>d</sub>=1-0.015z;

**G** modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ<sub>max</sub>

il modulo di taglio può essere determinato da prove di laboratorio o mediante la Tab. 4.7.5.3 applicando un fattore riduttivo al modulo di taglio G<sub>0</sub> (modulo di taglio a piccole deformazioni).

<b>a<sub>max,s</sub> [g]</b>	<b>G/G<sub>0</sub></b>
0.10	0.80
0.20	0.50
0.30	0.35
0.40	0.28

**Fig. 4.7.5.3-** Fattore di riduzione del modulo di taglio nei primi 20 m in funzione dell' accelerazione a<sub>max,s</sub>

## PARAMETRI DI CALCOLO DEI CEDIMENTI POST SISMICI

Dalle indagini svolte per tutte e tre le CPT risulta la presenza di livelli con  $C_u \geq 0,7 \text{ kg/cm}^2$ , la maggior parte, e alcuni livelli con  $C_u < 0,7 \text{ kg/cm}^2$ , i livelli con  $C_u > 0,7$  si possono escludere dal calcolo, tuttavia per semplificare il calcolo è stato effettuato considerando gli spessori stratigrafici e geotecnici in cui sono state suddivise le prove sulla base della modellazione stratigrafica e geotecnica comprendendo anche tali livelli.

Riepilogo delle formule impiegate per i calcoli:

$$\Delta H = \epsilon_{vr} H$$

$$\epsilon_{vr} = (\alpha Cr) / (1 + e_0) \log [ 1 / (1 - \Delta u / \sigma'_0) ] \quad \text{con } \alpha = 1.2$$

$$C_c = 0.0348 + 0.0162 I_p \quad \text{con } I_p = 20\% = 0.2$$

$$Cr = 0.225 C_c$$

$$r_u = \Delta u / \sigma'_0 = \beta [ \log ( \gamma_{\max} / \gamma_v ) ] \quad \text{con } \beta = 0.45$$

$$\gamma_v = A (OCR - 1) + B$$

$$\gamma_{\max} = 0.65 ( a_{\max,s} / g ) \sigma_v r_d 1/G \quad \text{con } g = 9.8 \text{ m/s}^2 \text{ e } G = 0.35$$

Vengono riportati in tabelle i parametri utilizzati per il calcolo dei cedimenti per ciascuna CPT:



<b>CPT 1</b>							
<b>Strato</b>	<b>spessore</b>	<b>prof.(m)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cu<sub>m</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Mo (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>OCR</b>
suolo	1.0	1.0	1.85	0.55	90	42.50	42.7
A	2.0	3.0	1.50	0.70	200	54.40	14.4
B	2.4	5.4	0.95	0.85	210	66.60	9.5
C	9.6	15.0	0.95	0.75	290	59.90	4.3

<b>Strato</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>e<sub>0</sub></b>	<b>I<sub>P</sub>(%)</b>	<b>Cc</b>	<b>Cr</b>	<b>r<sub>u</sub></b>	<b><math>\epsilon_{vr}</math></b>	<b><math>\Delta H</math></b>
suolo	1.2	0.6	0.2	0.038	0.009	0.7	0.09	0.10
A	1.2	0.7	0.2	0.038	0.009	0.7	0.08	0.25
B	1.2	0.8	0.2	0.038	0.009	0.7	0.07	0.35
C	1.2	0.9	0.2	0.038	0.009	0.7	0.06	0.70

<b>CPT 2</b>							
<b>Strato</b>	<b>spessore</b>	<b>prof.(m)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cu<sub>m</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Mo (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>OCR</b>
suolo	0.6	0.6	1.85	0.65	80	50.00	71.3
A	2.4	3.0	1.55	0.75	200	57.65	21.8
B	3.2	6.2	0.90	0.80	210	60.75	8.4
C	8.8	15.0	0.95	0.85	290	69.60	4.3

<b>Strato</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>e<sub>0</sub></b>	<b>I<sub>P</sub>(%)</b>	<b>Cc</b>	<b>Cr</b>	<b>r<sub>u</sub></b>	<b><math>\epsilon_{vr}</math></b>	<b><math>\Delta H</math></b>
suolo	1.2	0.6	0.2	0.038	0.008	0.7	0.09	0.05
A	1.2	0.7	0.2	0.038	0.008	0.7	0.08	0.25
B	1.2	0.8	0.2	0.038	0.008	0.7	0.07	0.40
C	1.2	0.9	0.2	0.038	0.008	0.7	0.06	0.60

<b>CPT 3</b>							
<b>Strato</b>	<b>spessore</b>	<b>prof. (m)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cu<sub>m</sub>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Mo (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>OCR</b>
suolo	0.4	0.4	1.85	0.50	60	40.00	68.4
A	2.8	3.2	1.55	0.75	200	58.40	21.4
B	3.0	6.2	0.95	0.90	210	75.10	9.6
C	8.8	15.0	0.95	0.80	290	61.55	4.1

<b>Strato</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>e<sub>0</sub></b>	<b>I<sub>P</sub>(%)</b>	<b>Cc</b>	<b>Cr</b>	<b>r<sub>u</sub></b>	<b><math>\epsilon_{vr}</math></b>	<b><math>\Delta H</math></b>
suolo	1.2	0.6	0.2	0.038	0.008	0.7	0.09	0.05
A	1.2	0.7	0.2	0.038	0.008	0.7	0.08	0.20
B	1.2	0.8	0.2	0.038	0.008	0.7	0.07	0.25
C	1.2	0.9	0.2	0.038	0.008	0.7	0.06	0.70

Ai fini della stima dei cedimenti post-sismici sono state assunte condizioni cautelative sia riguardo alle potenze degli strati sia riguardo ai valori dei parametri sismici e geotecnici adottati.

Così come previsto dalla D.A.L. 112/2007 il calcolo dei cedimenti post sismici è stato effettuato sui livelli coesivi che presentavano una coesione non drenata  $C_u > 70$  kPa.

In base alle considerazioni e alle elaborazioni si stima un cedimento post-sismico totale per ciascuna prova pari a:

Prova	$\Delta H$ (cm)
CPT1	1.4
CPT2	1.3
CPT3	1.2

## CONCLUSIONI

- Dal calcolo effettuato il potenziale di liquefazione è nullo  $PL = 0$ ;
- Il fattore di sicurezza per la liquefazione è  $FSL \geq 1$ ;
- Si esclude, in caso di sisma, la possibilità che si verifichino fenomeni di liquefazione del terreno;
- Il cedimento medio post-sismico per la CPT1 è di circa 1.4 cm;
- Il cedimento medio post-sismico per la CPT2 è di circa 1.3 cm;
- Il cedimento medio post-sismico per la CPT3 è di circa 1.2 cm;

*Faenza, Agosto 2023*

*Dr. geol. Bruno Gardegni*

