

Regione Emilia - Romagna

Comune di Forlì

Provincia di Forlì - Cesena

**PROGETTO DEFINITIVO**

Titolo:

Lotto di impianti di produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica

**"FORLI' 1" - "FORLI' 2"**

Via Rossellino, snc

Oggetto:

**RELAZIONE GEOLOGICA**

Num. Rif. Lista:

-

Codifica Elaborato:

**R-GEO**

Studio di progettazione:



Servizi Integrati Gestionali Ambientali scpa  
Circonvallazione Piazza d'Armi, 130 48122  
Ravenna (RA)  
C.F. e P.IVA 01465700399

Progettista:

Dott. Geol. MICHELA LAVAGNOLI



Incarico professionale ricevuto dalla Chiron Energy Asset Management S.r.l., società facente parte del Gruppo Chiron Energy.

Cod. File:

-

Scala:

-

Formato:

-

Codice:

**PD**

Rev.:

**00**

Rev.	Data	Descrizione revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
0	04/2025	Prima emissione	Geol. Michela Lavagnoli	Geol. Michela Lavagnoli	Geol. Michela Lavagnoli
1	-				
2	-				

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>ASPETTI GEOLOGICI GENERALI</b> .....	<b>8</b>
4.1.1	Assetto geologico e litostratigrafico .....	8
4.2	Litologia superficiale e sub-superficiale dell'area in esame .....	10
4.2.1	Assetto geomorfologico.....	11
4.3	Acque superficiali.....	14
4.4	Acque sotterranee.....	18
4.4.1	Assetto idrogeologico generale .....	18
4.4.2	Assetto idrogeologico locale.....	20
<b>5</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE INDAGINI IN SITO</b> .....	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE FISICO E MECCANICA DEI TERRENI</b> .....	<b>26</b>
6.1	Caratteristiche litologiche dei terreni .....	26
6.2	Modello geotecnico e valori caratteristici dei parametri geotecnici.....	27
<b>7</b>	<b>SISMICA</b> .....	<b>29</b>
7.1	Pericolosità sismica .....	29
7.2	Valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni .....	34
<b>8</b>	<b>PORTANZA PER FONDAZIONI SUPERFICIALI</b> .....	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>CEDIMENTI PER FONDAZIONI SUPERFICIALI</b> .....	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>CONSIDERAZIONI DI SINTESI</b> .....	<b>39</b>

## ALLEGATI

## 1 PREMESSA

Lo studio svolto è stato finalizzato al riconoscimento delle principali caratteristiche geologiche dei terreni presenti in corrispondenza di un'area di circa 11,3 ha, interessata dal progetto di un impianto fotovoltaico a terra in comune di Forlì, in provincia di Forlì-Cesena (Figura 1.1 e Figura 1.2).

L'area di intervento confina a Sud con la via Rossellino in prossimità della area produttiva La Selva, sviluppata a est della città di Forlì verso Forlimpopoli. L'Impianto avrà una potenza nominale complessiva di 11.994,84 Kw.

Le coordinate geografiche riferite al datum WGS84 del baricentro dell'area di realizzazione del campo fotovoltaico sono: Lat. 44,225414°, Long. 12,109182°.

L'area è compresa nelle sezioni 240143 e 240144 della Carta Tecnica Regionale (Figura 1-3).

Per la caratterizzazione geologica e geotecnica di dettaglio in corrispondenza dell'area di realizzazione dell'impianto fotovoltaico sono state effettuate 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTU), un'indagine sismica attiva (MASW) e un'indagine sismica passiva (HVSr). In corrispondenza dei fori, ottenuti mediante l'esecuzione delle prove, è stato rilevato il livello di profondità della falda dal piano di campagna.

Sulla base delle informazioni raccolte è stata ricostruita la stratigrafia del sottosuolo ed individuato un modello geologico-geotecnico dei terreni. Facendo riferimento alla normativa sismica vigente, in base alla quale il territorio di Forlì è stato inserito all'interno della zona 2, è stata effettuata la caratterizzazione della pericolosità sismica di base dell'area.

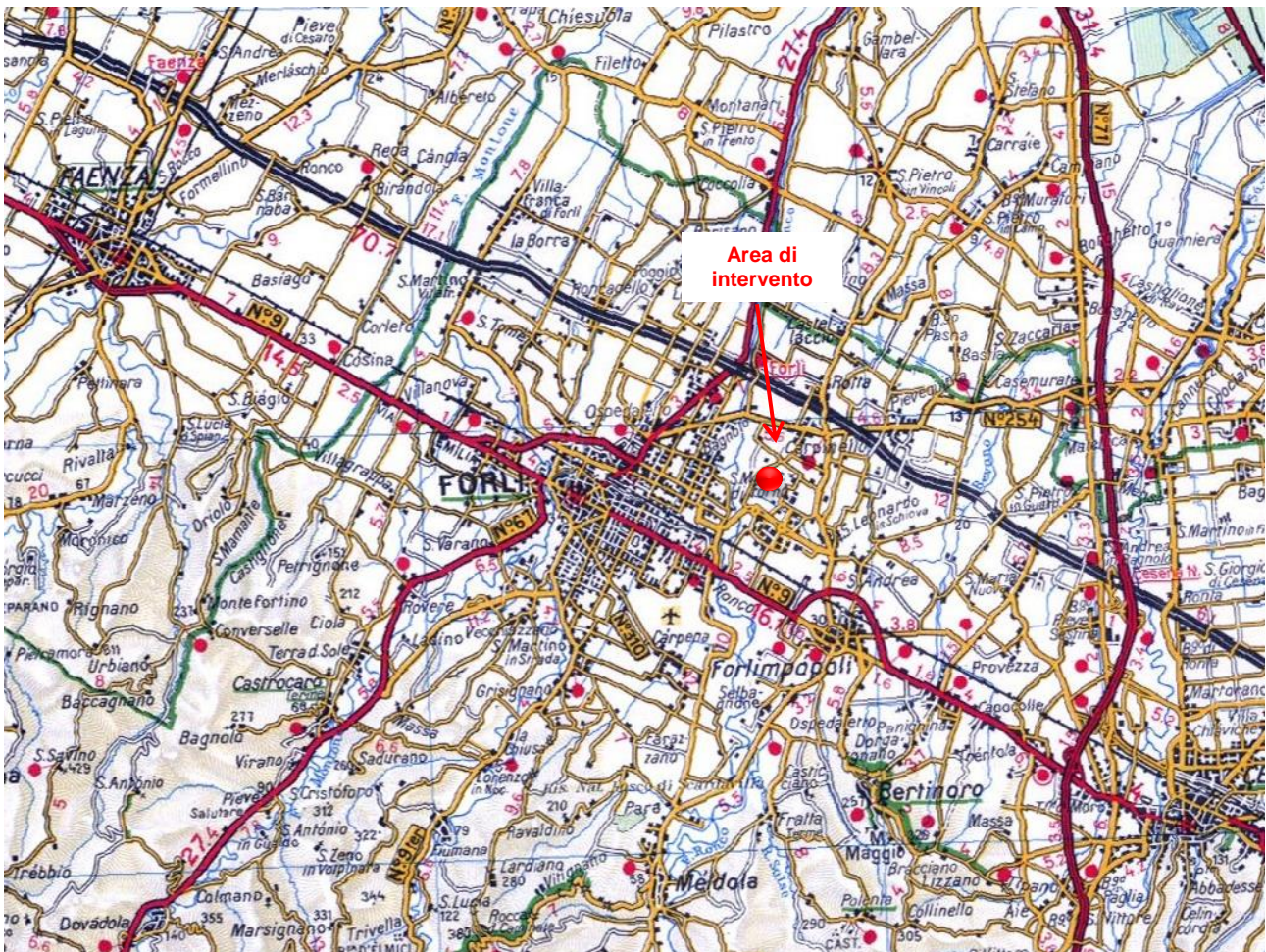


Figura 1.1 - Ubicazione area di intervento



Figura 1.2 - Dettaglio foto aere dell'area interessata dall'impianto fotovoltaico (Fonte: Google earth)

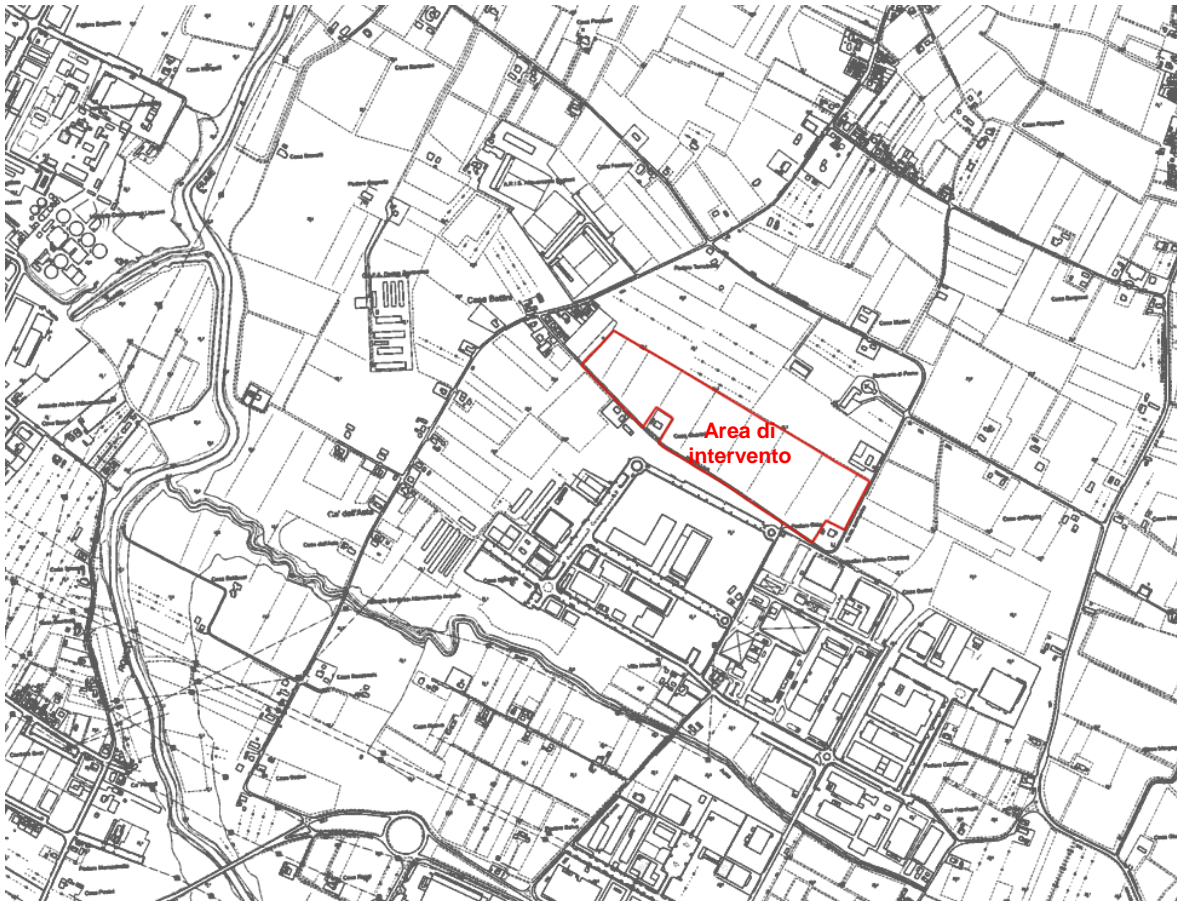


Figura 1-3 - Ubicazione area di intervento su base CTR, sezioni 240143 e 240144



Figura 1.4 – Panoramica area di intervento

## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La presente relazione è stata redatta in riferimento alla sotto elencata normativa.

Decreto ministeriale 17/01/2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». (Nel testo citato come NTC 18).

Circolare applicativa NTC2018 – Circolare Esplicativa con le Istruzioni alle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n. 36 del 27/07/2007

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20/03/2003 n. 3274 - “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.

Decreto Presidente Repubblica n. 380 del 6 giugno 2001 - Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia.

### 3 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

All'interno dell'impianto fotovoltaico si rende necessaria la realizzazione delle strutture sotto riportate per le quali è previsto il ricorso a fondazioni di tipo superficiale a platea. Si tratta di 5 cabine MT/BT, 2 cabine MT Utente e 1 cabina di Consegna. Le dimensioni delle strutture sono riportate nella seguente tabella.

Edificio / struttura fondazione	Larghezza B (m)	Lunghezza L (m)	Profondità piano di posa (m)
Cabina MT/BT 1A	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 1B	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 2A	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 2B	3,2	7,5	0,6
Cabina MT/BT 2C	3,2	7,5	0,6
Cabina MT utente 1	2,5	6,5	0,6
Cabina MT utente 2	2,5	6,5	0,6
1 Cabina di consegna	3,0	8,97	1,0

Tabella 3-1 Dimensioni in pianta delle strutture di fondazione



Figura 3-1 - Layout del campo fotovoltaico in progetto

#### Tipologia cabine MT/BT

La struttura della cabina MT/BT sarà del tipo a pannelli componibili; gli elementi prefabbricati che costituiranno la cabina saranno trasportati singolarmente ed assemblati in cantiere. È previsto che prima dell'arrivo delle cabine elettriche sia stato eseguito lo scavo e predisposta una platea di appoggio in calcestruzzo.

Le cabine MT/BT "1.A", "1.B" e "2.A" avranno ciascuna una superficie utile complessiva di 28,2 m<sup>2</sup>, dimensioni esterne 9,7 m x 3,2 m x 3,0 m (lpxh) e saranno costituite da due locali accessibili dall'interno del campo:

- un locale BT produttore delle dimensioni interne di 5,2 m x 3,0 m x 2,9 m (lpxh);
- un locale trasformatori delle dimensioni interne di 4,2 m x 3,0 m x 2,9 m (lpxh); in tutte le cabine i due trasformatori installati all'interno del locale saranno del tipo in resina della potenza di 1600 kVA.

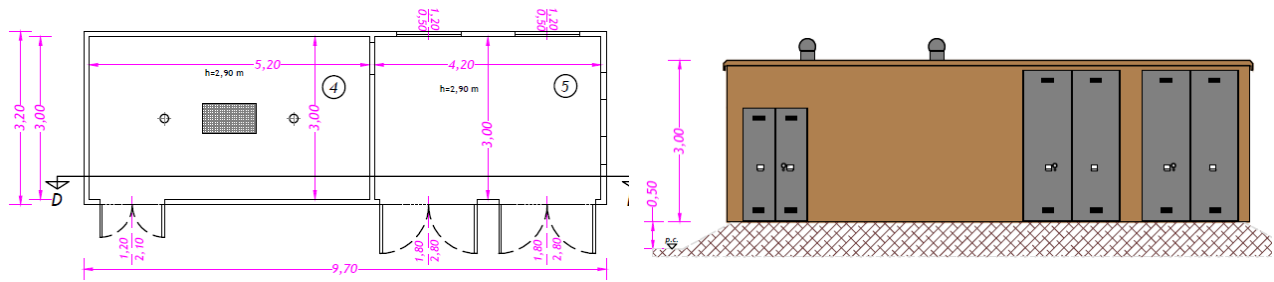


Figura 3-2 – Pianta e profilo delle cabine MT/BT “1.A”, “1.B” e “2.A”

Le cabine MT/BT “2.B” e “2.C” avranno ognuna una superficie utile complessiva di 21,6 m<sup>2</sup>, dimensioni esterne 7,5 m x 3,2 m x 3,0 m (lpxhx) e saranno costituite da due locali accessibili dall’interno del campo:

- un locale BT produttore delle dimensioni interne di 4,7 m x 3,0 m x 2,9 m (lpxhx);
- un locale trasformatori delle dimensioni interne di 2,5 m x 3,0 m x 2,9 m (lpxhx); il trasformatore installato all’interno del locale sarà del tipo in resina della potenza di 1600 kVA.

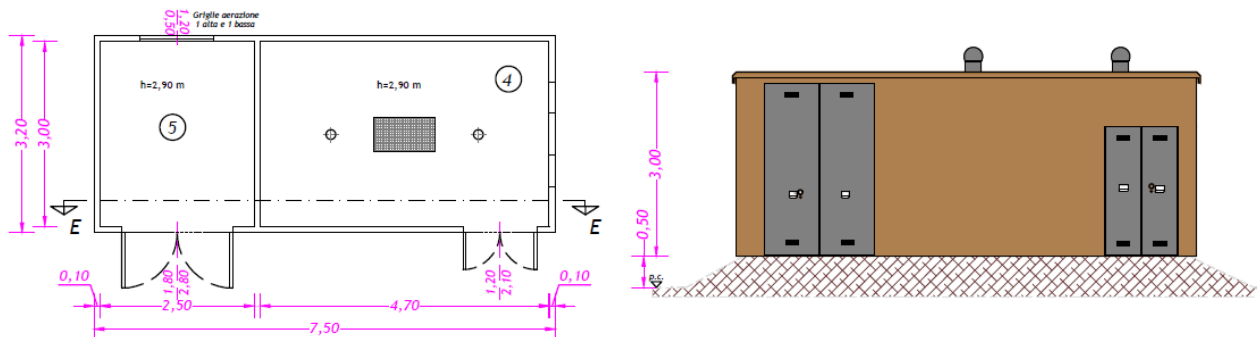


Figura 3-3 – Pianta e profilo delle cabine MT/BT “2.B” e “2.C”

### Tipologia cabine MT Utente

Saranno installate due cabine denominate “Cabina Utente 1” e “Cabina Utente 2”.

Le cabine avranno una struttura monoblocco costruita e assemblata direttamente nello stabilimento di produzione e saranno trasportate e consegnate in opera già allestite con le relative apparecchiature elettromeccaniche. Saranno composte da due elementi: la vasca di fondazione e il manufatto fuori terra. È previsto che prima dell’arrivo delle cabine elettriche sia stato eseguito lo scavo e predisposta una platea di appoggio in calcestruzzo.

Le cabine MT utente avranno una superficie utile di 14,49 m<sup>2</sup> con dimensioni esterne 6,5 m x 2,5 m x 3,0 m (lpxhx) e saranno costituite da un unico locale.

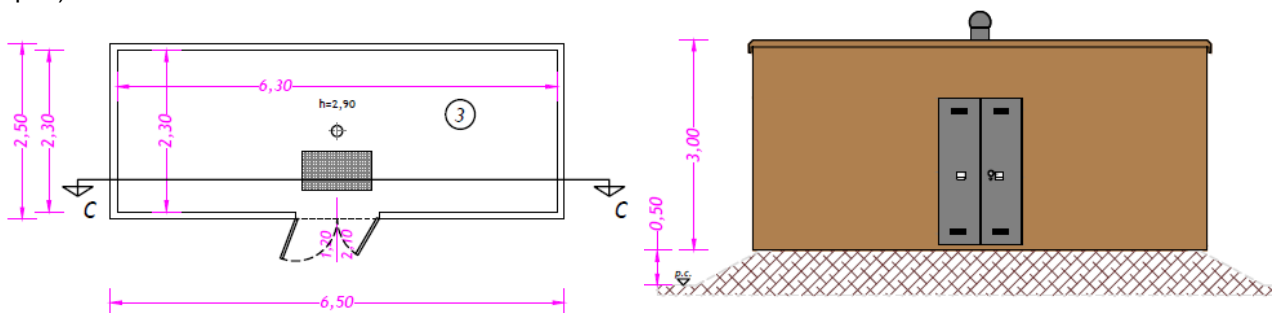


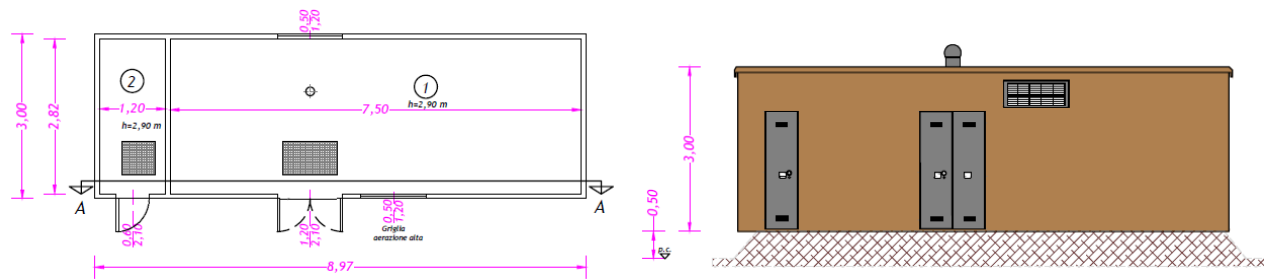
Figura 3-4 – Pianta e profilo delle cabine MT Utente 1 e 2

### Tipologia cabina di consegna

La cabina sarà del tipo a pannelli componibili e gli elementi prefabbricati che costituiranno la cabina saranno trasportati singolarmente ed assemblati in cantiere. Prima dell’arrivo della cabina verrà eseguito lo scavo e predisposta una platea di appoggio in calcestruzzo.

La cabina di consegna avrà una superficie utile di 24,53 m<sup>2</sup>, con dimensioni esterne 8,97 m x 3,0 m x 3,0 m (lpxhx) e sarà costituita da due locali:

- un locale misure delle dimensioni interne di 1,20 m x 2,82 m x 2,9 m (lpxh);
- un locale e-distribuzioni delle dimensioni interne di 7,5 m x 2,82 m x 2,9 m (lpxh).



**Figura 3-5 – Pianta e profilo della cabina di consegna Bernardo FV**

## 4 ASPETTI GEOLOGICI GENERALI

### 4.1.1 Assetto geologico e litostratigrafico

I caratteri geologici che definiscono la Pianura Padana traggono principalmente origine dagli studi di sismica a riflessione condotti da AGIP, che hanno evidenziato la presenza di depositi di età plio-quadernaria costituenti il riempimento del bacino di avansfossa compreso tra la catena appenninica a Sud e quella alpina a Nord. Lo spessore complessivo delle unità quadernarie risulta di circa 1.000-1.500 m. L'evoluzione sedimentaria plio-quadernaria del bacino registra una 'tendenza regressiva' da depositi marini di ambiente progressivamente sempre meno profondo fino a depositi continentali. Si identificano quindi due distinti cicli sedimentari, uno marino ('Qm') ed uno continentale ('Qc'); tale tendenza risulta ben riconoscibile al margine appenninico (Ricci Lucchi *et al.*, 1982).

Gli studi condotti dalla Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998), basati sui profili sismici integrati da dati stratigrafici di pozzi profondi, hanno permesso di identificare la superficie di discontinuità tra i due cicli sedimentari anche nel sottosuolo della Pianura Padana, in corrispondenza del limite tra il Supersistema del Quaternario Marino (corrispondente al ciclo Qm) e il sovrastante Supersistema Emiliano-romagnolo (ciclo Qc). All'interno di queste due unità sono state riscontrate da vari autori discontinuità minori, che portano alla distinzione di sequenze deposizionali di rango inferiore all'interno dei due cicli sedimentari, come si evidenzia in Figura 4.1, (Regione Emilia-Romagna, 1998).

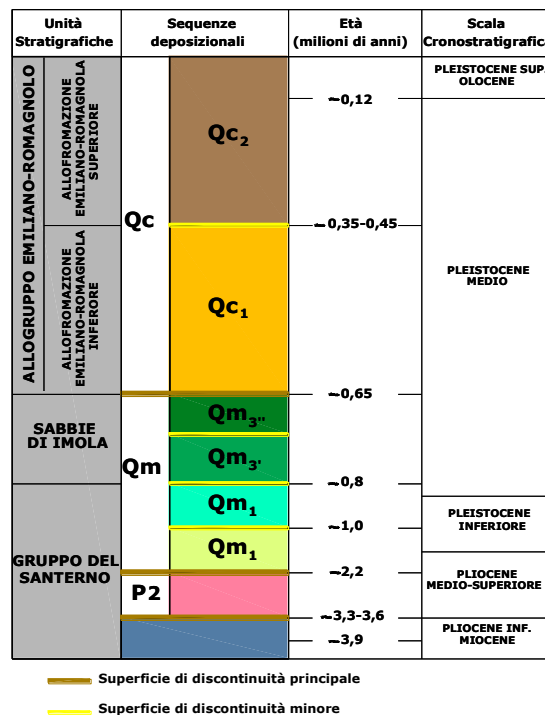


Figura 4.1 – Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano (Fonte: R. Emilia-Romagna & Eni-Agip, 1998)

Facendo riferimento allo studio della Regione Emilia-Romagna & ENI-Agip (1998), si riconoscono nel Supersistema Emiliano-Romagnolo, caratterizzato da uno spessore complessivo di circa 600÷700 m, due unità allostratigrafiche definite come Alloformazione Emiliano-Romagnola Inferiore e Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore. All'interno di quest'ultima sono presenti unità di rango inferiore (Allomembri) che registrano la ciclicità elementare glacio-eustatica di IV ordine e che per loro natura ciclica costituiscono le unità cartografiche di riferimento.

### Supersistema Emiliano-Romagnolo

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quadernari di origine continentale affioranti in corrispondenza del margine appenninico padano (ciclo Qc di Ricci Lucchi *et al.*, 1982) ed i sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi, nell'area in esame, includono depositi alluvionali che passano verso Est a depositi deltizi e marini, organizzati in cicli deposizionali di vario ordine gerarchico. Il limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo non

affiora nell'area, ma affiora solamente a ridosso del margine appenninico e nei settori intravallivi nell'area a Sud, dove è fortemente discordante sui depositi marini del Pleistocene medio (sabbie di Imola - IMO) e miopliocenici. Il limite superiore coincide col piano topografico. L'età dell'unità è Pleistocene medio – attuale (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

### **Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore (AES)**

Costituisce la porzione superiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'area di pianura comprende tutti i depositi continentali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche di alcune decine di metri di spessore. Nel sottosuolo l'Alloformazione appoggia localmente in discontinuità stratigrafica sull'Alloformazione Emiliano-Romagnola Inf. ed è suddivisibile in quattro cicli deposizionali. Il limite superiore corrisponde all'attuale superficie topografica. L'età è attribuibile al Pleistocene medio-Olocene.

La porzione più investigata dell'alloformazione è rappresentata dai 120 m sommitali: al di sotto dei sedimenti litorali, localmente affioranti, di età olocenica, attribuibili all'ultimo episodio trasgressivo quaternario (Allomembro di Ravenna), i primi depositi litorali e marini che si incontrano verso il basso stratigrafico sono rappresentati da un corpo tabulare alla profondità di circa -100 m slm, costituito da sabbie litorali e subordinatamente da argille di prodelta e transizione alla piattaforma.

Al di sopra di questi sedimenti marini sono riconoscibili depositi di alcune decine di m prevalentemente argillosi di piana deltizia. La comparsa, intorno a -50÷-70 m slm di corpi sabbiosi nastriformi, interpretati come depositi fluviali di valle incisa, segna il passaggio ai sedimenti alluvionali che costituiscono la porzione dell'alloformazione immediatamente sottostante all'Allomembro di Ravenna. Questo intervallo è caratterizzato da argille e limi di piana inondabile, con subordinate sabbie di canale, (Regione Emilia-Romagna, 1999).

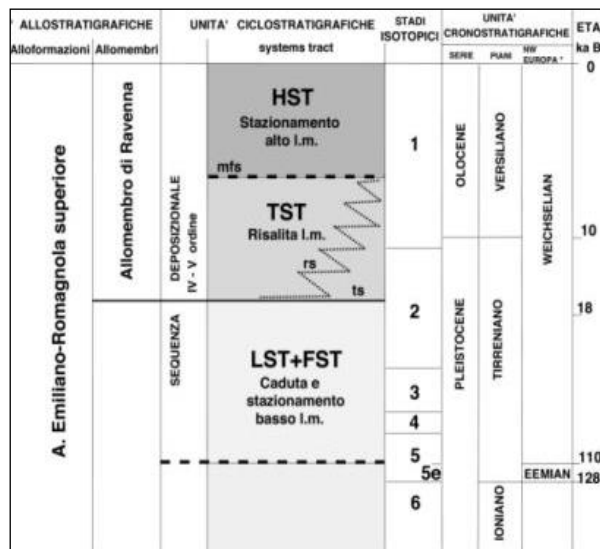


Figura 4.2 - Schema stratigrafico dell'Alloformazione Emiliano-Romagnola Sup. (Fonte: Regione Emilia-Romagna)

### **Allomembro di Ravenna (AES8)**

È caratterizzato da sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale, deltizio e litorale, organizzati in corpi lentiformi, nastriformi e tabulari di vario spessore. Il tetto, che coincide con il piano topografico, presenta suoli con diverso grado di alterazione, i cui orizzonti superiori variano da non calcarei a calcarei. Il limite inferiore è inconforme e marcato da una superficie di discontinuità definita su base radiometrica. Nell'area ravennate l'unità ha uno spessore compreso tra 20 e 28 m.

La porzione basale di AES8 è caratterizzata dalla frequente presenza di sedimenti ricchi di sostanza organica palustri e/o lagunari di natura trasgressiva che si accompagnano ad una generale disattivazione dei sistemi fluviali del ciclo sottostante e ad un generale spostamento verso monte dei sistemi deposizionali.

Nella parte sommitale dell'Allomembro di Ravenna viene distinta una unità di rango gerarchico inferiore, l'Unità di Modena (AES8a), la quale contiene i depositi più superficiali (sempre affioranti) e più recenti, compresi quelli attualmente in evoluzione. Nel territorio circostante l'area di intervento affiorano le unità AES8 e AES8a.

AES8a è un'unità pellicolare, di pochi metri di spessore, che raggiunge i 10 m solo localmente, in corrispondenza dei dossi fluviali o della fronte deltizia. Nel settore di alta pianura, la base di AES8a è data da

una superficie di erosione fluviale che passa lateralmente ad una scarpata di terrazzo in cui sono confinati i depositi di canale. Nei settori di bassa pianura la base di AES8a è individuata dal contatto, in discontinuità, delle sue tracimazioni fluviali sul suolo non calcareo o scarsamente calcareo di AES8 che contiene i reperti di epoca romana o più antica in posto.

Il tetto di AES8a è dato da un suolo poco evoluto, calcareo, di pochi decimetri di spessore e generalmente di colore bruno olivastro o bruno grigiastro. Il limite inferiore è datato al periodo post-romano e segna l'instaurarsi di un'importante fase di deterioramento climatico tra il IV e il VI sec. d.C. che determinò un aumento della piovosità, con conseguente modifica della rete idrografica e alluvionamento della pianura.

#### 4.2 Litologia superficiale e sub-superficiale dell'area in esame

I terreni presenti negli strati più superficiali sono il frutto di eventi geologico-deposizionali di tipo alluvionale, succedutisi in epoche recenti. La distribuzione tessiturale di questi sedimenti risulta quindi in stretta connessione con la dinamica tipica degli ambienti sedimentari fluviali di pianura alluvionale.

Le caratteristiche litologiche dei terreni superficiali, riportate in Figura 4.3, sono state desunte dalla cartografia geologica messa a disposizione dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna (Sito della cartografia geologica del servizio geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna, <http://geo.regione.emilia-romagna.it>).

La carta descrive la distribuzione e le caratteristiche litologiche delle unità stratigrafiche subaffioranti ovvero dei terreni presenti sino ad una profondità media di circa 2÷3 m dal piano campagna. Secondo quanto indicato dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna per la realizzazione della carta geologica sono stati utilizzati i dati derivanti dall'interpretazione di foto aeree e da satellite, da indagini geognostiche quali sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche e da trivellate a mano (tra cui i dati messi a disposizione dall'Ufficio Pedologico).

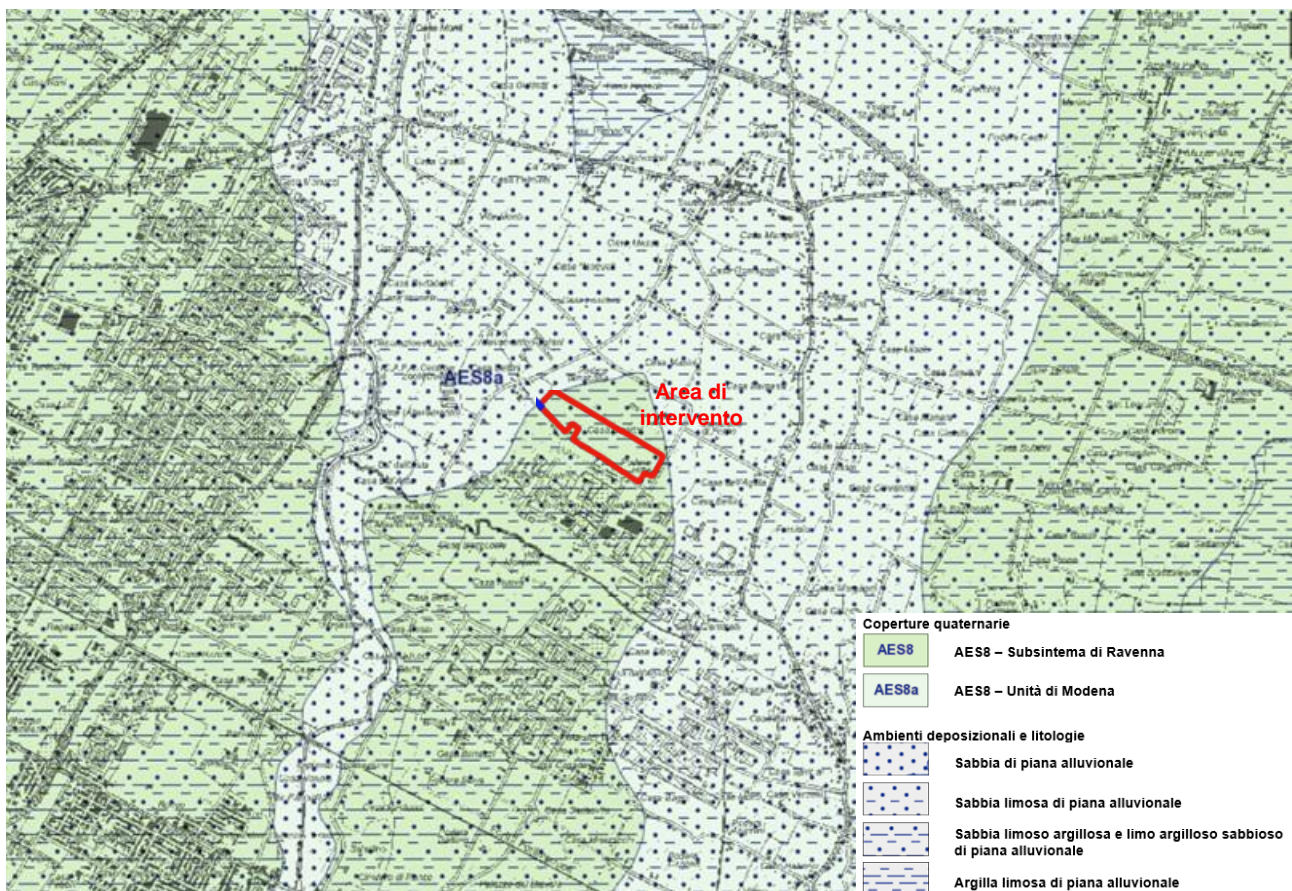


Figura 4.3 – Carta geologica, (Fonte: Sito della cartografia geologica del servizio geologico sismico e dei suoli della regione Emilia Romagna, <http://geo.regione.emilia-romagna.it>)

I depositi di superficie si riferiscono interamente al subsistema più recente (Subsistema di Ravenna - AES8) del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) la cui unità cartografica di rango gerarchico inferiore è l'unità di Modena (AES8a) che costituisce la parte sommitale di AES8.

In particolare, nell'area di intervento, sono presenti depositi attribuibili ad ambienti di piana alluvionale costituiti da limi argilloso sabbiosi e sabbie limoso argillose.

#### 4.2.1 Assetto geomorfologico

L'area dove verrà realizzato l'impianto risulta pianeggiante con quote comprese tra circa 20 e 21,5 m slm (Figura 4.4).

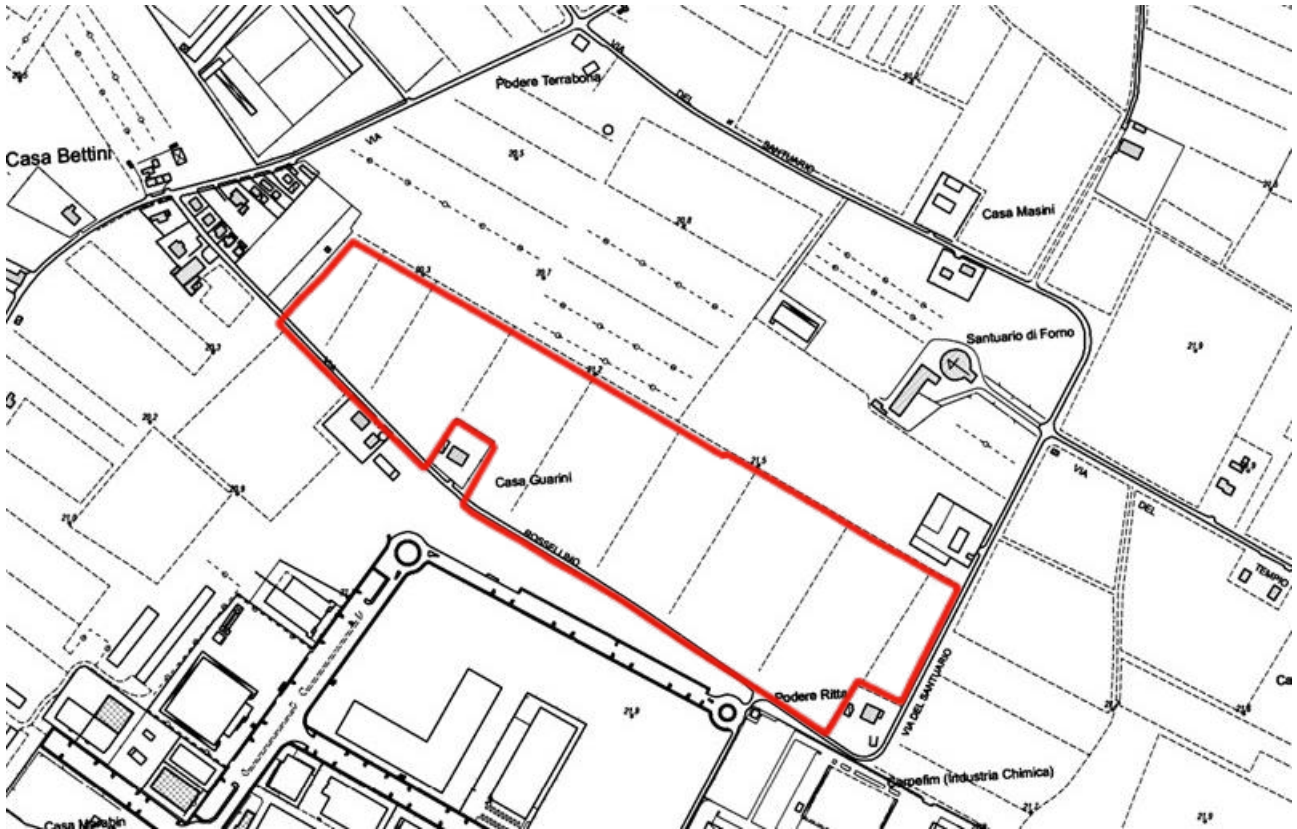


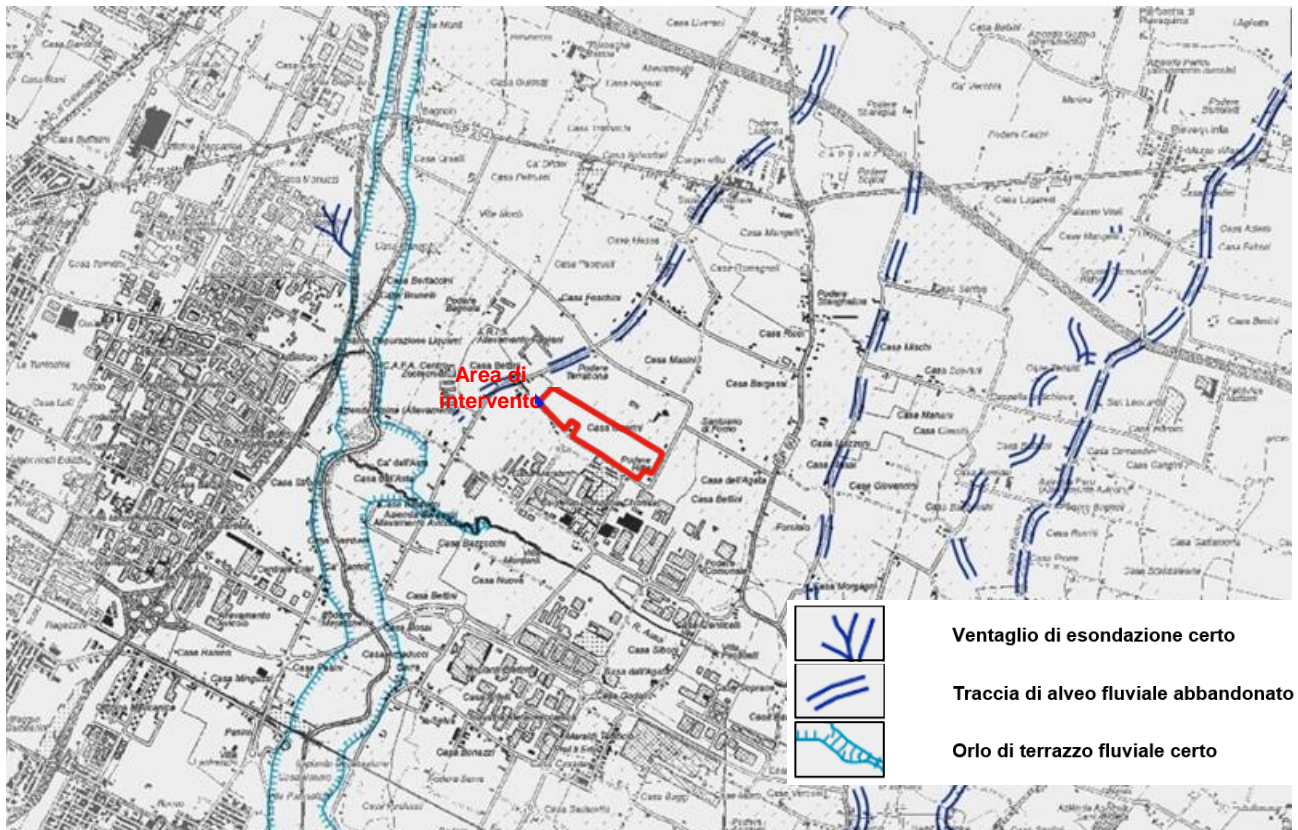
Figura 4.4 – Quote topografiche in prossimità dell'area di intervento tratte dalle sezioni CTR 240143 e 240144

L'agente morfogenetico che ha maggiormente contribuito alla genesi ed evoluzione delle forme che caratterizzano il territorio è probabilmente il reticolo delle acque incanalate. L'evoluzione della pianura olocenica è infatti riconducibile ad un modello semplice, nel quale i corsi d'acqua appenninici, a valle delle conoidi pedemontane, poco attive durante l'Olocene (ultimi 15.000 anni), oggi prevalentemente in erosione, tendono a proseguire verso il collettore principale su alvei pensili, formati da sedimenti che il corso d'acqua non è più in grado di portare in carico.

I fiumi che scorrono in questa porzione di bassa pianura si trovano in uno stadio di maturità evolutiva in cui la fase deposizionale prevale su quella erosiva a causa della bassa capacità di deflusso e della esigua capacità di trasporto; questo quadro è confermato dalla presenza di meandri e di alvei pensili che hanno reso necessaria la costruzione di argini artificiali. In assenza di argini artificiali i fiumi tendono a divagare e quando le acque di piena traboccano si verifica un deposito differenziato con la sedimentazione di elementi fini o grossolani in funzione della diversa energia cinetica della corrente. In prossimità dell'alveo il fiume tende a depositare materiali più grossolani formando dossi di tracimazione (argini naturali), oltre che ventagli e canali di esondazione in corrispondenza delle rotte; tali emergenze morfologiche si manifestano sia lungo i corsi attuali dei fiumi che in corrispondenza di alvei abbandonati (paleoalvei). Nelle aree distali più depresse, poste tra un fiume e l'altro, l'energia cinetica della corrente diminuisce ed i depositi si fanno sempre più fini per diventare prevalentemente argillosi nelle basse. L'accrezione della pianura emiliano-romagnola è avvenuta perciò sia orizzontalmente, con il giustapporsi di successivi corpi d'alveo, sia verticalmente a causa dei continui

cicli di riempimento dei bacini di esondazione. La distribuzione delle litologie di superficie e del primo sottosuolo, così come l'assetto morfologico della pianura, sono quindi strettamente legati ai processi strutturali e di sedimentazione e alla loro disposizione nel tempo.

Le strutture riconosciute cartograficamente nell'intorno dell'area di intervento sono rappresentate da tracce di alvei abbandonati, sui quali sono state impostate alcune delle viabilità presenti e orli di terrazzo, in prossimità dell'alveo del fiume Ronco. In corrispondenza dell'area di intervento non sono presenti elementi geomorfologici, Figura 4.5.



**Figura 4.5 – Geomorfologia dell'area di intervento (Fonte: Sito della cartografia geologica del servizio geologico sismico e dei suoli della regione Emilia Romagna, <http://geo.regione.emilia-romagna.it>)**

Un elemento caratterizzante l'attuale assetto geomorfologico è rappresentato dalla subsidenza: il graduale abbassamento del suolo trae origine da cause naturali insite nel territorio, quali, principalmente, la tettonica, che coinvolge i sedimenti profondi della pianura, ed il costipamento dei terreni ad opera del carico litostatico; a queste si sommano altre cause legate all'attività dell'uomo, soprattutto in riferimento all'estrazione di fluidi dal sottosuolo. Tra questi, lo sfruttamento delle acque sotterranee è senz'altro uno degli agenti più significativi. Gli studi effettuati sull'evoluzione del fenomeno mostrano chiaramente la correlazione fra interventi dell'uomo e cambiamenti nelle tendenze della subsidenza.

Senza entrare nel dettaglio sulle cause responsabili della subsidenza, date le finalità del presente studio, è comunque possibile eseguire una valutazione di massima sugli abbassamenti del suolo avvenuti negli ultimi anni nell'area di indagine. L'azione di monitoraggio del fenomeno della subsidenza viene attualmente svolto da Arpa: l'attività principale riguarda il rilievo periodico dei movimenti verticali del suolo sull'intero territorio di pianura della regione. Il prodotto finale è la carta delle velocità di movimento verticale del suolo, aggiornata al periodo intercorso tra l'ultimo rilievo e il rilievo precedente. L'aggiornamento viene realizzato con frequenza circa quinquennale, su incarico specifico della Regione Emilia-Romagna, Servizio Tutela e risanamento risorsa acqua. La cartografia prodotta viene utilizzata per i rispettivi compiti d'istituto, in particolare, da Servizi tecnici di bacino della Regione, Province, Autorità di bacino e Comuni.

Nelle figure sottostanti si riporta lo stralcio, relativo all'area di studio, della velocità di movimento verticale del suolo, rappresentata da isocinetiche, misurata rispettivamente nei periodi, 2006÷2011, 2011÷2016 e 2016÷2021.

Le isocinetiche nel periodo 2006÷2011 mostrano, per l'area ove verrà realizzato l'impianto fotovoltaico, una velocità di abbassamento verticale compresa tra 7,5 e 5 mm/anno (Figura 4.6). Nel periodo successivo, 2011÷2016 la velocità si riduce, risultando inferiore a 2,5 mm/anno, (Figura 4.7), infine nell'ultimo periodo considerato (2016÷2021) il tasso di subsidenza risulta compreso tra 2,5 e 5 mm/anno, Figura 4.8.

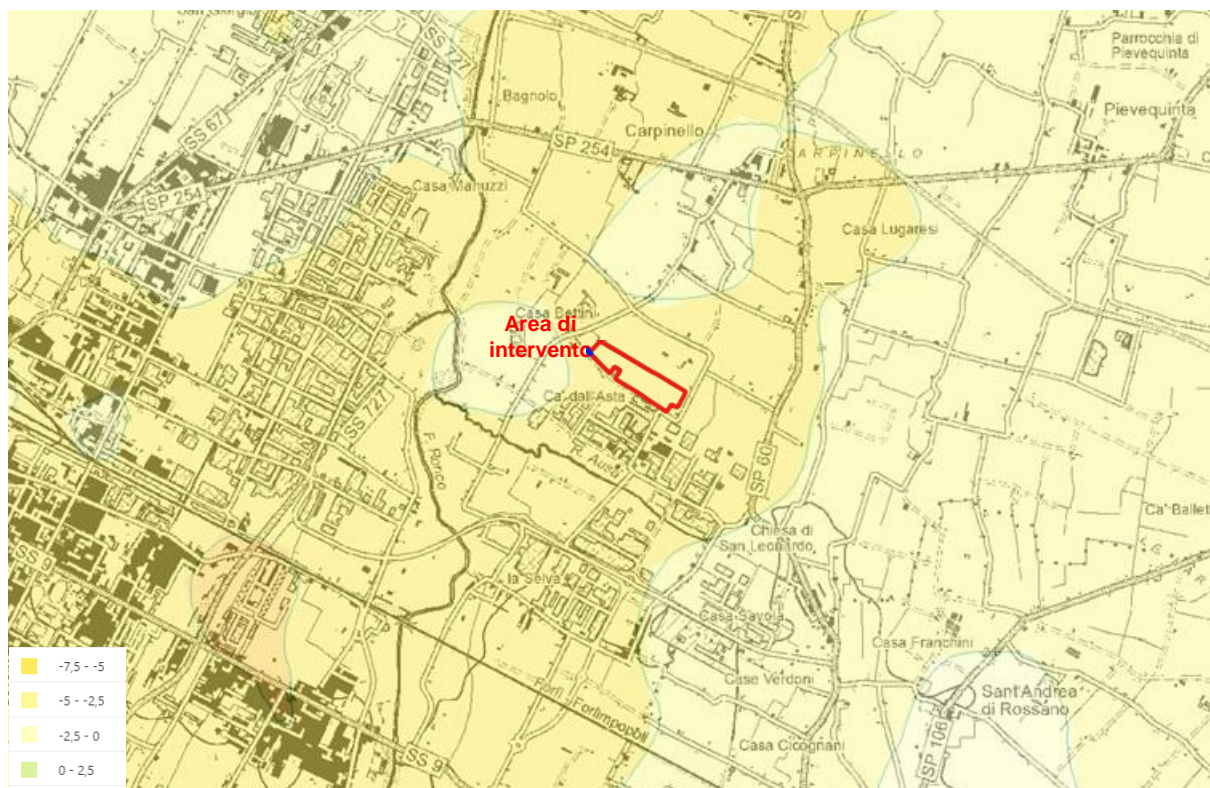


Figura 4.6 – Subsidenza nel periodo 2006÷2011 (fonte: <https://arpae.it/cartografia/>)

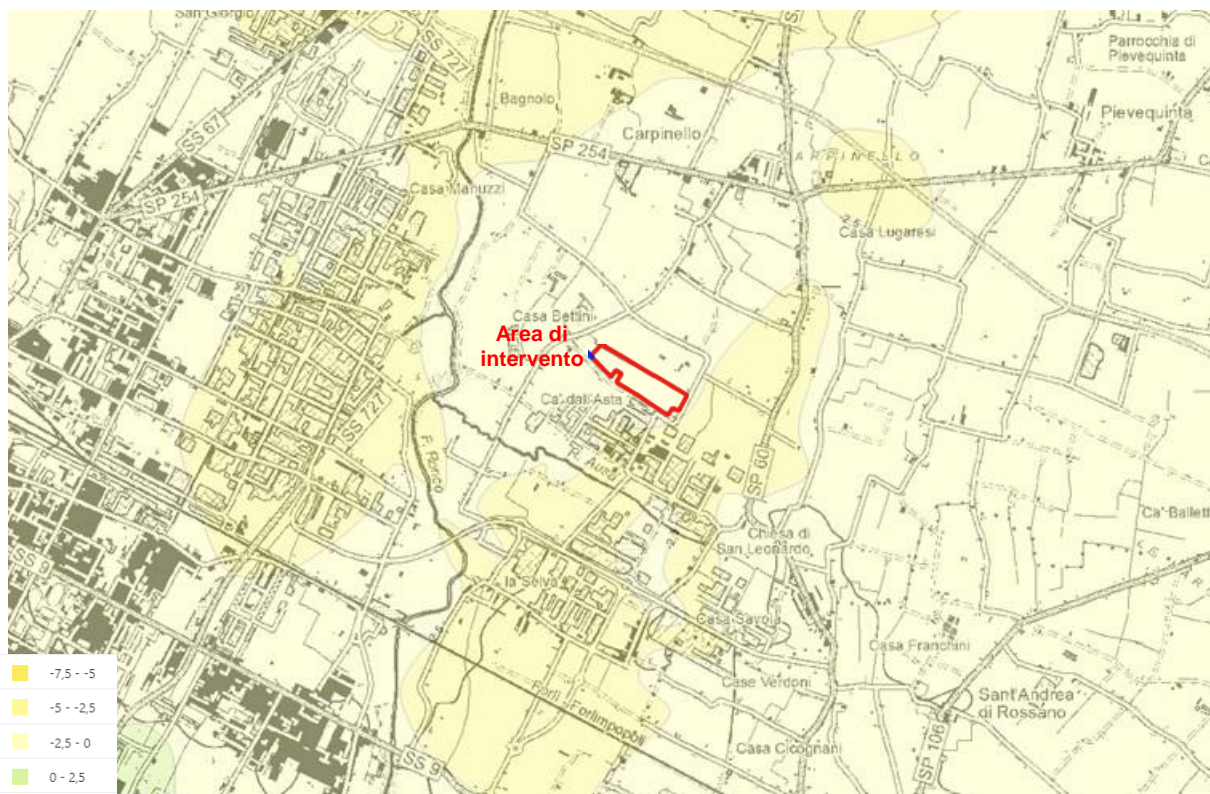


Figura 4.7 – Subsidenza nel periodo 2011÷2016 (fonte: <https://arpae.it/cartografia/>)

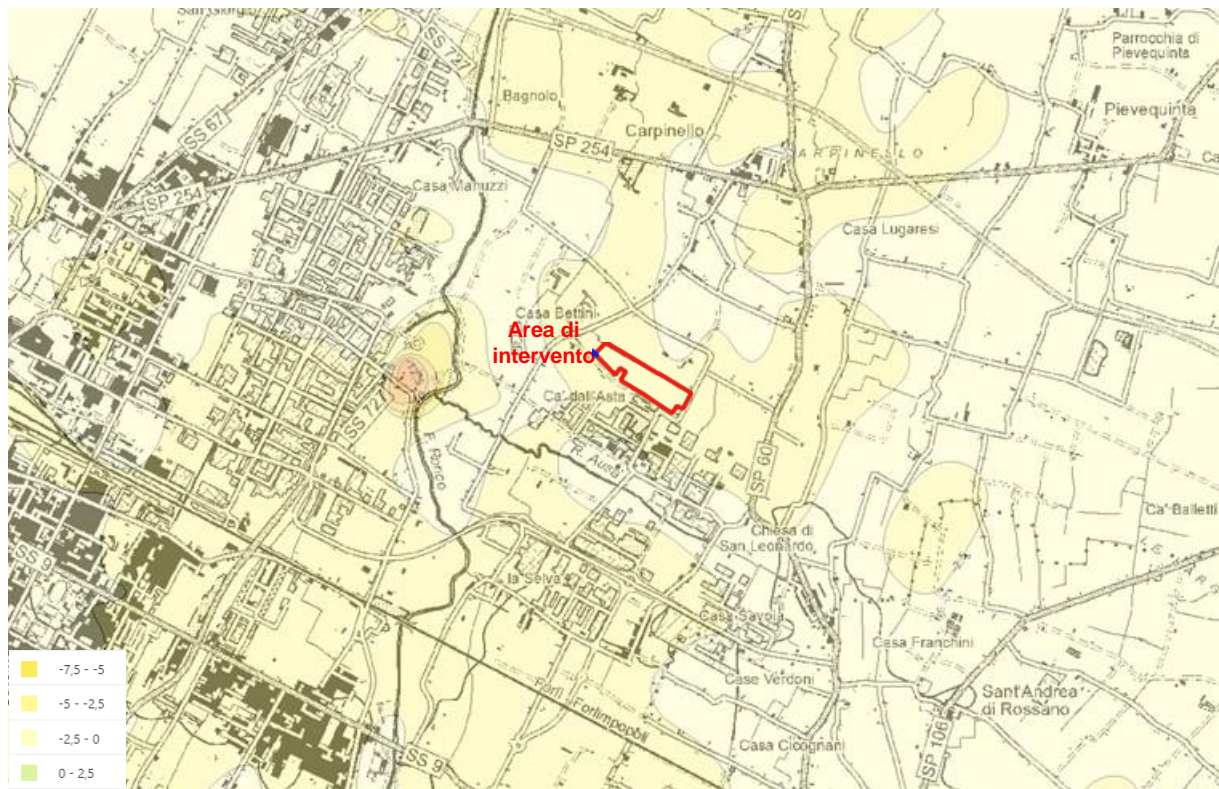


Figura 4.8 – Subsidenza nel periodo 2016÷2021 (fonte: <https://arpae.it/cartografia/>)

### 4.3 Acque superficiali

L'elemento idrografico principale è rappresentato dal Fiume Ronco, che scorre a circa 1 km ad ovest dell'area di intervento. Il Fiume Ronco insieme al Montone costituisce il bacino dei Fiumi Uniti, delimitato dallo spartiacque appenninico quasi interamente coincidente con il confine regionale, dal bacino del Fiume Lamone, in sinistra idraulica, mentre in destra è confinante con il bacino del Fiume Savio. Costituisce il più importante sistema idrografico della Romagna con una estensione di circa 1240 km<sup>2</sup>; i due corsi d'acqua principali, Ronco e Montone, confluiscono all'altezza della città di Ravenna (e da cui deriva l'attuale denominazione di Fiumi Uniti); inoltre appartiene al bacino il Fiume Rabbi, che diviene affluente del Montone appena giunto in pianura, alle porte della città di Forlì.

Originariamente i Fiumi Ronco e Montone sfociavano separatamente nel mare Adriatico; in seguito, per motivi di sicurezza idraulica dell'abitato di Ravenna, furono regimati in un unico tratto terminale, mentre il vecchio corso fu trasformato in canale navigabile e successivamente obliterato.

Il Fiume Ronco è formato dall'unione di tre rami: Bidente di Corniolo (1400 m slm), Bidente di Ridracoli (1200 m slm), Bidente di Strabatenza (1200 m slm); i tre rami si uniscono nei pressi di Isola. Sviluppa una lunghezza di 80 km circa. Nella parte alta del bacino, segnatamente nel sottobacino del Bidente di Ridracoli, sorge una diga di sbarramento (Ridracoli) che forma un invaso artificiale di circa 33 milioni di metri cubi.

Inoltre in prossimità dell'area di intervento è presente un reticolo di canali per il drenaggio delle acque meteoriche: lungo la via del Santuario, a nord del sito, scorre un ramo del canale Tassinara Vecchia con la funzione di scolo delle acque meteoriche, (Figura 4.9).



**Figura 4.9 – Rete idrografica (Fonte: Geoportale Regione Emilia Romagna)**

In adempimento alla Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione del rischio di alluvioni, recepita con il D. Lgs. 23 febbraio 2010 n. 49, la Regione Emilia-Romagna nel dicembre 2013, ha pubblicato una cartografia riguardante le aree che potrebbero essere interessate da inondazioni di corsi d'acqua naturali e artificiali; nelle mappe della pericolosità cartografate in base agli ambiti (reticolo principale, reticolo secondario collinare-montano, reticolo secondario di pianura, area costiera marina) e ai bacini/distretti idrografici di riferimento i rispettivi raggruppamenti vengono indicati gli scenari:

- ✓ alluvioni frequenti (H) = TR 30 – 50 anni;
- ✓ alluvioni poco frequenti (M) = TR 100 – 200 anni;
- ✓ alluvioni rare (L) = TR fino a 500 anni.

Ad oggi sono disponibili i dati di pericolosità relativi al secondo ciclo di attuazione della Direttiva 2007/60/CE, conclusosi nel dicembre 2021, definitivamente approvati dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po con Decreto Segretariale (DS) n. 43/2022 del 11 aprile 2022. Si tratta delle mappe di pericolosità più aggiornate del PGRA vigente perché accolgono i dati relativi all'ultima fase del percorso di aggiornamento delle mappe (2021-2022), comprensivo del percorso di osservazione e partecipazione.

In riferimento al reticolo idrografico principale il sito non rientra in aree a pericolosità. Riguardo invece il reticolo secondario l'intervento ricade in uno scenario di pericolosità P2 – alluvioni poco frequenti (Figura 4.10 e Figura 4.11).

Il progetto per quanto riguarda il rischio da alluvioni in riferimento al reticolo principale non rientra in aree di rischio. Per quanto concerne il reticolo secondario l'impianto rientra in aree a rischio moderato (R1), (Figura 4.12 e Figura 4.13).

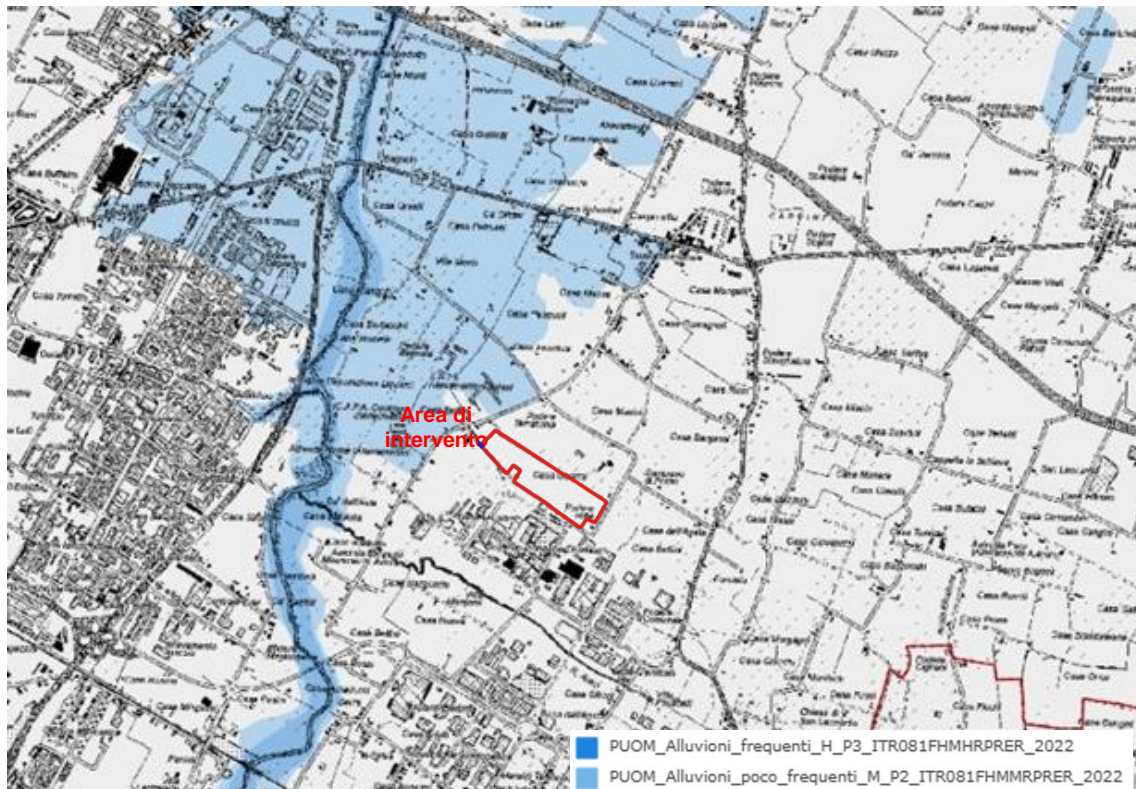


Figura 4.10 - Alluvioni reticolo principale - Stralcio della Mappa di pericolosità (art. 6 Direttiva 2007/60/CE e art. 6 del D. Lgs. 49/2010 (Fonte: <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/DA/index.html>))

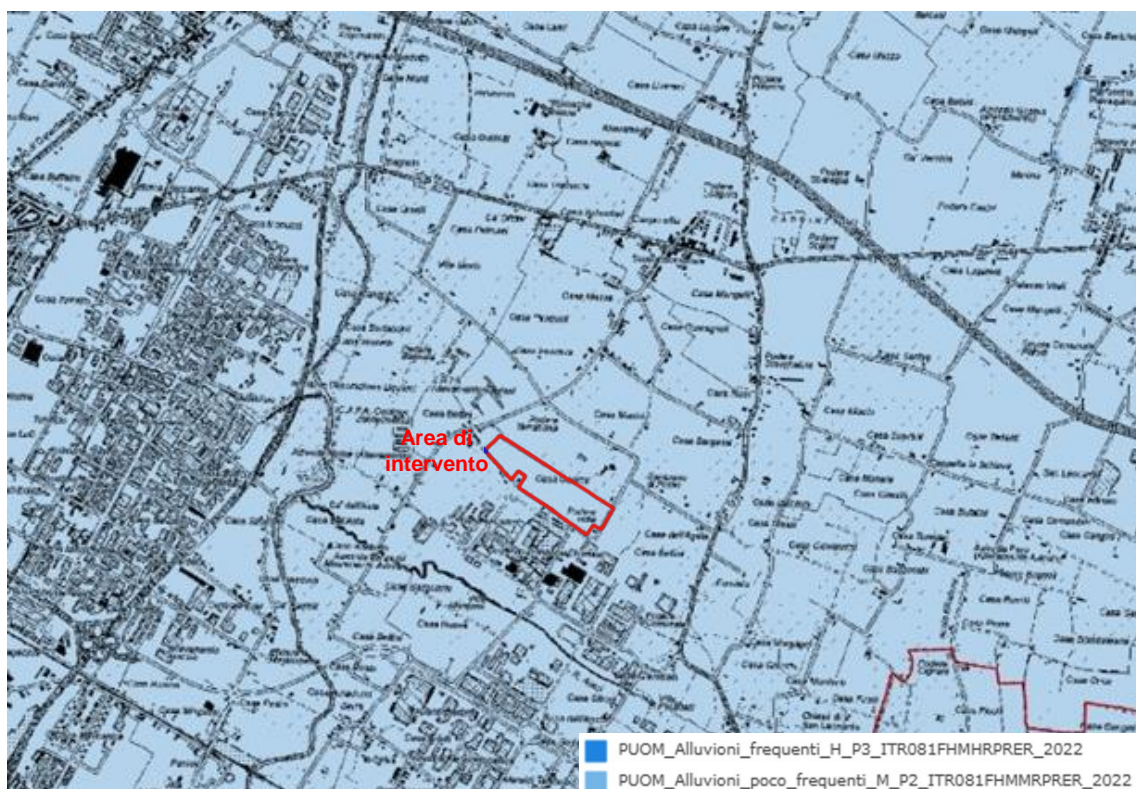


Figura 4.11 - Alluvioni reticolo secondario - Stralcio della Mappa di pericolosità (art. 6 Direttiva 2007/60/CE e art. 6 del D. Lgs. 49/2010 (Fonte: <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/DA/index.html>))

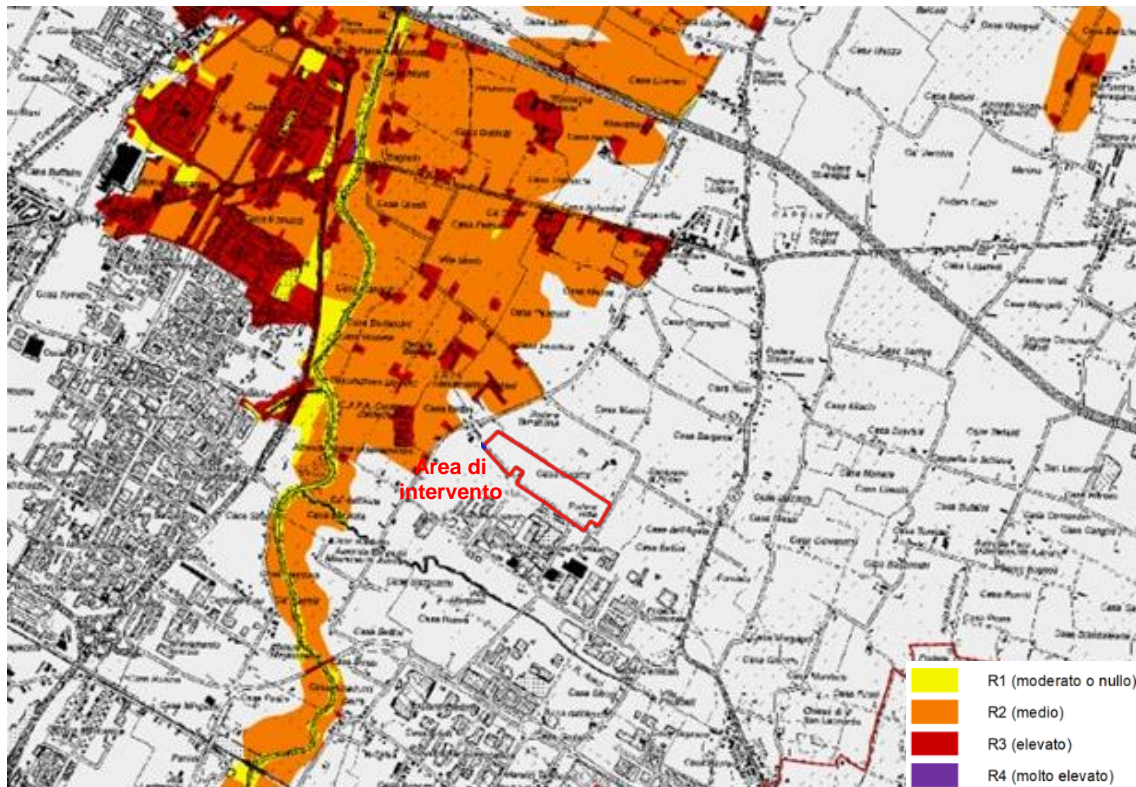


Figura 4.12 - Alluvioni reticolo principale - Stralcio della Mappa del rischio (art. 6 Direttiva 2007/60/CE e art. 6 del D. Lgs. 49/2010 (Fonte: <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/DA/index.html>))

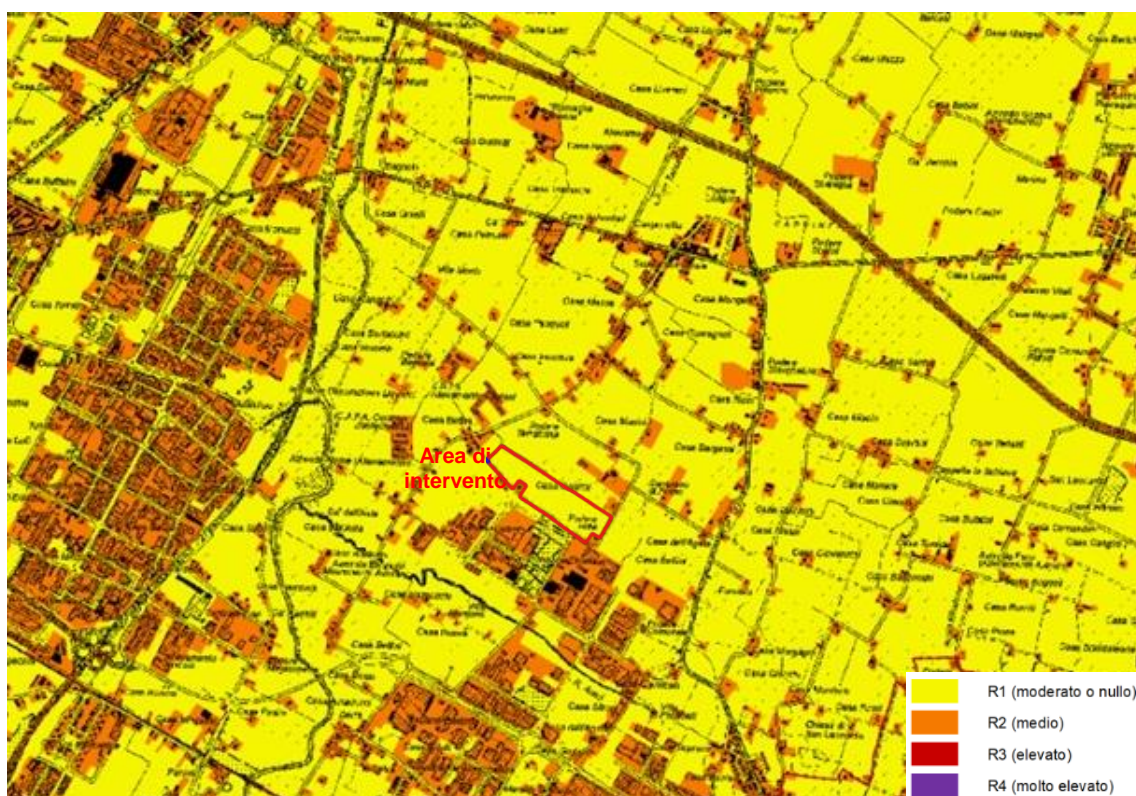


Figura 4.13 - Alluvioni reticolo secondario - Stralcio della Mappa del rischio (art. 6 Direttiva 2007/60/CE e art. 6 del D. Lgs. 49/2010 (Fonte: <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/DA/index.html>))

In riferimento invece alle recenti alluvioni succedutesi nel maggio 2023, perimetrare dalla regione Emilia Romagna (cfr. il Piano Speciale Preliminare) l'area di intervento non rientra tra le aree allagate a causa degli eventi piovosi di maggio 2023.

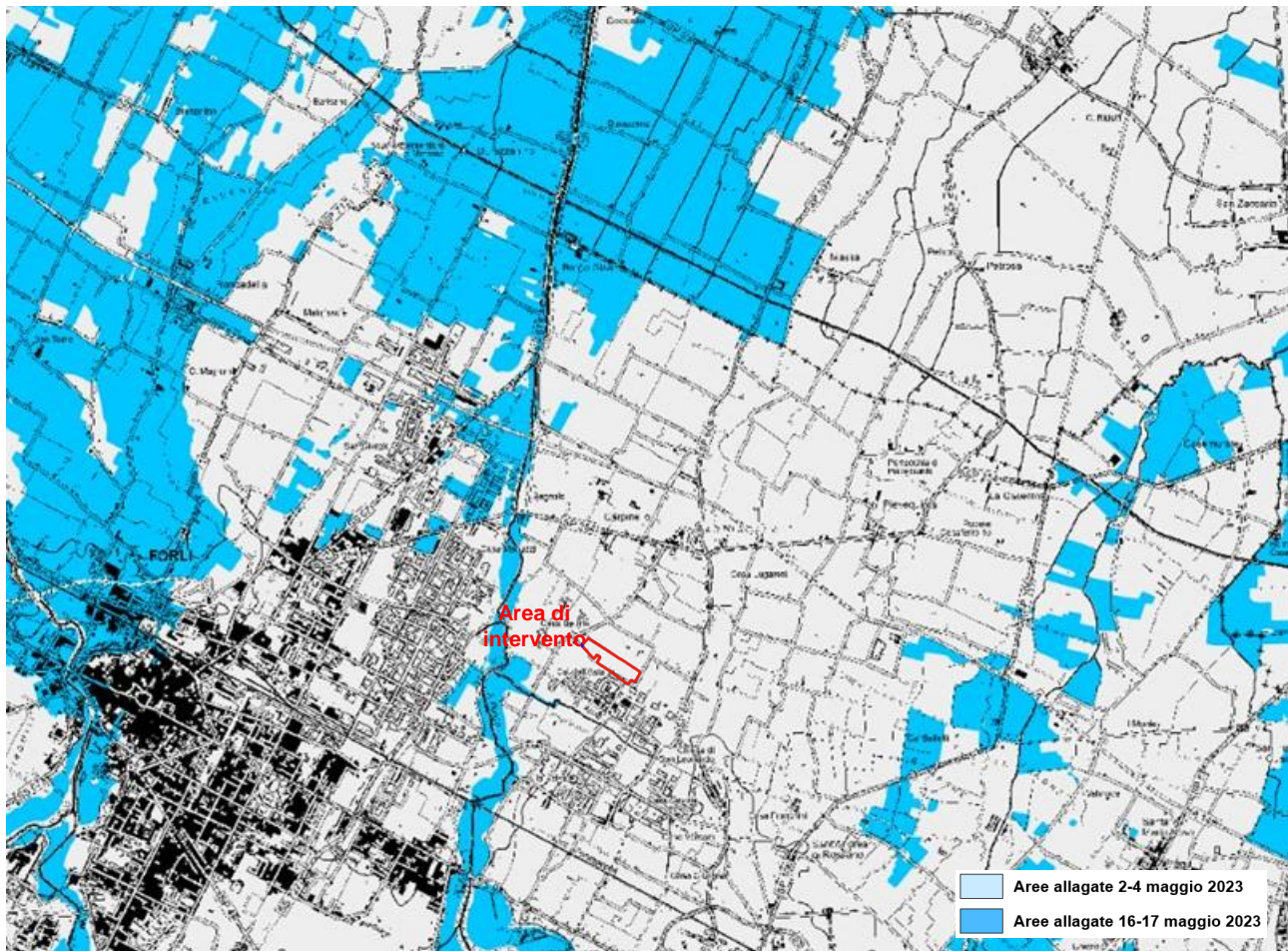


Figura 4.14 - Aree allagate a seguito dei eventi piovosi di maggio 2023 (Fonte: [https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/allagam\\_202305/index.html](https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/allagam_202305/index.html))

#### 4.4 Acque sotterranee

##### 4.4.1 Assetto idrogeologico generale

Le caratteristiche degli acquiferi del territorio in esame vanno inquadrare nel modello evolutivo tridimensionale, sia idrogeologico che stratigrafico, dell'intera Pianura Padana emiliano-romagnola. Secondo i più recenti studi (cfr. Regione Emilia-Romagna, Eni-Agip, 1998) si distinguono, sia in superficie che nel sottosuolo, 3 Unità Idrostratigrafiche di rango superiore, denominate Gruppi Acquiferi. Esse affiorano sul margine meridionale del Bacino Idrogeologico della Pianura per poi immergersi verso nord al di sotto dei sedimenti depositati dal fiume Po e dai suoi affluenti negli ultimi 20.000 anni, contenenti acquiferi di scarsa estensione e potenzialità (Acquifero Superficiale).

Ciascun Gruppo Acquifero risulta idraulicamente separato, almeno per gran parte della sua estensione, da quelli sovrastanti e sottostanti, grazie a livelli argillosi di spessore plurimetrico sviluppati a scala regionale.

L'Unità Idrostratigrafico-Sequenziale affiorante nell'area in esame e direttamente coinvolta dalle opere di fondazione dell'intervento in progetto è denominata Gruppo Acquifero A, che ricalca il Sintema Emiliano Romagnolo superiore (450.000-350.000 anni BP). Il Gruppo acquifero A è essenzialmente caratterizzato da:

- ghiaie e sabbie prevalenti nella pianura pedemontana;
- depositi prevalentemente fini argillosi e/o limosi attraversati in senso meridiano da corpi nastriformi di ghiaie e sabbie, nella pianura a crescita verticale;
- presenza di estese bancate sabbiose a sviluppo tabulare, a partire dall'allineamento dei centri frazionali di Paradigna e Bogolese fino all'asse fluviale del Po.

Il gruppo Acquifero A è ulteriormente suddivisibile in 5 Complessi Acquiferi, riferibili ad altrettanti Sequenze Deposizionali Elementari, contrassegnati dal superiore all'inferiore, come di seguito elencato:

- Complesso Acquifero A0;

- Complesso Acquifero A1;
- Complesso Acquifero A2;
- Complessi Acquiferi A3 e A4.

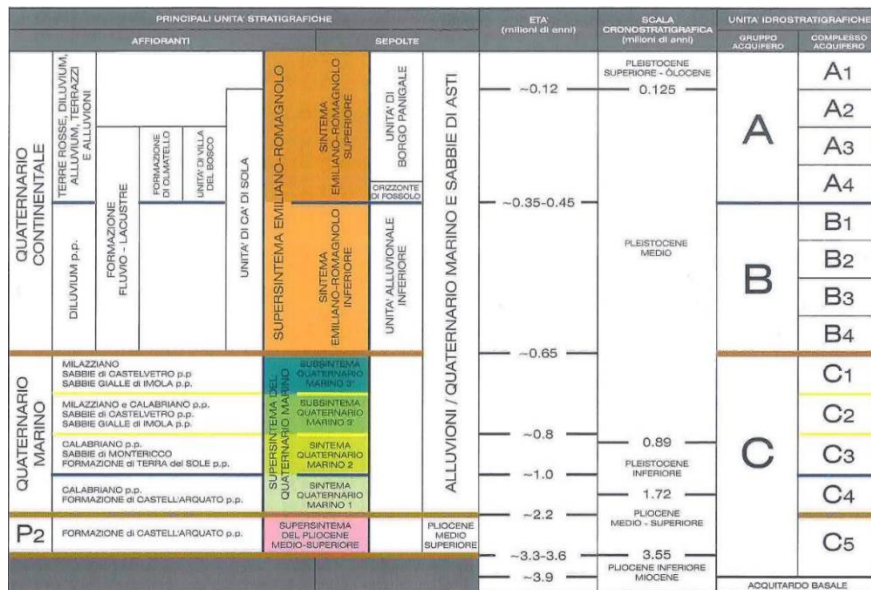


Figura 4-15 - Inquadramento geologico-stratigrafico e idrostratigrafico della Pianura Padana (Fonte: R.E.R., ENI-AGIP 1998)

I complessi acquiferi superficiali sono il Complesso Acquifero A0 e il Complesso Acquifero A1. In particolare si distingue una unità pellicolare denominata A0, posta superiormente ad A1; questa unità corrisponde a depositi di età pleistocenica terminale ed olocenica, sedimentatisi dopo l'ultima glaciazione.

L'unità A0 comprende quindi i depositi presenti nel primo sottosuolo della pianura, nonché gran parte di quelli affioranti. Le porzioni grossolane di A0 sono costituite da corpi non molto estesi, volumetricamente poco rilevanti, e, quando non sono amalgamate a depositi permeabili dell'unità A1, costituiscono degli acquiferi sfruttati esclusivamente a fini domestici. Ciò si verifica in un'ampia zona della pianura emiliana, interposta tra le conoidi appenniniche e i complessi acquiferi di pertinenza padana, di ampiezza sempre maggiore spostandosi da ovest verso est (cartografata, cautelativamente, considerando amalgamati anche corpi permeabili separati tra loro da uno spessore di argilla potente sino a due metri circa).

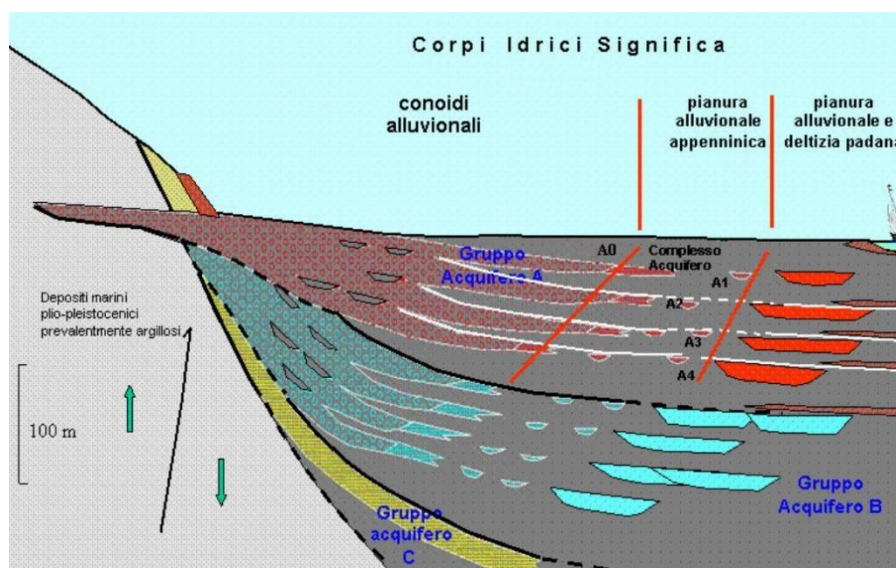


Figura 4-16 - Sezione idrostratigrafica rappresentativa del Bacino Pleistocenico della Pianura Emiliano Romagnola. Figura tratta dagli elaborati conoscitivi a supporto del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna.

#### 4.4.2 Assetto idrogeologico locale

L'edificio sedimentario alluvionale ospita un sistema acquifero sotterraneo, le cui caratteristiche idrogeologiche sono in stretta relazione con le caratteristiche granulometriche dei depositi: ai depositi argilloso-limosi può essere attribuita una permeabilità bassa ( $k = 10^{-6} \div 10^{-8}$  cm/s), mentre i depositi ghiaiosi presentano una permeabilità elevata ( $k = 10^{-1} \div 10^{-3}$  cm/s), localmente ridotta dalla presenza di significative percentuali di matrice fine. Ogni unità è separata da quelle adiacenti attraverso livelli scarsamente permeabili o impermeabili arealmente continui, che ne determinano l'isolamento idraulico. Ne consegue che i flussi idrici si propagano principalmente con componente parallela alle superfici di strato e solo secondariamente con componente ortogonale e di conseguenza i flussi possono essere considerati necessariamente confinati all'interno della medesima unità. Il limite della circolazione idrica sotterranea è costituito dall'Acquitrando Basale, rappresentato dalla formazione impermeabile plio-pleistocenica delle Argille Azzurre affiorante nella fascia di margine appenninico.

Le alluvioni della pianura costituiscono formazioni con importanti livelli permeabili; esse sono delimitate a monte dalle formazioni collinari decisamente impermeabili o semipermeabili ad eccezione delle zone in corrispondenza degli alvei fluviali dove le alluvioni permeabili si addentrano, restringendosi progressivamente verso monte, nelle formazioni impermeabili, costituendo con le acque fluviali e di subalveo le zone più importanti per l'alimentazione dei conoidi sotterranei. La sede dell'acquifero è costituita da un insieme di strati ghiaiosi molto dispersi, verso la pianura, entro una naturale massa di sedimenti argillosi e limosi la cui alimentazione, come già detto, è legata prevalentemente ai subalvei dei fiumi ed alla permeabilità delle zone pedecollinari. I contenitori principali delle acque dolci, attualmente sfruttate per gli usi idropotabili, sono pertanto costituiti dai conoidi dei corsi d'acqua che interessano il territorio comunale, i quali, di conseguenza, risultano zone altamente vulnerabili all'inquinamento.

Durante l'esecuzione delle indagini geognostiche per la definizione dei terreni il livello della falda è risultato compreso tra 1 e 1,3 m da p.c.

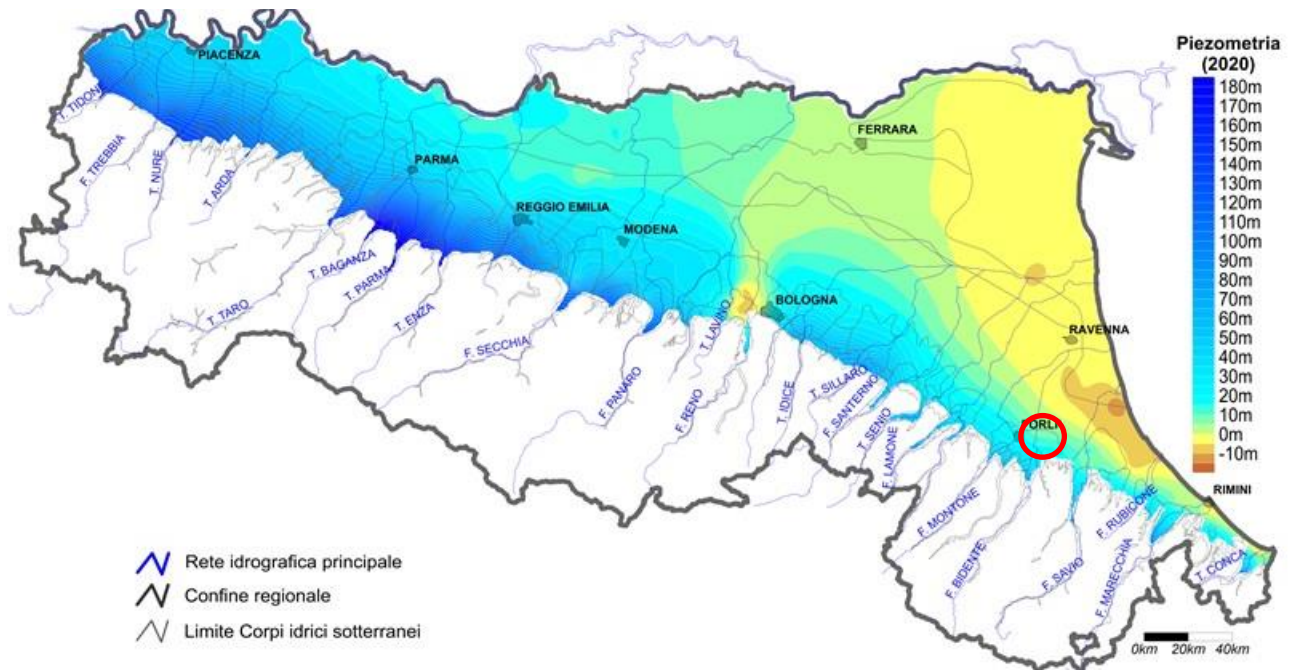
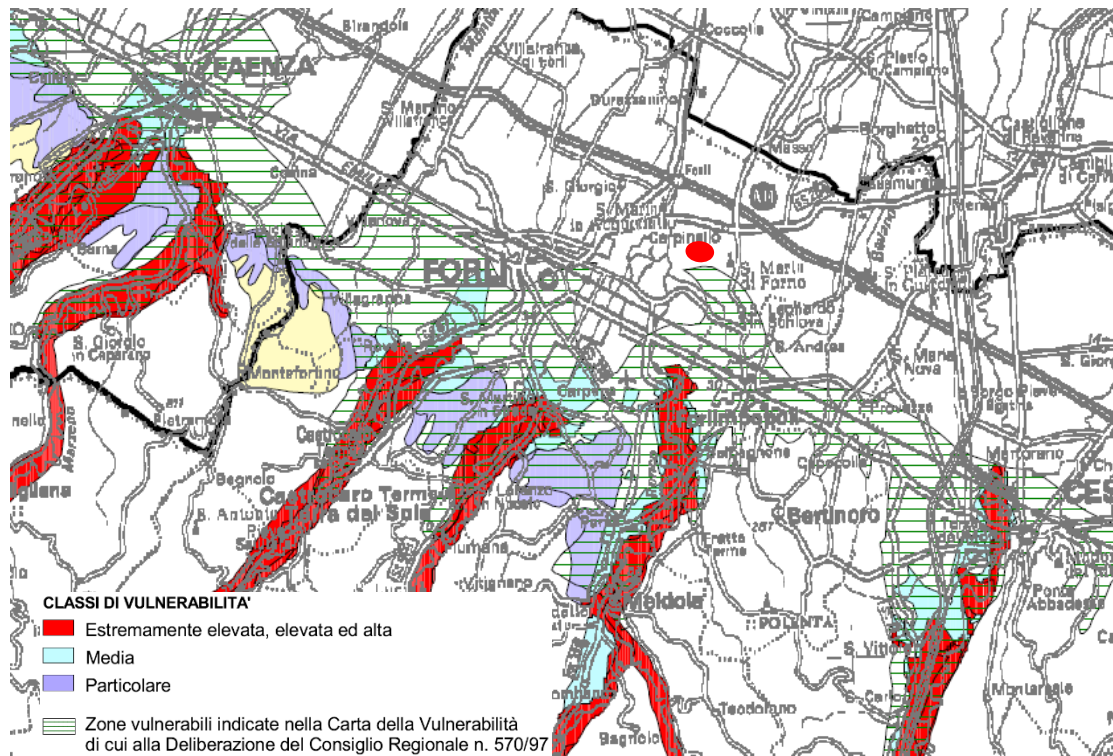


Figura 4.17 – Piezometria media annua nei corpi idrici liberi e confinati superiori (2020). (Fonte: ARPAE)

Per acquisire indicazioni riguardanti la vulnerabilità degli acquiferi presenti si può prendere in esame la *Carta regionale della Vulnerabilità*, elaborata dalla Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e Servizio di Tutela e Risanamento della Risorsa Acqua (2002), riportata in Figura 4-18, ove si evidenzia che l'intervento risulta esterno alle aree vulnerabili.



**Figura 4-18 – Vulnerabilità degli acquiferi (Fonte: Carta della vulnerabilità degli acquiferi, Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e Servizio di Tutela e Risanamento della Risorsa Acqua, 2002)**

## 5 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI IN SITO

Per la caratterizzazione litostratigrafica, geomeccanica e sismica dell'area di progetto dell'impianto fotovoltaico, nel giorno 7 aprile 2025 sono state effettuate le seguenti tipologie di indagini geognostiche in sito:

- N. 3 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTU);
- N. 1 misura sismica attiva (MASW);
- N. 1 misura dei Microtremori (HVSr) con TROMINO.

Le intense precipitazioni che si sono manifestate dall'inizio dell'anno 2025 hanno reso il terreno impraticabile dai mezzi su cui è montato il penetrometro, soprattutto nella parte nord ovest, per cui non è stato possibile eseguire tutte le indagini inizialmente previste.

In Figura 5-1 è riportata la distribuzione delle indagini in corrispondenza dell'impianto fotovoltaico; inoltre si riporta l'ubicazione di un sondaggio a carotaggio continuo tratto dall'archivio della regione Emilia-Romagna (<https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/geg/index.html>).



Figura 5-1 - Ubicazione delle indagini geognostiche in corrispondenza dell'impianto fotovoltaico

### **Prova penetrometrica statica con punta elettrica**

Lo strumento utilizzato per le prove CPTU è un penetrometro statico modello olandese che può raggiungere un carico di spinta pari a 30 t, dotato di punta elettrica di tipo "friction jacket cone". La punta collegata ad un sistema di aste viene spinta nel terreno tramite un pistone idraulico ad una velocità costante di 20 mm/s ed è congegnata in modo da permettere la lettura della resistenza alla penetrazione ogni 2 cm di avanzamento delle sue due parti: punta conica (superficie = 10 cm<sup>2</sup>, angolo di incidenza 60°) e manicotto (superficie 150 cm<sup>2</sup>).

Le indagini sono state eseguite da tecnici della società S.G.T. sas di Van Zutphen Albert & C.

La litologia del terreno è stata ricostruita utilizzando la teoria proposta da Robertson (1990). In allegato 1 è riportato il risultato delle prove sotto forma di grafici che rappresentano l'andamento con la profondità dei valori di resistenza alla punta (curva Qc) e di resistenza laterale (curva Fs). Sempre in forma grafica è riportata l'interpretazione litologica secondo il sopra citato autore.



**Figura 5-2 - Esecuzione CPTU-1**



**Figura 5-3 - Esecuzione CPTU-2**



**Figura 5-4 - Esecuzione CPTU-3**

### TROMINO

Il tremore sismico, comunemente definito “rumore sismico”, esiste ovunque sulla superficie della terra. Esso è principalmente costituito da onde superficiali, ovvero da onde elastiche prodotte dall’interferenza costruttiva di onde P ed S che si propagano negli strati superficiali. Il rumore sismico è prodotto essenzialmente dal vento o dalle onde marine. A questo rumore di fondo, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ecc.) e naturali.

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S. In essi giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S, il che spiega la dipendenza di tutta la formulazione della velocità di queste ultime.

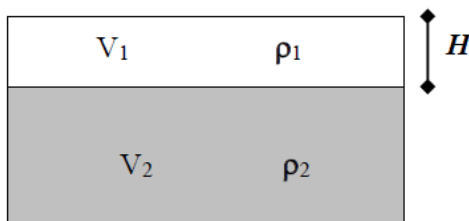
Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l’informazione relativa al sottosuolo da rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell’uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoschi e Igaraschi (1970).

La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

Le basi teoriche dell’H/V sono relativamente facili da comprendere in un mezzo del tipo strato + bedrock (o strato assimilabile al bedrock) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato. Considerando lo schema della figura sottostante, gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un’onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizioni di risonanza) quando la lunghezza dell’onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato. La frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde S è pari a:

$$f_r = \frac{V_{s1}}{4 * H}$$

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l’informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi dello spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando la sopra riportata equazione.



L’inversione richiede l’analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un’importante normalizzazione del segnale per a) in contenuto di frequenza, b) la risposta strumentale e c) l’ampiezza del segnale, quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

Un aspetto assai importante è che il rumore sismico agisce come sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo e degli edifici più o meno come una luce bianca diffusa illumina gli oggetti eccitando le lunghezze d’onda tipiche di ciascun oggetto e dandogli il suo tipico colore.

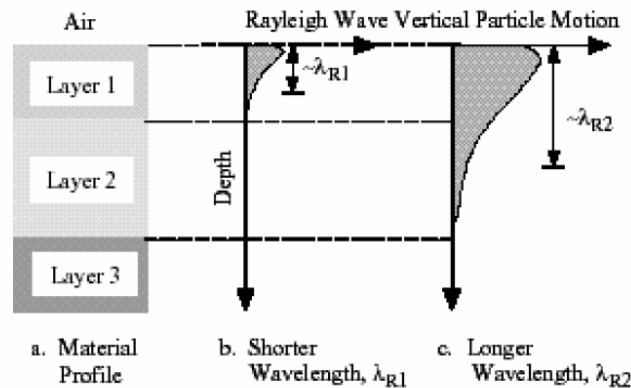
Questo risulta molto importante a livello ingegneristico, perché, se un edificio ha frequenze proprie di vibrazione uguali a quelle del substrato su cui è fondato, durante un sisma, si assiste al fenomeno dell’accoppiamento delle vibrazioni. Questo effetto di amplificazione sismica produrrà un grande aumento della sollecitazione sugli edifici.

### MASW

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980), o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e, quindi, danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e, quindi, interessano gli strati più profondi del suolo.

Le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo SASW-MASW si mantiene fisso il sensore di misura e si sposta a intervalli regolari il punto di generazione delle onde.



Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz; quindi, dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente circa 8÷15 m, in funzione della rigidità del suolo.

Il metodo MASW consiste in tre fasi (Roma, 2002): (1) la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, (2) la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica, (3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$ .

Altrimenti, in maniera alternativa, alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson ( $\rho$ ), la densità di massa  $\sigma$  degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

### **Combinazione del metodo HVSR e MASW e risultati**

La combinazione tra le misure HVSR e quelle MASW permettono di ottimizzare la ricostruzione del modello di velocità delle onde di taglio  $V_s$ . Infatti, le MASW permettono di ottenere le misure di velocità di taglio nei primi metri che servono da base per interpretare gli strati più profondi osservabili solo dalle misure HVSR.

In accordo con le NTC2018 e successiva circolare n.7 del 11-02-2019, la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

con:

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

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

$N$  = numero di strati;

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

## 6 CARATTERIZZAZIONE FISICO E MECCANICA DEI TERRENI

### 6.1 Caratteristiche litologiche dei terreni

La natura deposizionale tipicamente alluvionale dei sedimenti riconosciuti nell'area di intervento determina la presenza nel sottosuolo di litologie prevalentemente fini, costituite da limo argilloso, argilla e argilla limosa, alternata a livelli ove prevale la componente limosa. Sono presenti strati lentiformi di sabbia limosa e limo sabbioso, con ridotta continuità laterale. Dalla correlazione tra l'interpretazione litologica delle prove penetrometriche eseguite (CPTU 1÷3) e dei dati disponibili in archivio sono state riconosciute, 4 unità litologiche principali distinte, descritte in Figura 6.1 e Tabella 6-1.

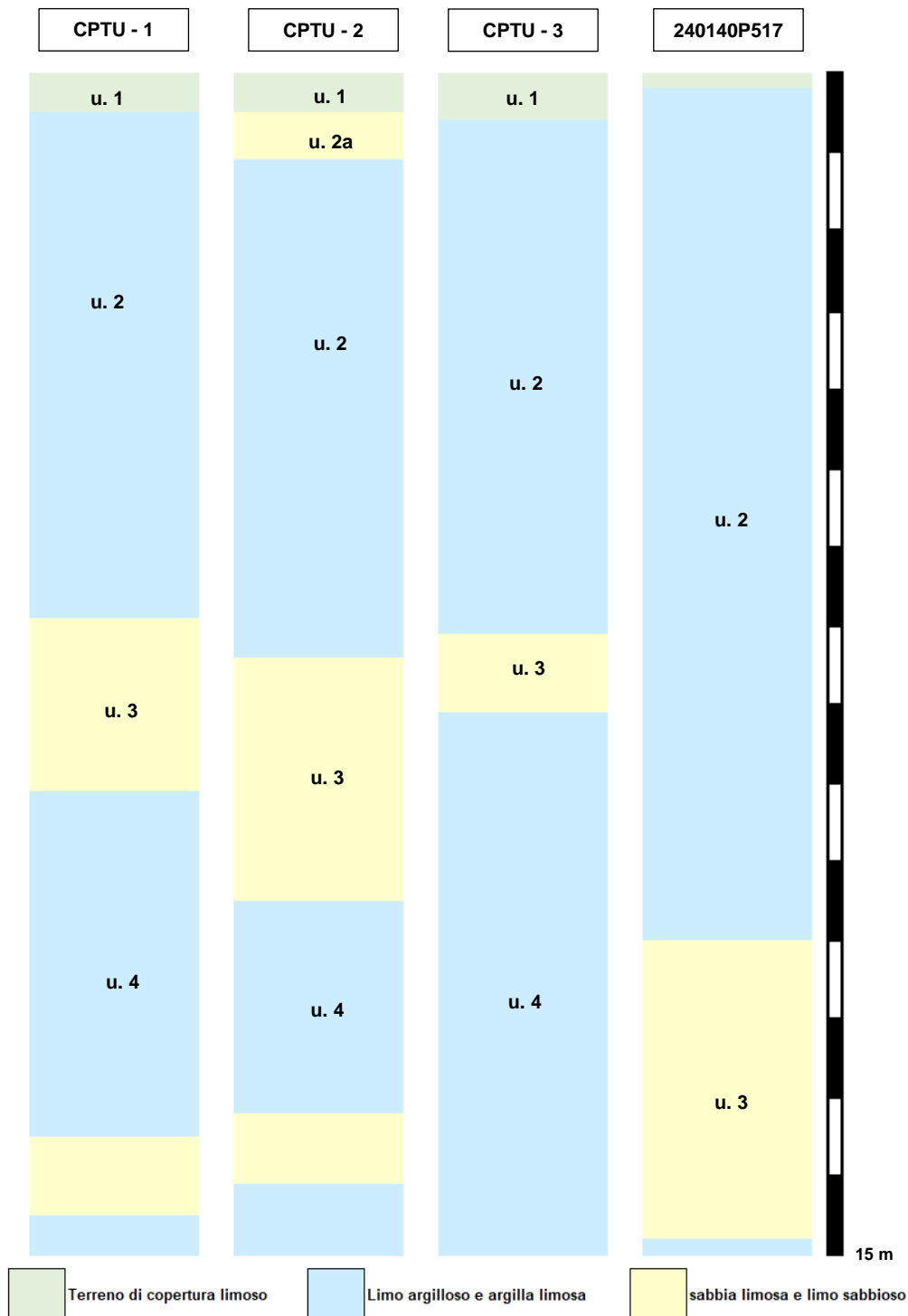


Figura 6.1 –Sezioni litologiche

Unità Litologica	Litologia	Indagini (m da p.c.)			
		CPTU-1	CPTU-2	CPTU-3	240140P517
1	Terreno di copertura limoso argilloso	0÷0,5	0÷0,5	0÷0,6	0÷0,2
2a	Limo sabbioso e sabbia limosa	assente	0,5÷1,2	assente	assente
2	Limo argilloso e argilla limosa	0,5÷6,9	1,2÷7,5	0,6÷7,1	0,2÷10,9
3	Limo sabbioso e sabbia limosa	6,9÷9,10	7,5÷10,5	7,1÷8,1	10,9÷14,8
4	Limo argilloso e argilla limosa con lenti di sabbia limosa	9,10÷14,5	10,5÷14,2	8,1÷15,0	14,8÷15,0

**Tabella 6-1 - Successione litostratigrafica**

## 6.2 Modello geotecnico e valori caratteristici dei parametri geotecnici

Per le strutture connesse all'impianto (cabine MT/BT, cabine utente e cabina di consegna) è previsto il ricorso a fondazioni di tipo superficiale a platea.

I parametri geotecnici di interesse ai fini delle verifiche geotecniche aderenti al caso in esame sono:

- peso per unità di volume  $\gamma$ ;
- coesione non drenata  $c_u$ ;
- angolo di resistenza al taglio  $\phi'$ ;
- densità relativa  $D_r$ .

Per la definizione dei valori caratteristici dei parametri fisici e geomeccanici di interesse, si è proceduto secondo le indicazioni delle NTC 18 all'individuazione del volume significativo di terreno in relazione alle strutture di fondazione previste. Molto cautelativamente dato che si tratta di fondazioni su platea con lato inferiore o prossimo a 3 m si è assunto di considerare valori caratteristici uguali al valore minimo. In Tabella 6-2 sono riportati i parametri caratteristici ( $X_k$ ) corrispondenti alle unità litotecniche individuate.

Unità Litologica	Litologia	$\gamma$ (val. medio) (t/m <sup>3</sup> )	$c_{uk}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'_k$ (°)	$D_r$ (val. medio) (%)
1	Terreno di copertura limoso argilloso	1,5	0,2	---	---
2a	Limo sabbioso e sabbia limosa	1,6	---	28	30
2	Limo argilloso e argilla limosa	1,7	0,3	---	---
3	Limo sabbioso e sabbia limosa	1,8	---	30	40
4	Livelli sabbiosi	1,8	---	32	30
	Livelli limoso-argillosi	1,7	0,5	---	---

**Tabella 6-2 - Parametri caratteristici**

Nel modello geotecnico individuato la superficie topografica è stata assunta piana e sulla base delle misure delle quote d'acqua effettuate all'interno dei fori ottenuti con le prove penetrometriche e delle ipotizzabili oscillazioni stagionali, la falda è stata considerata cautelativamente alla profondità minima di 1,0 m da p.c.

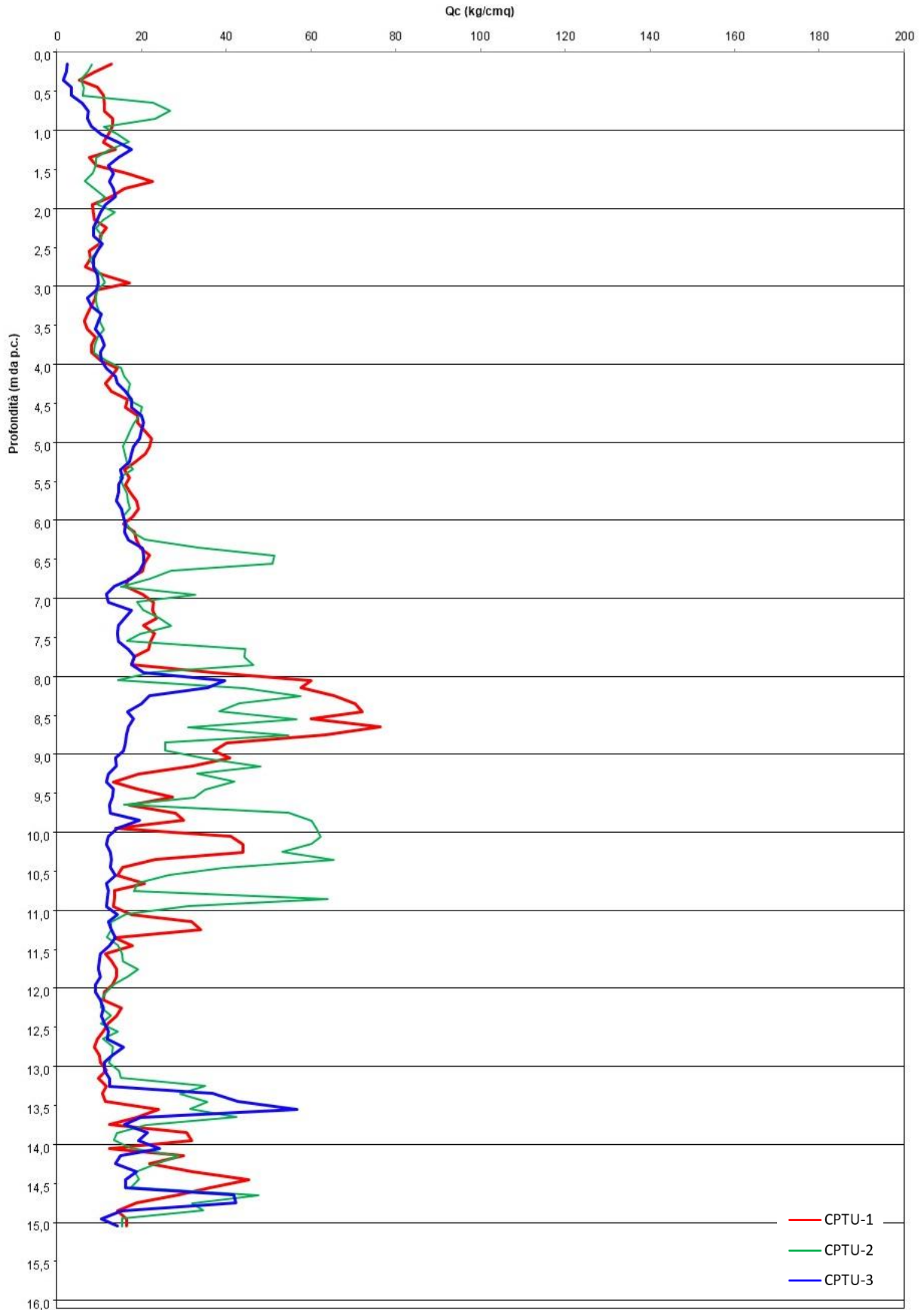


Figura 6-2 - Andamento dei valori di resistenza alla punta  $Q_c$  rispetto alla profondità

## 7 SISMICA

### 7.1 Pericolosità sismica

“La Regione Emilia Romagna non è esente da attività sismo-tettonica. La sua sismicità può però essere definita media relativamente alla sismicità nazionale, poiché i terremoti storici hanno avuto magnitudo massima compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter e intensità del IX-X grado della scala MCS. I maggiori terremoti (Magnitudo > 5,5) si sono verificati nel settore sud-orientale, in particolare nell’Appennino Romagnolo e lungo la costa riminese.

Altri settori interessati da sismicità frequente ma generalmente di minore energia (Magnitudo < 5,5) sono il margine appenninico-padano tra la Val d’Arda e Bologna, l’arco della dorsale ferrarese e il crinale appenninico” (Fonte: *Note illustrative, Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna*, 2004). Gli eventi sismici del maggio 2012 hanno avuto magnitudo ML massima 5,9.

In Figura 7.1 si riporta uno stralcio della mappa della zonazione sismogenetica SZ9 (fonte: <http://zonesismiche.mi.ingv.it> e Gruppo di Lavoro (2004)-Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCM 3274 del 20 Marzo 2003, Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp, + 5 appendici,) e la distribuzione degli epicentri dei terremoti storici (Fonte: Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>). L’area di intervento ricade in corrispondenza della zona sismogenetica 914 Forlivese che è caratterizzata da una magnitudo momento massima pari a 5,91.

In Tabella 7-1 sono riportati gli eventi sismici storici riportati nel catalogo DBMI15<sup>1</sup> dell’INGV relativi ai terremoti il cui epicentro ricade in un raggio di circa 20 km dall’area di intervento.

A partire dal 23/10/05 trova attuazione la classificazione sismica stabilita dall’Allegato 1, punto 3 dell’Ordinanza n. 3274 /2003. In base a questa il Comune di Forlì risulta classificato zona sismica 2.

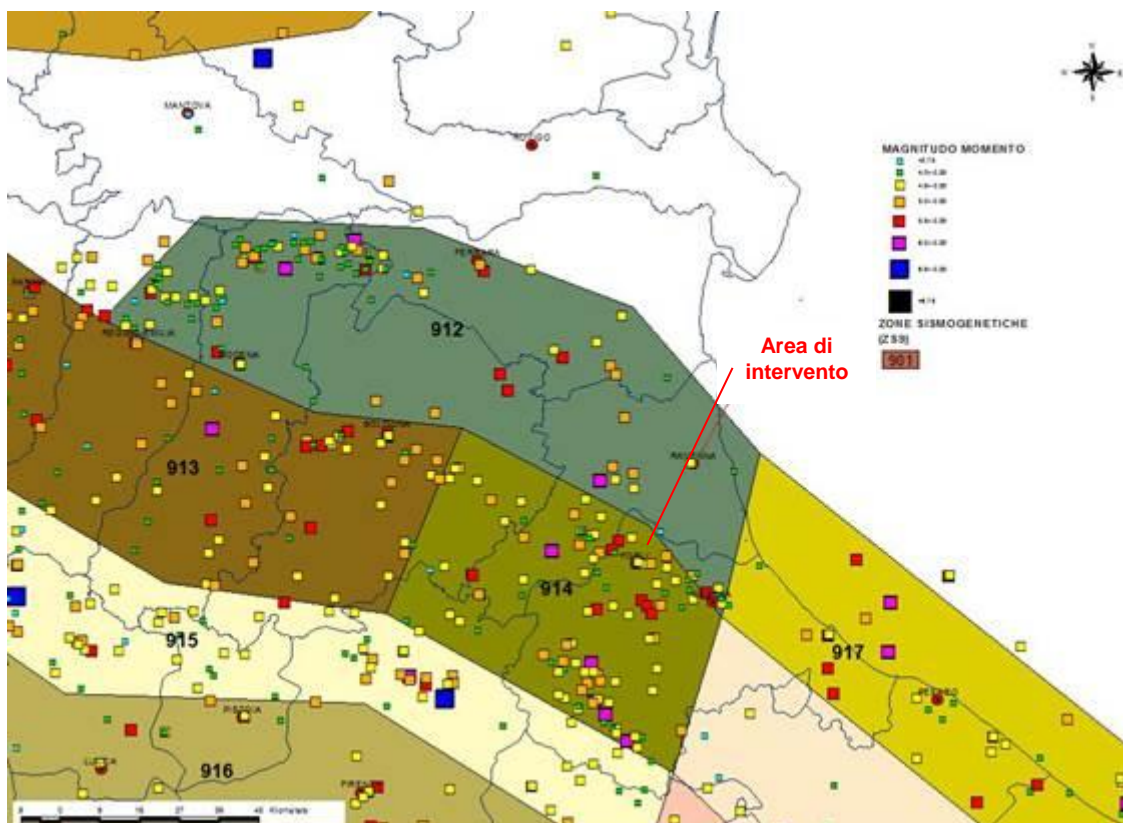


Figura 7.1 - Zone sismogenetiche (INGV) e epicentri dei terremoti storici suddivisi per classi di magnitudo (cpt15)

<sup>1</sup> Database Macrosismico Italiano 2015, Fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014.

N evento	Data	Area epicentrale	Lat	Lon	I <sub>max</sub>	I <sub>o</sub>	M <sub>w</sub>
28	??/??/1194	Galeata	44,067	12,078	7	6-7	4,86
51	30/04/1279	Appennino forlivese	44,13	11,919	7-8	7-8	5,52
115	04/08/1383	Forlì	44,222	12,04	7-8	7-8	5,33
149	20/10/1424	Appennino tosco-romagnolo	44,172	11,947	5	5	4,16
152	03/07/1428	Forlivese	44,146	12,046	8	7-8	5,47
205	10/10/1479	Forlì	44,222	12,04	6	5	4,16
212	11/08/1483	Romagna	44,155	12,229	8-9	8	5,69
222	??/01/1492	Forlì	44,222	12,04	6-7	6-7	4,86
260	19/04/1509	Faentino	44,323	11,864	7	7	5,02
384	10/07/1591	Romagna	44,401	12,035	6-7	6-7	5,13
481	15/08/1653	Romagna	44,216	12,055	6-7	5-6	4,4
528	19/08/1688	Faentino	44,288	11,881	5	5	4,16
530	19/03/1689	Faentino	44,281	12,107	5	4	3,7
600	16/09/1703	Faentino	44,288	11,881	6	6	4,63
691	09/08/1732	Romagna	44,288	11,878	6	6	4,63
852	11/06/1778	Forlì	44,222	12,04	6-7	5-6	4,4
885	17/07/1781	Faentino	44,268	11,987	8	8	5,61
1025	21/09/1813	Romagna	44,25	11,97	7	7	5,28
1078	08/04/1828	Appennino forlivese	44,115	12,004	6	6	4,63
1081	08/10/1828	Romagna	44,174	12,09	6	5-6	4,57
1182	10/03/1844	Forlivese	44,18	12,142	6-7	5-6	4,4
1296	16/10/1861	Romagna	44,233	12,121	7	6-7	5,13
1343	30/10/1870	Forlivese	44,133	12,062	8	8	5,61
1344	22/01/1871	Pianura romagnola	44,218	12,075	6	6	4,95
1440	02/02/1881	Russi	44,371	12,033	6-7	5-6	4,69
1454	28/09/1881	Cesena	44,142	12,189	7	6-7	4,71
1535	30/09/1887	Faenza	44,288	11,881	6	5	4,12
1574	01/08/1891	Lugo	44,353	11,896	5	4-5	4,36
2033	19/02/1911	Forlivese	44,117	12,074	7	7	5,26
2037	20/03/1911	Forlivese	44,189	12,193	6-7	6	5,09
2112	13/01/1915	Cesenate	44,161	12,261	5-6	5	4,38
2212	08/02/1918	Appennino forlivese	44,133	12,1			4,84
2501	05/06/1935	Faentino	44,26	11,876	6	6	5,23
2710	14/12/1953	Appennino forlivese	44,064	12,061	5-6	5-6	4,7
2835	08/05/1961	Forlivese	44,134	11,962	5	5	4,37
2907	18/12/1965	Pianura romagnola	44,27	12,021	5-6	5	4,54
2916	20/10/1966	Romagna	44,13	12,27			4,36
2936	11/01/1968	Pianura romagnola	44,279	11,909	4	4	4,44
2980	10/01/1969	Pianura Ravennate	44,39	11,983	5	5	4,38
3203	05/12/1978	Romagna	44,124	11,891	4-5	4-5	4,61
3721	05/11/1993	Cesenate	44,194	12,205	4-5	4-5	3,99
3722	07/11/1993	Cesenate	44,181	12,18	5	4-5	3,95
3723	09/11/1993	Cesenate	44,141	12,269	5	4-5	3,93
3784	27/12/1995	Forlivese	44,156	12,113	5-6	5	3,97
4020	02/05/2000	Faentino	44,203	11,924			4,1
4021	06/05/2000	Faentino	44,243	11,973	5-6	5	4,08
4022	07/05/2000	Faentino	44,202	11,884			4,57
4023	08/05/2000	Faentino	44,279	11,917	5-6	5	4,67
4024	09/05/2000	Faentino	44,235	11,919			4,22
4025	10/05/2000	Faentino	44,243	11,932	5-6	5-6	4,82
4026	11/05/2000	Faentino	44,274	11,904			4,16
4027	12/05/2000	Faentino	44,315	11,939			4,29
4227	07/12/2003	Forlivese	44,162	12,18	5	5	4,18
4274	15/07/2005	Forlivese	44,207	12,117	5	4-5	4,29
4366	05/04/2009	Faentino	44,23	11,913			4,71
4435	05/09/2010	Appennino forlivese	44,126	12,156			4
4596	24/04/2015	Faentino	44,249	11,908			4,19

Nota N = codice dell'elemento di catalogo; I<sub>max</sub> = intensità massima; I<sub>o</sub> = Intensità epicentrale; M<sub>w</sub> = Magnetudo momento.

**Tabella 7-1 – Eventi sismici storici riportati nel catalogo DBMI11 dell'INGV relativi al comune di Forlì (Fonte:**

<https://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>)

Le azioni sismiche di progetto sono determinate a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione. Secondo le NTC 18 la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ( $V_{s30} > 800$  m/s) viene effettuata con un approccio "sito dipendente". Nell'allegato

A delle NTC 2008 è presentata la procedura per la stima dei parametri spettrali necessari alla definizione dell'azione sismica di progetto che sono calcolati in funzione del reticolo di riferimento (Allegato B delle NTC 08):

- $a_g$  = accelerazione massima orizzontale del terreno;
- $F_0$  = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro;
- $T^*_c$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione.

Note le coordinate geografiche, si ubica il sito in esame all'interno del reticolo di riferimento, i parametri spettrali, per un determinato periodo di ritorno ( $T_R$ ), sono calcolati dalla media pesata, rispetto la distanza, dei valori riferiti ai quattro nodi del reticolo.

Il periodo di ritorno è valutato in funzione del periodo di riferimento ( $V_R$ ) che si ricava, per ciascun tipo di costruzione moltiplicando la vita nominale ( $V_N$ ) per il coefficiente d'uso ( $C_U$ ).

Per le opere in progetto nel campo fotovoltaico si è assunto:

- $V_N = 50$  anni;
- Classe d'uso I -  $C_U = 0,7$ ;
- Da cui  $V_R = 35$  anni.

Gli stati limite rispetto ai quali devono essere verificate le prestazioni di un'opera o di una parte di essa che possono verificarsi durante la  $V_N$  in presenza di azioni sismiche sono:

- Stati limite di esercizio
  - Stato Limite di Operatività (SLO).
  - Stato Limite di Danno (SLD).
- Stati limite ultimi
  - Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).
  - Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC).

La probabilità di superamento nel periodo di riferimento ( $P_{VR}$ ) a cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati sono riportati in Tabella 7-2 (Tabella 3.2.1. delle NTC 18).

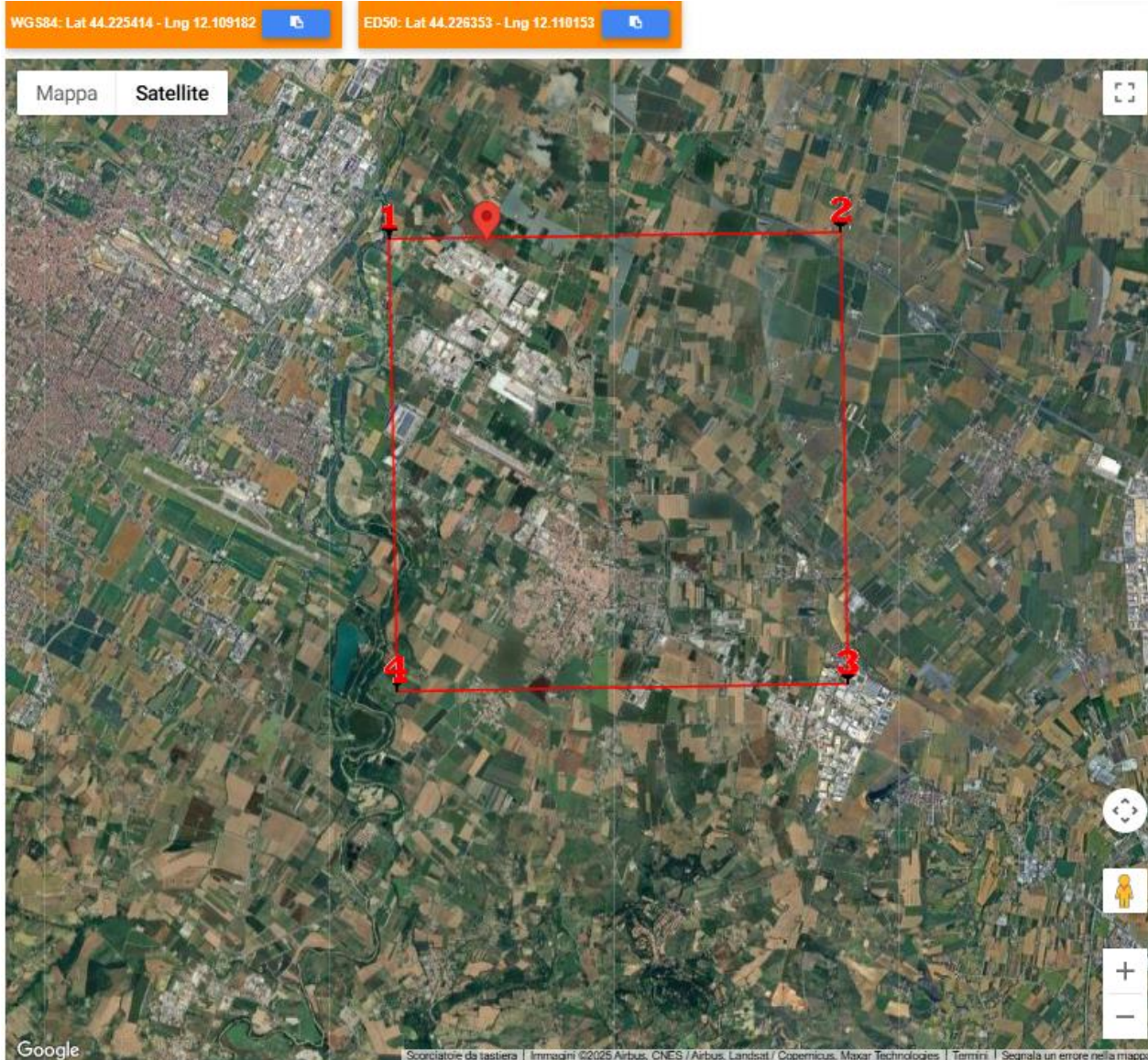
Stati Limite		$P_{VR}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$
Stati limite di esercizio	SLO	81 %
	SLD	63 %
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

**Tabella 7-2 - Probabilità di superamento  $P_{VR}$  al variare dello stato limite considerato**

In Figura 7-2 è riportata l'ubicazione del sito investigato rispetto ai nodi del reticolo di riferimento che lo circondano e in Tabella 7-3 i rispettivi codici. Le coordinate geografiche considerate rappresentative del sito sono: Lat. 44,225414°, Long. 12,109182°.

	ID	Lat.	Long.	Distanza dall'area di interesse (m)
1	18073	44,2267	12,0951	1.202
2	18074	44,2275	12,1648	4.354
3	18296	44,1775	12,1659	7.020
4	18295	44,1767	12,0963	5.636

**Tabella 7-3 – Nodi del reticolo di riferimento che circondano il sito di intervento**



**Figura 7-2 - Ubicazione dell'area di intervento rispetto al reticolo di riferimento**

I valori dei parametri spettrali ottenuti in questo modo sono relativi ad una situazione geologica assente da fenomeni locali ovvero con substrato sismico ( $V_s > 800$  m/s) affiorante e assetto morfologico pianeggiante. Nel caso in esame, non essendo rispettata la prima condizione ai fini della determinazione dell'azione sismica, occorre valutare, secondo quanto riportato nelle NTC 18, l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, oppure, qualora le caratteristiche stratigrafiche siano chiaramente riconducibili alle categorie di sottosuolo descritte nella tabella 3.2.II delle NTC 18, facendo riferimento ad un approccio semplificato, basato sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio.

Per la valutazione della  $V_{s,30}$  è stata effettuata una indagine sismica MASW accompagnata da un'indagine sismica passiva HVSR (mediante il TROMINO). I risultati dell'indagine effettuata da tecnici della società SGT sas sono riportati in allegato. In base ai valori di  $V_{s,30}$  misurati i terreni investigati risultano caratterizzabili all'interno della categoria di sottosuolo C.

Rispetto le condizioni topografiche il sito risulta classificato nella categoria T1.

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  calcolati mediante l'utilizzo dell'applicativo Gesostru-PS (<https://geoapp.eu/parametrisismici2018/>) sono riportati in Tabella 7-4.

Stato limite	P <sub>V</sub> R	T <sub>R</sub> (anni)	a <sub>g</sub> (g)	F <sub>o</sub>	TC*
Operatività	81%	30	0,063	2,416	0,264
Danno	63%	35	0,067	2,413	0,267
<b>Salv. Vita</b>	<b>10%</b>	<b>332</b>	<b>0,176</b>	<b>2,382</b>	<b>0,303</b>
Collasso	5%	682	0,225	2,417	0,314

 Tabella 7-4 – Valore dei parametri A<sub>g</sub>, F<sub>o</sub> e T<sub>c</sub>

Stato limite	S <sub>s</sub>	S <sub>T</sub> (anni)	a <sub>max</sub> = a <sub>g</sub> *g*S <sub>s</sub> *S <sub>T</sub>
Operatività (SLO)	1,50	1,00	0,921
Danno (SLD)	1,50	1,00	0,991
<b>Salv. Vita (SLV)</b>	<b>1,45</b>	<b>1,00</b>	<b>2,501</b>
Collasso (SLC)	1,37	1,00	3,024

 Tabella 7-5 – Valore di a<sub>max</sub> (m/sec<sup>2</sup>) per la categoria di suolo C

Secondo le indicazioni delle NTC 18 tra gli effetti indotti da un sisma occorre verificare la stabilità dei terreni alla liquefazione che viene così definita “*fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate*”.

Le NTC al riguardo forniscono una lista di circostanze da analizzare per il sito in esame delle quali, se ne risulta verificata almeno una, viene esclusa la necessità di verifica della suscettibilità dei terreni alla liquefazione. Di seguito è riportato testualmente l'elenco, tratto dalle NTC 18, delle circostanze da verificare:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N1)60 > 30 oppure qc1N > 180, dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità U<sub>c</sub> < 3,5 ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità U<sub>c</sub> > 3,5.

Le indagini sviluppate in questa fase hanno consentito di valutare che dei primi tre punti in elenco nessuno è verificato; mentre, per decidere se prelevare dei campioni di terreno e valutare il punto 4, è stata effettuata una valutazione della suscettibilità dei terreni alla liquefazione applicando i metodi semplificati basati sulle interpretazioni derivanti dalle CPTU effettuate, che hanno evidenziato la presenza di terreni con caratteristiche tali da comportare la verifica entro i primi 15 m di profondità dal piano campagna.

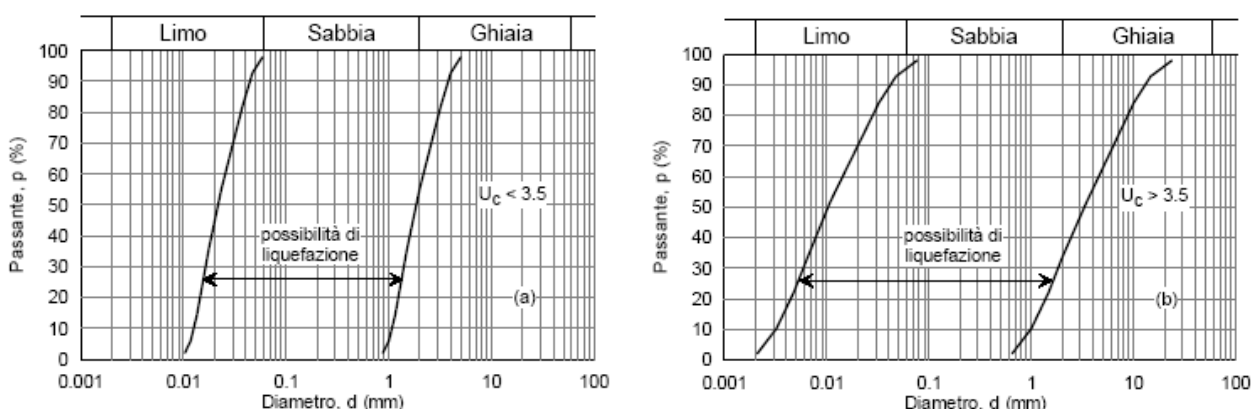


Tabella 7-6 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

## 7.2 Valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni

I metodi semplificati di valutazione del rischio sismico di liquefazione da prove in sito sono di tipo storico-empirico in quanto utilizzano una base dati, la più ampia possibile, di informazioni sul comportamento osservato di siti sabbiosi in occasione di terremoti storici.

La resistenza che un deposito sabbioso saturo oppone alla liquefazione viene definita attraverso il fattore di sicurezza. Il fattore di sicurezza  $F_s$  è definito dal rapporto tra il parametro che definisce la resistenza alla liquefazione denominato CRR (Cyclic Resistance Ratio), desunto dai risultati di prove in sito e nel caso in esame dalle CPT e il parametro di carico sismico che è la tensione tangenziale sismica CSR (Cyclic Stress Ratio) che è stimato sulla base di considerazioni teoriche ed empiriche, delle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione di picco in superficie.

$$F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

Nell'analisi è stato considerato come valore di magnitudo, quello della magnitudo momento massima ( $M_{wMax}$ ) della zona sismogenetica in cui ricade il sito. Il dato è stato tratto da *Gruppo di Lavoro (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 Marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.*

I dati utilizzati per la stima del potenziale di liquefazione sono i seguenti:

- ✓ Come zona sismogenetica di riferimento è stata utilizzata la n. 912, con magnitudo  $M_{wMax}$  di 6,14.
- ✓ Come classe d'uso è stata considerata la classe d'uso I;
- ✓ Il valore di  $a_{max}$  per l'area di intervento è pari a 1,642 m/s<sup>2</sup>.
- ✓ La profondità della falda considerata nei calcoli corrisponde alla quota d'acqua rilevata nelle indagini geognostiche.

La stima del CRR è stata effettuata considerando i dati delle prove CPTU effettuate. Per quanto riguarda le analisi sviluppate utilizzando i dati delle prove CPTU, i risultati sono stati espressi in termini di Indice del Potenziale di Liquefazione ( $IP_L$ ) (Iwasaki et al., 1982) che è un indice utilizzato per rappresentare il rischio di liquefazione (Tabella 7-7):

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

$$F(z) = 1 - F_s(z) \quad \text{per } F_s \leq 1,0$$

$$F(z) = 0,0 \quad \text{per } F_s > 1,0$$

$$W(z) = 10^{-10} (z/z_{crit})$$

$z_{crit} = 20$  m valore della profondità alla quale può escludersi il fenomeno della liquefazione.

Valore di $IP_L$	Rischio di liquefazione
$IP_L = 0$	Molto basso
$0 < IP_L \leq 5$	Basso
$5 < IP_L < 15$	Alto
$IP_L > 15$	Molto alto

Tabella 7-7 – Valutazione del rischio di liquefazione in funzione del valore di  $IP_L$  (IWASAKI ET AL. 1978)

I valori di  $IP_L$  stimati sono riportati in Tabella 7-8 e in Allegato 3.

Sulla base del valore dell'indice  $IP_L$  è possibile indicare che per i terreni investigati il rischio di liquefazione risulta "basso". Seguendo il metodo Boulanger&Idriss 2014 si segnala in corrispondenza della CPTU1 rischio 'alto' di liquefazione.

RIEPILOGO ANALISI DI LIQUEFAZIONE PER  $T_r = 332$  ANNI

	Profondità raggiunto (m)	Metodo AGI 2005		Metodo Robertson & Cabal 2009		Metodo Boulanger & Idriss 2014		
		Indice del potenziale di liquefazione II	Cedimento atteso (cm)	Indice del potenziale di liquefazione II	Cedimento atteso (cm) granulare / totale	Indice del potenziale di liquefazione II	Cedimento atteso (cm)	
CPT 1	senza correzione per strati sottili	15.00	7.6	16.6	4.0	12.5 / 13.3	10.3	19.1
	<b>con correzione per strati sottili</b>		<b>4.6</b>	<b>13.2</b>	<b>1.9</b>	<b>8.5 / 9.3</b>	<b>6.5</b>	<b>15.5</b>
CPT 2	senza correzione per strati sottili	15.02	8.1	18.5	4.5	14.6 / 15.2	11.8	20.9
	<b>con correzione per strati sottili</b>		<b>2.7</b>	<b>11.5</b>	<b>1.3</b>	<b>7.1 / 7.7</b>	<b>4.5</b>	<b>13.8</b>
CPT3	senza correzione per strati sottili	15.00	3.2	7.9	1.6	6.0 / 7.3	3.9	8.7
	<b>con correzione per strati sottili</b>		<b>0.9</b>	<b>4.8</b>	<b>0.2</b>	<b>2.1 / 3.3</b>	<b>1.3</b>	<b>5.4</b>

Tabella 7-8 – valori di  $IP_L$  stimati per un  $T_r$  di 475 anni

## 8 PORTANZA PER FONDAZIONI SUPERFICIALI

In Tabella 8-1 sono riportati i dati dimensionali delle fondazioni superficiali delle cabine in progetto per le quali viene effettuata una stima della capacità portante; le fondazioni saranno fondazioni superficiali a platea. L'ubicazione delle cabine e delle indagini geognostiche effettuate è riportata in Figura 8-1.

Edificio / struttura fondazione	Larghezza B (m)	Lunghezza L (m)	Profondità piano di posa (m)
Cabina MT/BT 1A	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 1B	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 2A	3,2	9,7	0,6
Cabina MT/BT 2B	3,2	7,5	0,6
Cabina MT/BT 2C	3,2	7,5	0,6
Cabina MT utente 1	2,5	6,5	0,6
Cabina MT utente 2	2,5	6,5	0,6
1 Cabina di consegna	3,0	8,97	1,0

Tabella 8-1 - Dimensioni in pianta delle platee di fondazione



Figura 8-1 - Ubicazione delle cabine e delle indagini geognostiche eseguite

Per il calcolo in condizioni statiche della resistenza del terreno interagente con la fondazione per collasso determinato dal raggiungimento del carico limite (capacità portante) è stata utilizzata l'espressione di Hansen (1970) tratta da Bowles (1991):

$$q_{ult} = CN_c s_c d_c i_c g_c b_c + \gamma_1 DN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5 \gamma_2 BN_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma r_\gamma \quad (7.1)$$

dove:

$N_c, N_q, N_\gamma$  = fattori di portata;

$s_c, s_q, s_\gamma$  = fattori di forma;

$d_c, d_q, d_\gamma$  = fattori di profondità;

$i_c, i_q, i_\gamma$  = fattori di inclinazione del carico;

$g_c, g_q, g_\gamma$  = fattori di inclinazione del terreno;  
 $b_c, b_q, b_\gamma$  = fattori di inclinazione del piano di posa di fondazione;  
 $C$  = coesione;  
 $\gamma_1$  = peso per unità di volume del terreno sopra il piano posa delle fondazioni;  
 $\gamma_2$  = peso per unità di volume del terreno sotto il piano posa delle fondazioni;  
 $D$  = profondità delle fondazioni;  
 $B$  = dimensione delle fondazioni;  
 $r_\gamma$  = fattore correttivo che dipende dalle dimensioni delle fondazioni.

La resistenza di progetto  $R_d$  in condizioni statiche si ottiene moltiplicando la  $q_{ult}$  per la superficie efficace  $A'$  della fondazione. Considerate le dimensioni e la profondità di posa delle platee, risulta che i terreni interessati dal cuneo di rottura sono quelli di natura prevalentemente coesiva appartenenti all'unità litotecnica I (Caratterizzata dagli stessi valori caratteristici dei parametri geotecnici per entrambi i modelli geotecnici individuati).

Il calcolo viene effettuato adottando l'approccio 2 (A1-M1-R3) nel quale i coefficienti parziali dei parametri geotecnici sono uguali a 1. Come valori caratteristici dei parametri geotecnici nel caso in esame è stato considerato:

$$c_{ud} \equiv c_{uk} = 0,3 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ in riferimento all'unità litotecnica 2}$$

Seguendo le premesse su esposte in Tabella 8-2 sono riportati i risultati delle verifiche in termini di resistenza dei terreni di fondazione per raggiungimento del carico limite ( $R_d$ ) in condizioni statiche per le cabine previste. Dato che per il calcolo è stato adottato l'approccio 2, il coefficiente parziale  $\gamma_R$  utilizzato è pari a 2,3.

Edificio / struttura fondazione	Larghezza B (m)	Lunghezza L (m)	Profondità piano di posa (m)	Rdstatico (kN)
Cabina MT/BT 1A	3,2	9,7	0,6	2.300
Cabina MT/BT 1B	3,2	9,7	0,6	2.300
Cabina MT/BT 2A	3,2	9,7	0,6	2.300
Cabina MT/BT 2B	3,2	7,5	0,6	1.800
Cabina MT/BT 2C	3,2	7,5	0,6	1.800
Cabina MT utente 1	2,5	6,5	0,6	1.230
Cabina MT utente 2	2,5	6,5	0,6	1.230
1 Cabina di consegna	3,0	8,97	1,0	2.070

Tabella 8-2 - Resistenza di progetto

## 9 CEDIMENTI PER FONDAZIONI SUPERFICIALI

Per la stima dei cedimenti del terreno di fondazione è stata utilizzata la teoria della consolidazione utilizzando l'equazione seguente:

$$\Delta H = m_v \cdot \Delta q \cdot H \quad (9.1)$$

nella quale:

$\Delta H$  = cedimento;

$\Delta q$  = variazione media della pressione nello strato con la profondità;

$H$  = spessore dello strato.

$m_v = 1/E$  modulo di compressibilità volumetrica. Si ottiene dalla  $q_c$  mediante la relazione:

$$m_v = 1/(\alpha q_c) \quad (9.2)$$

dove:

$\alpha$  = coefficiente che dipende dalla natura litologica dei terreni esaminati.

$q_c$  = resistenza alla punta.

Il valore caratteristico del modulo di compressibilità volumetrico è stato calcolato utilizzando tutte le letture di resistenza alla punta delle prove poste in prossimità della futura ubicazione delle opere, ovvero considerando un  $\Delta H$  pari a 2 cm. I valori caratteristici corrispondono a quelli di progetto in quanto il coefficiente parziale  $\gamma_M$  da utilizzare è pari a 1. Come pressione trasmessa ai terreni di fondazione è stato considerato un valore ipotetico pari a 0,1 e 0,5 Kg/cm<sup>2</sup>.

I cedimenti sono stati valutati in corrispondenza del centro ( $S_c$ ) di ogni cabina, i valori ottenuti sono riportati in Tabella 9-1.

Fondazione	Cedimenti (cm)		Indagine di riferimento
	Pressione trasmessa ai terreni		
	0,1 kg/cm <sup>2</sup>	0,5 kg/cm <sup>2</sup>	
Cabina MT/BT 1A	0,6	3,2	CPTU-3
Cabina MT/BT 1B	0,6	3,2	CPTU-3
Cabina MT/BT 2A	0,6	3,2	CPTU-3
Cabina MT/BT 2B	0,6	2,8	CPTU-2
Cabina MT/BT 2C	0,6	2,8	CPTU-2
Cabina MT utente 1	0,5	2,4	CPTU-3
Cabina MT utente 2	0,5	2,4	CPTU-3
1 Cabina di consegna	0,5	2,6	CPTU-3

Tabella 9-1 - Cedimenti fondazioni in condizioni statiche

## 10 CONSIDERAZIONI DI SINTESI

Lo studio svolto è stato finalizzato al riconoscimento delle principali caratteristiche geologiche dei terreni presenti in corrispondenza di un'area di circa 11,3 ha, interessata dal progetto di un impianto fotovoltaico ubicato nel comune di Forlì, in provincia di Forlì-Cesena.

Le coordinate geografiche riferite al datum WGS84 del baricentro dell'area di realizzazione del campo fotovoltaico sono: Lat. 44,225414°, Long. 12,109182°. L'area è compresa nelle sezioni 240143 e 240144 della Carta Tecnica Regionale.

All'interno dell'impianto verranno realizzate alcune strutture di servizio per le quali è previsto il ricorso a fondazioni di tipo superficiale a platea. Si tratta di 5 cabine MT/BT, 2 cabine MT Utente, e 1 cabina di consegna. Per la caratterizzazione geologica e geotecnica di dettaglio in corrispondenza dell'area di realizzazione dell'impianto fotovoltaico sono state effettuate 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTU), un'indagine sismica attiva (MASW) e un'indagine sismica passiva (HVSR).

Di seguito sono sintetizzati gli aspetti principali delle analisi svolte.

L'area di intervento confina a Sud con la via Rossellino in prossimità della area produttiva La Selva sviluppata a est della città di Forlì verso Forlimpopoli; risulta pianeggiante con quote comprese tra circa 20 e 21,5 m slm. I terreni presenti negli strati più superficiali sono il frutto di eventi geologico-deposizionali di tipo alluvionale, succedutisi in epoche recenti. La distribuzione tessiturale di questi sedimenti risulta quindi in stretta connessione con la dinamica tipica degli ambienti sedimentari fluviali di pianura alluvionale.

Le strutture riconosciute cartograficamente nell'intorno dell'area di intervento sono rappresentate da tracce di alvei abbandonati e orli di terrazzo in prossimità dell'alveo del fiume Ronco. In prossimità dell'area di intervento però non sono presenti elementi geomorfologici.

Il fenomeno della subsidenza, che rappresenta un elemento caratterizzante l'attuale assetto geomorfologico della pianura, indica che le velocità di abbassamento del suolo sono comprese tra 2,5 e 5 mm/anno.

La natura deposizionale tipicamente alluvionale dei sedimenti presenti nell'area di intervento determina la presenza nel sottosuolo prevalentemente fine, costituito da limo argilloso, argilla e argilla limosa, alternata a livelli ove prevale la componente limosa. Sono presenti rari livelli lentiformi di sabbia limosa e limo sabbioso, con ridotta continuità laterale.

La rete idrografica in prossimità dell'area di intervento vede come elemento principale il Fiume Ronco, che scorre ad ovest a circa 1,0 km.

In riferimento alla *mappa di pericolosità delle aree potenzialmente interessate da alluvioni* del Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) il sito non rientra in aree a pericolosità per quanto riguarda il reticolo idrografico principale, mentre per quanto concerne il reticolo secondario l'intervento ricade in uno scenario di pericolosità P2 – alluvioni poco frequenti.

Il progetto per quanto riguarda il rischio da alluvioni in riferimento al reticolo principale non rientra in aree di rischio mentre rientra in aree a rischio moderato (R1) in riferimento al reticolo secondario.

L'edificio sedimentario alluvionale ospita un sistema acquifero sotterraneo, le cui caratteristiche idrogeologiche sono in stretta relazione con le caratteristiche granulometriche dei depositi: ai depositi argilloso-limosi può essere attribuita una permeabilità bassa, mentre i depositi ghiaiosi presentano una permeabilità elevata, localmente ridotta dalla presenza di significative percentuali di matrice fine.

Durante l'esecuzione delle indagini geognostiche per la definizione dei terreni il livello della falda è risultato tra 1,0÷1,3 m da p.c.

La successione litostratigrafica ricostruita per l'area di progetto, al di sotto di uno strato di copertura di terreno argilloso limoso di circa 0,5÷0,6 m, è caratterizzata dalla presenza di un banco di limo argilloso e argilla limosa presente a sino a profondità tra 7 e 10,5 m, al di sotto dei quali si riconosce uno strato lentiforme limoso sabbioso a cui segue un banco di limo argilloso e argilla limosa.

I terreni sono caratterizzati da un valore di peso per unità di volume  $\gamma$  variabile da 1,5 e 1,8 t/m<sup>3</sup> e da una coesione  $c_u$  di circa 0,3÷0,5 kg/cm<sup>2</sup>. I livelli di limo sabbioso e sabbia limosa presentano angoli di attrito interno  $\varphi$  di circa 28°÷30°.

In riferimento alla pericolosità sismica il comune di Forlì risulta classificato "zona 2".

La valutazione della  $V_{s,30}$  e dell'amplificazione sismica di risonanza del substrato di interesse è stata effettuata utilizzando i risultati di un'indagine MASW eseguita in accoppiamento con un'indagine sismica passiva HVSR

(TROMINO). In base ai valori di  $V_{s,30}$  stimati i terreni investigati risultano caratterizzabili all'interno della categoria di sottosuolo C, rispetto le condizioni topografiche il sito è classificabile all'interno della categoria T1. Sulla base del valore dell'indice  $IP_L$  è possibile indicare che per i terreni investigati il rischio di liquefazione risulta "basso". Seguendo il metodo Boulanger&Idriss 2014 si segnala in corrispondenza della CPTU1 rischio 'alto' di liquefazione.

Per le cabine in progetto all'interno del campo fotovoltaico è stata effettuata una stima della capacità portante e dei cedimenti dei terreni di fondazione in condizioni statiche, considerando il ricorso a platee di fondazione. Per le cabine MT utente è stata stimata una resistenza di progetto di circa 1.230 kN, mentre per la cabina di consegna il valore è di 2.070 kN; infine, per le cabine MT/BT in valore della resistenza è compreso tra 1.800 e 2.300 kN in base alle dimensioni della fondazione.

Per la stima dei cedimenti attesi sono stati considerati valori ipotetici di pressione trasmessa ai terreni di fondazione pari a 0,1 e 0,5 Kg/cm<sup>2</sup>. Si ritiene che i cedimenti stimati rispetto alla ipotesi assunte siano compatibili con le strutture in progetto.

**ALLEGATO 1:  
GRAFICI PROVE PENETROMETRICHE**

Comune  
Via  
Località  
Committente  
Data

Forlì  
Via Rossellino  
Forniole  
Servin  
07/04/2025

Falda 1.30 m  
Sigla della Punta Tecnopenta 100707  
Azzeramento Inizio prova  
Ultimo taratura guadagno 16-dic-2024  
Ultimo taratura per deriva termica 16-dic-2024



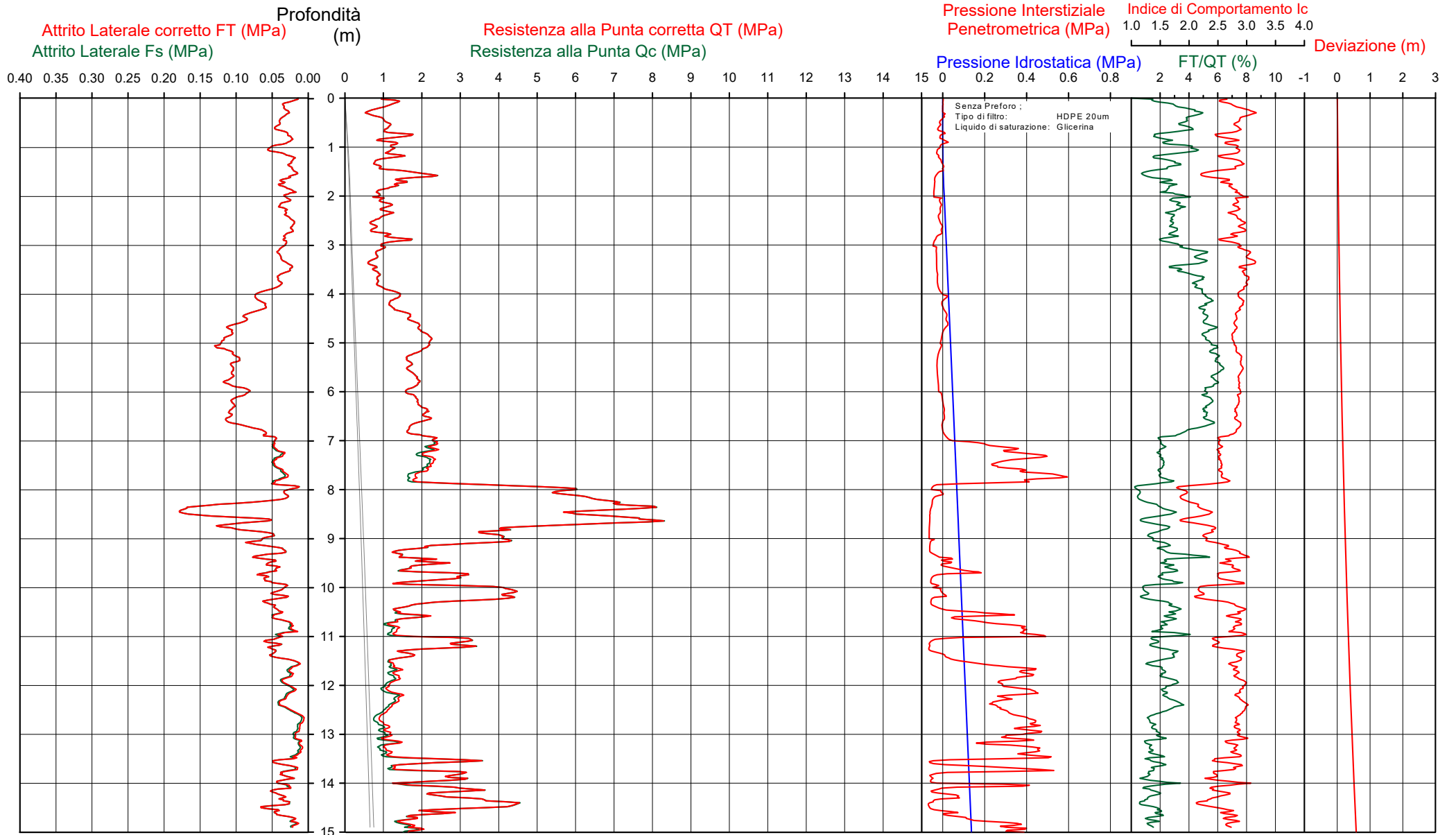
Società di  
Geologia  
Territoriale

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

# CPTU

## 1



CPTU

1

Data  
 Cantiere / Via  
 Località  
 Comune  
 Profondità falda idrica m.

7 aprile 2025  
 Via Rossellino  
 Forniolo  
 Forlì  
 1.30



Società di  
**Geologia**  
**Territoriale**

S.G.T. sas.  
 di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

Vs15
150

qt	Qc1N Idriss & Boulanger 2004	ft	FT/Qnet	lc	Litologia Idriss iterazione basato su Fr vs Qc1N	H	Litologia grafica	Falda idrica	Addensamento (Sabbia)	Densità Relativa Tatsuoka 1990	Angolo Attrito Kulhawy & Mayne 1990	Coesione non drenato Cu Benassi	OCR Marchi / SGT	Modulo Edometrico M Benassi	Velocità Vs Robertson & Cabal 2009
daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	%		Idriss iterazione	m					%	°	daN/cm <sup>2</sup>		daN/cm <sup>2</sup>	m/sec
11.7	20.0	0.29	2.5	2.70	limo argilloso-argilla limosa	0.00	.....		Plastica			0.74	154.58	57.5	131
7.1	12.1	0.31	4.4	3.03	argilla-argilla limosa	0.20	.....		Molle-plastica (Soffice)			0.50	27.72	41.1	125
10.8	18.4	0.40	3.7	2.84	limo argilloso-argilla limosa	0.40	.....		Plastica			0.69	24.51	62.9	137
15.7	26.7	0.27	1.7	2.51	sabbia limosa-limo sabbioso	0.70	.....		Sciolta	23.4	35.6			60.1	134
12.0	20.4	0.37	3.2	2.75	limo argilloso-argilla limosa	0.80	.....		Plastica			0.75	13.36	70.2	136
8.7	14.8	0.23	2.8	2.84	limo argilloso-argilla limosa	1.20	.....								
12.2	20.7	0.21	1.9	2.62	limo argilloso-argilla limosa	1.40	.....	H2O	Molle-plastica (Soffice)			0.58	9.15	47.7	122
16.9	28.7	0.30	2.0	2.50	sabbia limosa-limo sabbioso	1.50	.....		Plastica			0.76	11.60	49.3	126
9.8	16.7	0.30	3.1	2.83	limo argilloso-argilla limosa	1.80	.....		Sciolta	25.8	34.4			69.8	136
8.1	13.8	0.23	3.1	2.90	limo argilloso-argilla limosa	2.50	.....		Molle-plastica (Soffice)			0.64	7.40	57.4	127
11.5	19.6	0.34	3.2	2.78	limo argilloso-argilla limosa	2.80	.....		Molle-plastica (Soffice)			0.55	4.55	49.0	119
8.1	13.8	0.36	4.8	3.01	argilla-argilla limosa	3.10	.....		Plastica			0.73	8.38	67.4	133
12.7	21.7	0.65	5.4	2.90	limo argilloso-argilla limosa	3.90	.....		Molle-plastica (Soffice)			0.55	4.25	46.5	127
17.7	28.4	0.93	5.5	2.81	limo argilloso-argilla limosa	4.30	.....		Plastica			0.78	6.04	72.3	150
21.9	33.0	1.19	5.6	2.77	limo argilloso-argilla limosa	4.80	.....		Plastica			0.99	6.21	100.6	168
17.8	25.6	1.02	6.1	2.88	limo argilloso-argilla limosa	5.10	.....		Solido-plastica (Duro)			1.14	8.51	124.0	184
21.1	28.0	1.09	5.5	2.82	limo argilloso-argilla limosa	6.30	.....		Plastica			0.99	6.67	100.2	175
17.5	22.9	0.76	4.7	2.83	limo argilloso-argilla limosa	6.60	.....		Plastica			0.98	5.16	100.1	167
22.1	27.5	0.42	2.0	2.54	sabbia limosa-limo sabbioso	6.90	.....		Solido-plastica (Duro)			1.11	6.38	119.9	184
18.2	22.2	0.33	2.0	2.60	limo argilloso-argilla limosa	7.70	.....		Plastica			0.98	5.16	100.1	167
53.7	60.5	0.43	1.0	2.04	sabbia-sabbia limosa	7.80	.....		Sciolta	24.4	33.2			91.9	157
56.2	61.4	1.04	1.9	2.26	sabbia limosa-limo sabbioso	8.30	.....		Plastica			1.01	4.67	74.8	148
18.6	20.1	0.51	3.1	2.76	limo argilloso-argilla limosa	9.10	.....		Mediamente Addensata	50.4	37.3			173.3	177
30.7	32.3	0.63	2.2	2.50	sabbia limosa-limo sabbioso	9.80	.....		Mediamente Addensata	50.9	37.3			229.7	208
21.0	22.1	0.57	3.1	2.74	limo argilloso-argilla limosa	9.90	.....		Plastica			1.02	4.75	108.5	162
36.8	38.0	0.41	1.4	2.31	sabbia limosa-limo sabbioso	9.70	.....		Sciolta	29.7	34.2			134.0	181
							.....		Solido-plastica (Duro)			1.10	4.28	122.6	171
							.....		Mediamente Addensata	35.0	35.0			128.7	176

CPTU

1

Data  
 Cantiere / Via  
 Località  
 Comune  
 Profondità falda idrica m.

7 aprile 2025  
 Via Rossellino  
 Forniolo  
 Forlì  
 1.30



Società di  
**Geologia**  
**Territoriale**

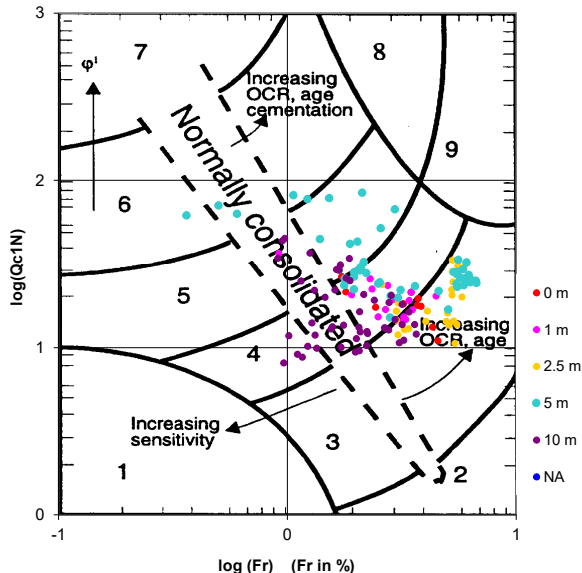
S.G.T. sas.  
 di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

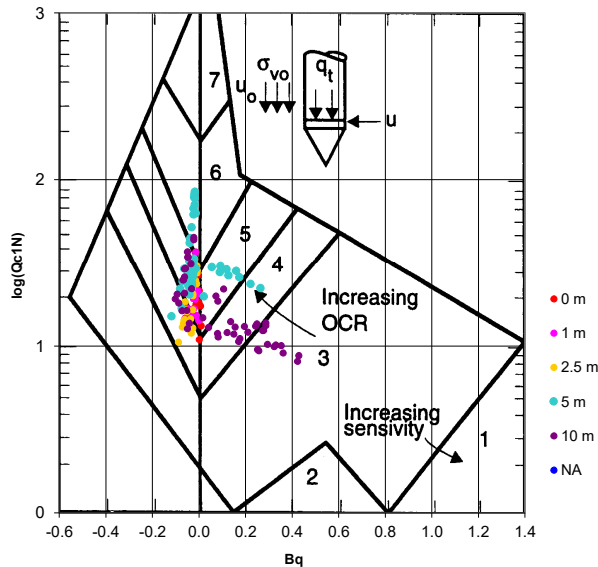
Vs15
150

qt	Qc1N Idriss & Boulanger 2004	ft	FT/Qnet	lc	Litologia Idriss iterazione basato su Fr vs Qc1N	H	Litologia grafica	Falda idrica	Addensamento (Sabbia)	Densità Relativa Tatsuoka 1990	Angolo Attrito Kulhawy & Mayne 1990	Coesione non drenato Cu Benassi	OCR Marchi / SGT	Modulo Edometrico M Benassi	Velocità Vs Robertson & Cabal 2009
daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	%		Idriss iterazione	m				Consistenza (Argilla)	%		daN/cm <sup>2</sup>		daN/cm <sup>2</sup>	m/sec
						10.30									
14.8	15.0	0.36	2.8	2.84	limo argilloso-argilla limosa	11.00			Plastica			0.88	3.37	80.9	148
30.7	30.3	0.48	1.7	2.46	sabbia limosa-limo sabbioso	11.20			Sciolta	27.6	33.9			116.1	176
14.1	13.4	0.30	2.5	2.85	limo argilloso-argilla limosa	12.30			Plastica			0.84	3.67	68.8	143
12.4	11.4	0.35	3.4	2.98	argilla-argilla limosa	12.50			Plastica			0.77	2.19	72.4	145
9.7	8.8	0.11	1.4	2.86	limo argilloso-argilla limosa	12.80			Molle-plastica (Soffice)			0.64	1.70	34.0	115
11.9	10.6	0.13	1.4	2.81	limo argilloso-argilla limosa	13.50			Plastica			0.75	1.77	42.4	126
28.1	25.1	0.46	1.9	2.56	sabbia limosa-limo sabbioso	13.60			Sciolta	21.4	33.1			112.6	177
13.1	11.3	0.22	2.0	2.85	limo argilloso-argilla limosa	13.70			Plastica			0.80	2.02	54.4	137
26.7	23.5	0.29	1.2	2.48	sabbia limosa-limo sabbioso	13.90			Sciolta	19.3	32.8			90.6	164
22.0	19.2	0.39	2.4	2.70	limo argilloso-argilla limosa	14.00			Solido-plastica (Duro)			1.14	3.33	104.2	169
32.0	27.9	0.38	1.4	2.44	sabbia limosa-limo sabbioso	14.50			Sciolta	24.8	33.6			112.9	173
19.2	16.1	0.30	1.8	2.70	limo argilloso-argilla limosa				Plastica			1.04	3.53	74.4	154

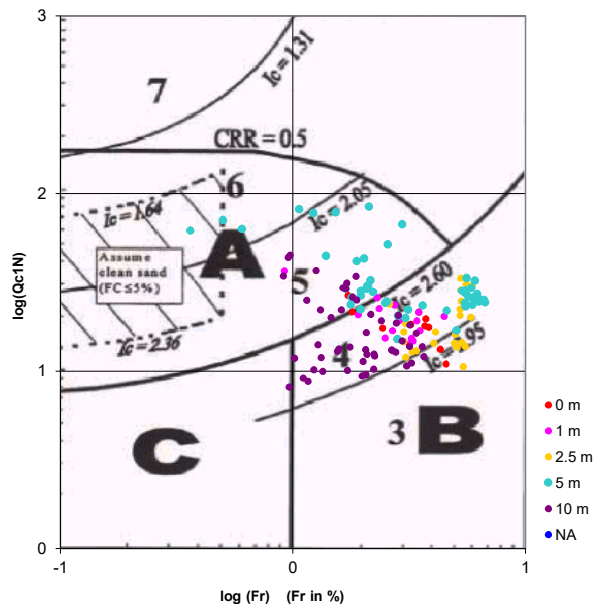
Cross-plot Qc1N verso Fr  
 (Robertson 1990)



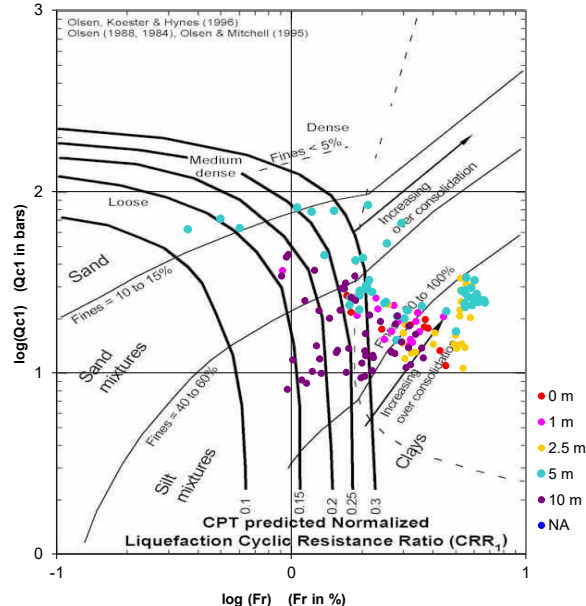
Cross-plot Qc1N verso Bq  
 (Robertson 1990)



Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Robertson 1996



Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Olsen 1996



Litotipo secondo Robertson 1990

Zone	Tipo di comportamento
9	Terreni molto duri a grana fine
8	Sabbia molto densa e sabbia argillosa
7	Sabbia ghiaiosa – sabbia densa
6	Sabbia – sabbia limosa
5	Sabbia limosa – limo sabbioso
4	Limo argilloso – argilla limosa
3	Argilla limoso – argilla
2	Torba
1	Terreni fini sensibili

Potenziale di liquefacibilita

Zone A	Liquefazione ciclica possibile - dipendente da ampiezza e tempo del carico ciclico.
Zone B	Liquefazione improbabile.
Zone C	Liquefazione fluida e liquefazione ciclica possibile - dipendente da plasticità e sensibilità, da ampiezza e tempo del carico ciclico.

Comune  
Via  
Località  
Committente  
Data

Forlì  
Via Rossellino  
Forniole  
Servin  
07/04/2025

Falda 1.10 m  
Sigla della Punta Tecnopenta 100707  
Azzeramento Inizio prova  
Ultimo taratura guadagno 16-dic-2024  
Ultimo taratura per deriva termica 16-dic-2024



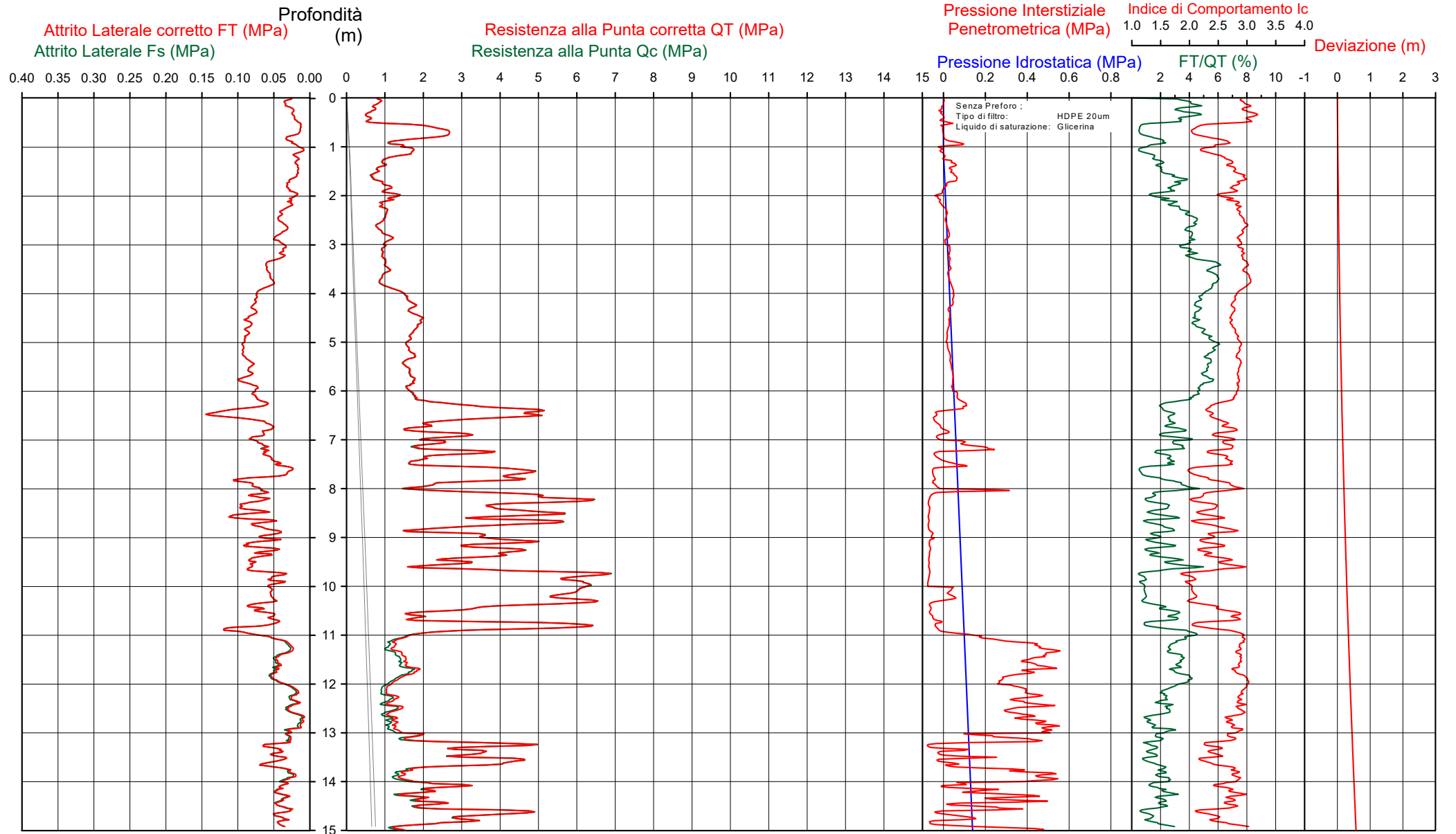
Società di  
Geologia  
Territoriale

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

# CPTU

## 2



CPTU

2

Data  
 Cantiere / Via  
 Località  
 Comune  
 Profondità falda idrica m.

7 aprile 2025  
 Via Rossellino  
 Forniolo  
 Forlì  
 1.10



Società di  
 Geologia  
 Territoriale

S.G.T. sas.  
 di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

Vs15  
 155

qt	Qc1N Idriss & Boulanger 2004	ft	FT/Qnet	lc	Litologia Idriss iterazione basato su Fr vs Qc1N	H	Litologia grafica	Falda idrica	Addensamento (Sabbia) Consistenza (Argilla)	Densità Relativa Tatsuoka 1990	Angolo Attrito Kulhawy & Mayne 1990	Coesione non drenato Cu Benassi	OCR Marchi / SGT	Modulo Edometrico M Benassi	Velocità Vs Robertson & Cabal 2009
daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	%		Idriss iterazione	m				%			daN/cm <sup>2</sup>		daN/cm <sup>2</sup>	m/sec
8.7	14.7	0.32	3.7	2.92	limo argilloso-argilla limosa	0.10			Molle-plastica (Soffice)			0.58	191.66	50.3	129
6.3	10.8	0.24	3.8	3.03	argilla-argilla limosa	0.10			Molle-plastica (Soffice)			0.45	31.71	39.5	118
						0.50									
23.2	39.5	0.16	0.7	2.16	sabbia limosa-limo sabbioso	0.80			Mediamente Addensata	36.3	37.9			72.6	130
15.2	25.9	0.20	1.4	2.45	sabbia limosa-limo sabbioso	1.20		H2O	Sciolta	22.4	34.9			53.3	126
8.7	14.9	0.21	2.5	2.81	limo argilloso-argilla limosa	1.80			Molle-plastica (Soffice)			0.59	10.24	42.6	118
11.5	19.5	0.25	2.3	2.68	limo argilloso-argilla limosa	2.10			Plastica			0.73	9.42	52.0	126
9.9	16.8	0.36	3.8	2.87	limo argilloso-argilla limosa	2.50			Molle-plastica (Soffice)			0.64	7.11	57.2	131
8.4	14.3	0.35	4.3	2.97	argilla-argilla limosa	2.70			Molle-plastica (Soffice)			0.57	6.03	48.3	128
10.0	17.0	0.48	5.1	2.95	argilla-argilla limosa	3.90			Plastica			0.65	5.54	57.2	138
16.1	27.3	0.75	4.9	2.79	limo argilloso-argilla limosa	4.40			Plastica			0.93	6.63	92.0	158
19.2	31.5	0.84	4.6	2.72	limo argilloso-argilla limosa	4.60			Plastica			1.04	8.29	110.3	167
16.9	25.7	0.85	5.4	2.83	limo argilloso-argilla limosa	6.20			Plastica			0.96	6.88	96.0	166
39.2	50.4	0.96	2.5	2.41	sabbia limosa-limo sabbioso	6.60			Mediamente Addensata	44.4	36.3			193.3	193
19.4	26.0	0.56	3.1	2.68	limo argilloso-argilla limosa	6.80			Plastica			1.05	6.42	113.6	160
26.6	34.3	0.64	2.7	2.54	sabbia limosa-limo sabbioso	6.90			Sciolta	31.7	34.3			140.2	174
22.5	29.0	0.70	3.4	2.66	limo argilloso-argilla limosa	7.20			Solido-plastica (Duro)			1.16	6.84	131.4	172
34.1	42.1	0.62	1.9	2.38	sabbia limosa-limo sabbioso	7.30			Mediamente Addensata	38.4	35.4			139.0	179
18.9	24.0	0.51	2.9	2.68	limo argilloso-argilla limosa	7.50			Plastica			1.03	5.66	106.1	158
38.8	46.1	0.54	1.6	2.26	sabbia limosa-limo sabbioso	7.90			Mediamente Addensata	41.5	35.9			145.3	176
18.9	23.1	0.75	4.4	2.81	limo argilloso-argilla limosa	8.00			Plastica			1.03	4.83	109.1	172
44.4	50.3	0.78	2.0	2.32	sabbia limosa-limo sabbioso	8.80			Mediamente Addensata	44.3	36.3			183.0	195
19.1	21.8	0.48	2.9	2.71	limo argilloso-argilla limosa	8.90			Plastica			1.04	4.37	106.2	161
39.2	43.0	0.65	1.8	2.34	sabbia limosa-limo sabbioso	9.40			Mediamente Addensata	39.1	35.5			153.2	186
25.8	28.1	0.81	3.6	2.69	limo argilloso-argilla limosa	9.60			Solido-plastica (Duro)			1.25	5.94	150.3	186
53.8	55.9	0.59	1.3	2.16	sabbia limosa-limo sabbioso				Mediamente Addensata	47.8	36.8			186.5	193

CPTU

2

Data  
 Cantiere / Via  
 Località  
 Comune  
 Profondità falda idrica m.

7 aprile 2025  
 Via Rossellino  
 Forniolo  
 Forlì  
 1.10



Società di  
 Geologia  
 Territoriale

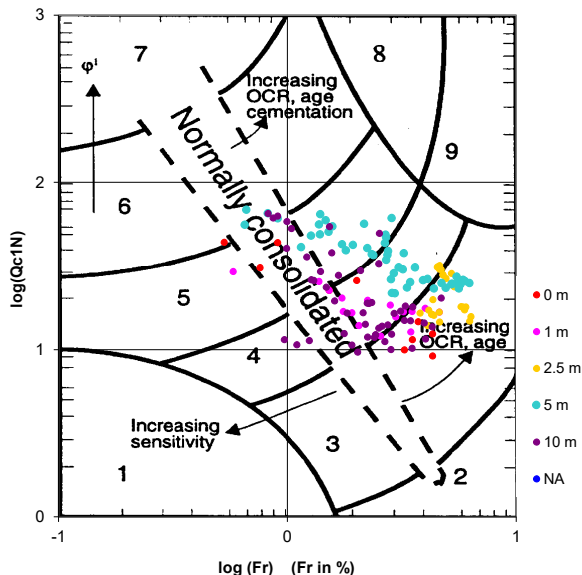
S.G.T. sas.  
 di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

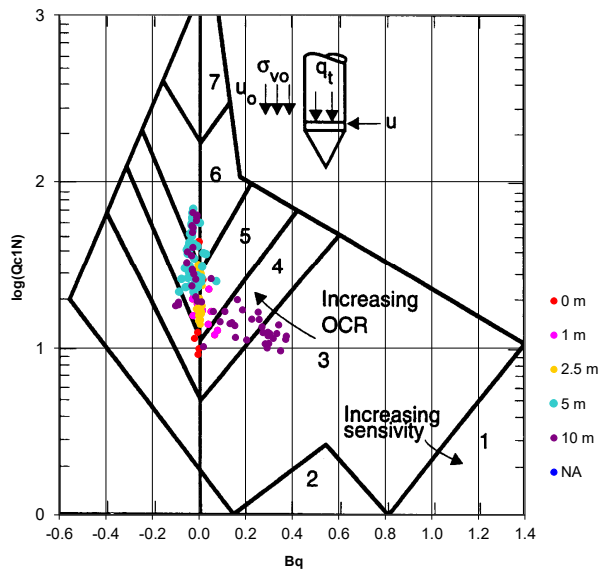
Vs15  
 155

qt	Qc1N Idriss & Boulanger 2004	ft	FT/Qnet	lc	Litologia Idriss iterazione basato su Fr vs Qc1N	H	Litologia grafica	Falda idrica	Addensamento (Sabbia)	Densità Relativa Tatsuoka 1990	Angolo Attrito Kulhavy & Mayne 1990	Coesione non drenato Cu Benassi	OCR Marchi / SGT	Modulo Edometrico M Benassi	Velocità Vs Robertson & Cabal 2009
daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	%		Idriss iterazione	m				Consistenza (Argilla)	%	°	daN/cm <sup>2</sup>		daN/cm <sup>2</sup>	m/sec
						10.50									
17.7	18.1	0.53	3.4	2.82	limo argilloso-argilla limosa	10.70		Plastica				0.99	3.38	103.3	164
51.0	51.3	0.79	1.8	2.27	sabbia limosa-limo sabbioso	10.90		Mediamente Addensata	45.0	36.4				198.4	203
14.9	14.7	0.44	3.3	2.89	limo argilloso-argilla limosa	11.60		Plastica				0.88	3.70	87.0	153
17.4	16.7	0.46	3.0	2.82	limo argilloso-argilla limosa	11.80		Plastica				0.98	3.01	102.5	161
12.3	11.4	0.24	2.3	2.87	limo argilloso-argilla limosa	13.00		Plastica				0.77	2.41	57.3	135
20.0	18.1	0.28	1.7	2.65	limo argilloso-argilla limosa	13.20		Solido-plastica (Duro)				1.07	2.93	76.5	156
36.5	33.0	0.50	1.5	2.40	sabbia limosa-limo sabbioso	13.70		Sciolta	30.4	34.4				133.2	184
15.5	13.4	0.28	2.2	2.81	limo argilloso-argilla limosa	14.00		Plastica				0.90	2.48	67.8	148
27.1	23.7	0.36	1.5	2.52	sabbia limosa-limo sabbioso	14.10		Sciolta	19.4	32.9				97.5	169
20.2	17.2	0.41	2.4	2.75	limo argilloso-argilla limosa	14.50		Solido-plastica (Duro)				1.08	3.25	94.3	164
31.2	26.7	0.38	1.5	2.48	sabbia limosa-limo sabbioso	14.90		Sciolta	23.5	33.4				113.2	175
13.5	10.2	0.35	3.5	3.03	argilla-argilla limosa			Plastica				0.82	1.91	78.7	155

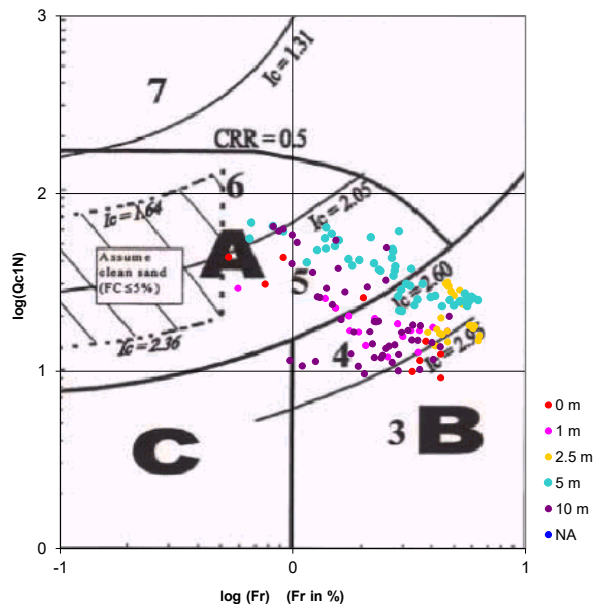
**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 (Robertson 1990)**



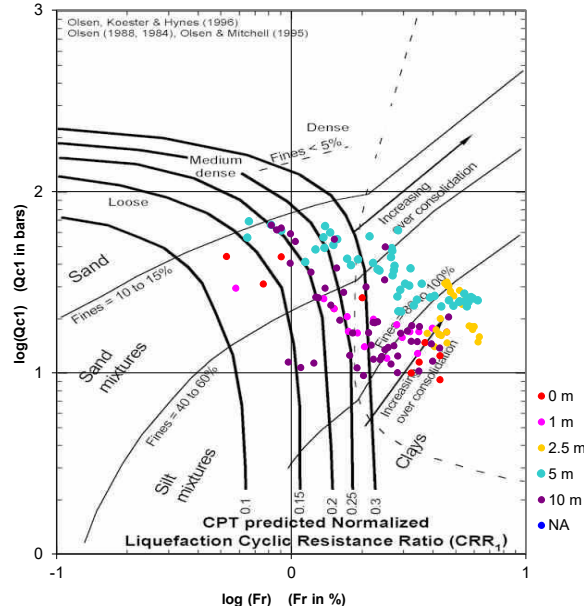
**Cross-plot Qc1N verso Bq  
 (Robertson 1990)**



**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Robertson 1996**



**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Olsen 1996**



Litotipo secondo Robertson 1990

Zone	Tipo di comportamento
9	Terreni molto duri a grana fine
8	Sabbia molto densa e sabbia argillosa
7	Sabbia ghiaiosa – sabbia densa
6	Sabbia – sabbia limosa
5	Sabbia limosa – limo sabbioso
4	Limo argilloso – argilla limosa
3	Argilla limoso – argilla
2	Torba
1	Terreni fini sensitivi

Potenziale di liquefacibilita

Zone A	Liquefazione ciclica possibile - dipendente da ampiezza e tempo del carico ciclico.
Zone B	Liquefazione improbabile.
Zone C	Liquefazione fluida e liquefazione ciclica possibile - dipendente da plasticità e sensitività, da ampiezza e tempo del carico ciclico.

Comune  
Via  
Località  
Committente  
Data

Forlì  
Via Rossellino  
Forniole  
Servin  
07/04/2025

Falda 1.10 m  
Sigla della Punta Tecnopenta 100707  
Azzeramento Inizio prova  
Ultimo taratura guadagno 16-dic-2024  
Ultimo taratura per deriva termica 16-dic-2024



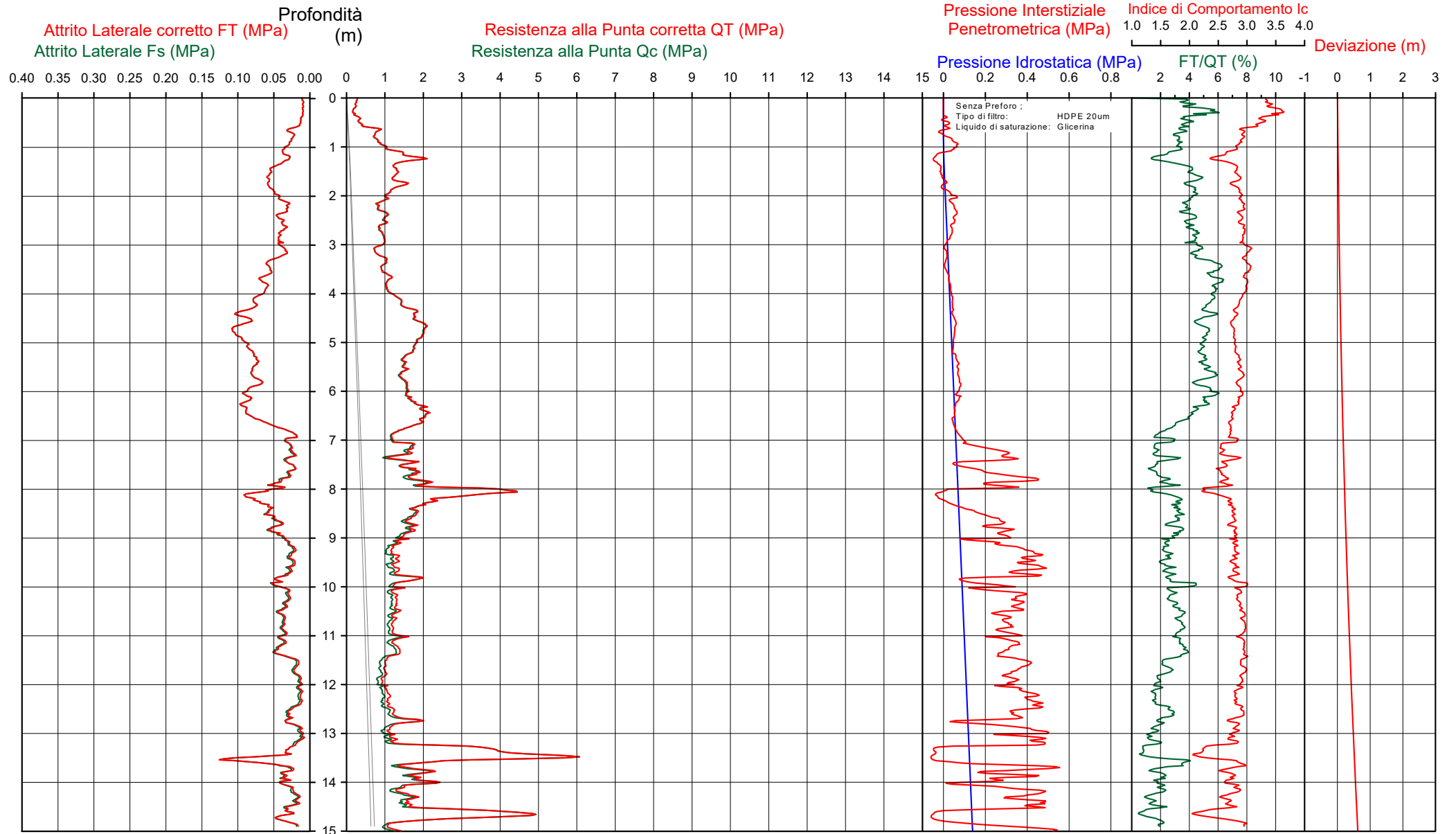
Società di  
Geologia  
Territoriale

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.

www.geo55.com

# CPTU

## 3



CPTU

3

Data  
Cantiere / Via  
Località  
Comune  
Profondità falda idrica m.

7 aprile 2025  
Via Rossellino  
Forniole  
Forlì  
1.10



Società di  
Geologia  
Territoriale

S.G.T. sas.  
di Van Zutphen Albert & C.

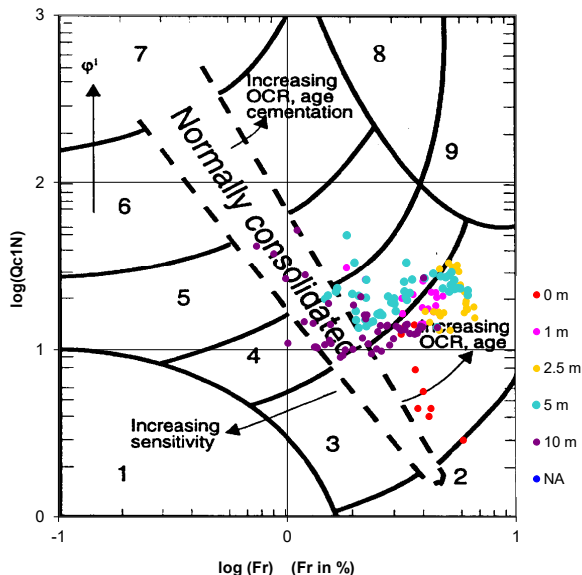
www.geo55.com

Vs15
142

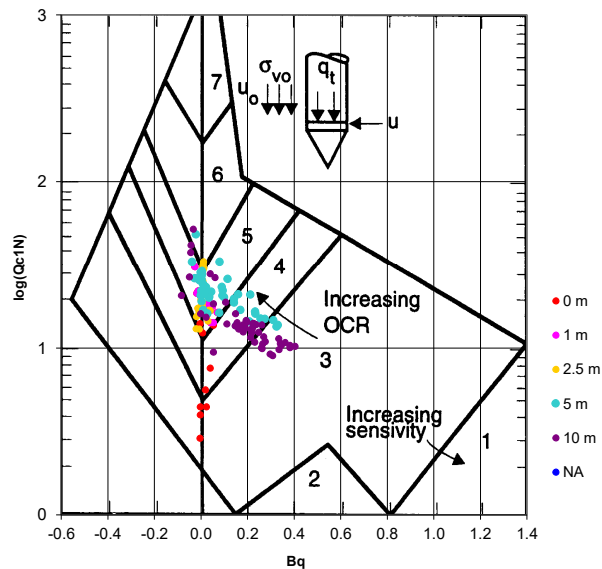
qt	Qc1N Idriss & Boulanger 2004	ft	FT/Qnet	lc	Litologia Idriss iterazione basato su Fr vs Qc1N	H	Litologia grafica	Falda idrica	Addensamento (Sabbia) Consistenza (Argilla)	Densità Relativa Tatsuoka 1990	Angolo Attrito Kulhawy & Mayne 1990	Coesione non drenato Cu Benassi	OCR Marchi / SGT	Modulo Edometrico M Benassi	Velocità Vs Robertson & Cabal 2009
daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	%	Idriss iterazione		m			%		daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	daN/cm <sup>2</sup>	m/sec
2.5	4.2	0.10	3.9	3.37	argilla-argilla limosa	0.00	=====		Fluida-plastica (Molto Soffice)	.	.	0.19	35.31	15.5	92
1.7	2.9	0.10	5.9	3.61	terreni organici-torbe	0.20	-----		Fluida	.	.	0.13	9.71	11.6	87
3.5	5.9	0.13	3.9	3.26	argilla-argilla limosa	0.30	=====		Fluida-plastica (Molto Soffice)	.	.	0.26	8.43	21.7	99
9.0	15.4	0.29	3.3	2.87	limo argilloso-argilla limosa	0.60	=====		Molle-plastica (Soffice)	.	.	0.60	13.71	52.8	126
16.8	28.6	0.32	2.0	2.52	sabbia limosa-limo sabbioso	1.10	=====	H2O	Sciolta	25.7	35.1	.	.	69.9	139
12.4	21.1	0.51	4.2	2.83	limo argilloso-argilla limosa	1.30	=====		Plastica	.	.	0.77	11.94	71.5	144
9.1	15.5	0.37	4.3	2.94	limo argilloso-argilla limosa	2.10	=====		Molle-plastica (Soffice)	.	.	0.60	5.70	52.4	130
10.3	17.5	0.58	6.0	2.99	argilla-argilla limosa	3.20	=====		Plastica	.	.	0.67	5.20	58.1	143
16.1	27.0	0.83	5.4	2.83	limo argilloso-argilla limosa	4.00	=====		Plastica	.	.	0.93	5.92	91.7	162
19.1	29.9	0.94	5.2	2.78	limo argilloso-argilla limosa	4.60	=====		Plastica	.	.	1.04	8.31	108.8	171
15.7	23.2	0.80	5.4	2.87	limo argilloso-argilla limosa	5.20	=====		Plastica	.	.	0.91	5.43	89.2	163
19.0	25.7	0.69	3.8	2.73	limo argilloso-argilla limosa	6.30	=====		Plastica	.	.	1.04	6.09	110.2	164
13.2	17.8	0.26	2.2	2.71	limo argilloso-argilla limosa	6.80	=====		Plastica	.	.	0.81	3.59	59.4	133
16.1	20.7	0.27	1.8	2.61	limo argilloso-argilla limosa	7.10	=====		Plastica	.	.	0.93	4.63	63.8	138
29.8	35.7	0.53	2.0	2.45	sabbia limosa-limo sabbioso	7.80	=====		Sciolta	33.0	34.6	.	.	124.1	170
24.8	29.5	0.79	3.4	2.66	limo argilloso-argilla limosa	8.10	=====		Solido-plastica (Duro)	.	.	1.22	6.91	144.2	179
16.6	19.6	0.47	3.1	2.77	limo argilloso-argilla limosa	8.30	=====		Plastica	.	.	0.95	4.39	99.9	155
12.7	14.4	0.24	2.2	2.79	limo argilloso-argilla limosa	9.10	=====		Plastica	.	.	0.78	2.77	56.0	134
16.2	17.8	0.39	2.7	2.77	limo argilloso-argilla limosa	9.70	=====		Plastica	.	.	0.93	3.20	85.1	152
12.8	13.4	0.36	3.3	2.92	limo argilloso-argilla limosa	9.90	=====		Plastica	.	.	0.78	2.46	74.4	145



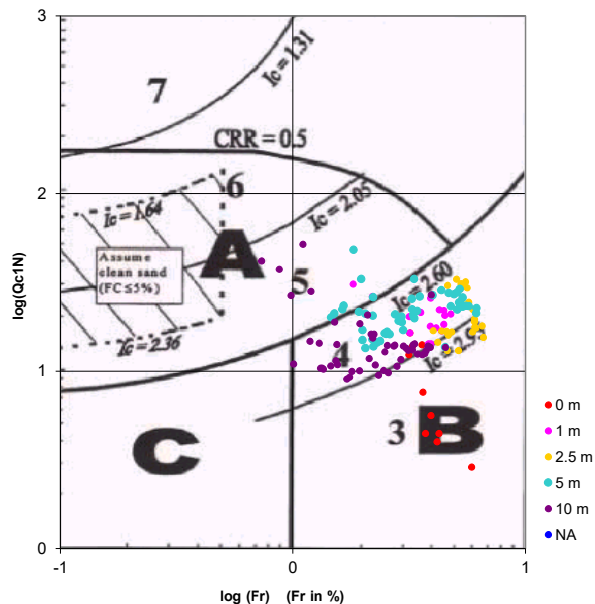
**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 (Robertson 1990)**



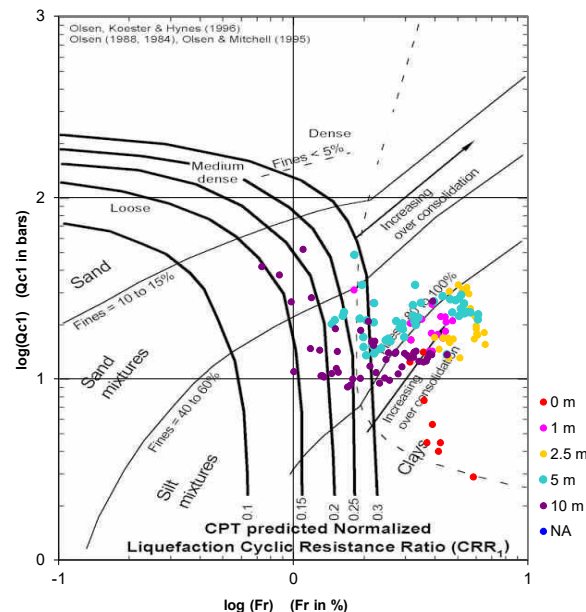
**Cross-plot Qc1N verso Bq  
 (Robertson 1990)**



**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Robertson 1996**



**Cross-plot Qc1N verso Fr  
 per la verifica della liquefazione  
 secondo Olsen 1996**



Litotipo secondo Robertson 1990

Zone	Tipo di comportamento
9	Terreni molto duri a grana fine
8	Sabbia molto densa e sabbia argillosa
7	Sabbia ghiaiosa – sabbia densa
6	Sabbia – sabbia limosa
5	Sabbia limosa – limo sabbioso
4	Limo argilloso – argilla limosa
3	Argilla limoso – argilla
2	Torba
1	Terreni fini sensitivi

Potenziale di liquefacibilita

Zone A	Liquefazione ciclica possibile - dipendente da ampiezza e tempo del carico ciclico.
Zone B	Liquefazione improbabile.
Zone C	Liquefazione fluida e liquefazione ciclica possibile - dipendente da plasticità e sensitività, da ampiezza e tempo del carico ciclico.

**ALLEGATO 2:  
INDAGINE SISMICA**

# COMUNE di FORLÌ

(Provincia di Forlì-Cesena)

## MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) E MISURA DIGITALE DEL RUMORE SISMICO

### Impianto fotovoltaico da realizzare a Forlì in via Rossellino (FC) nell'ambito della procedura di PAS



Committente: SERVIN

Febbraio, 2025



**Società di  
Geologia  
Territoriale**

S.G.T. sas.  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
[www.geo55.com](http://www.geo55.com)

Dott. Geol. Albert Van Zutphen  
Dott. Geol. Oscar Zani  
Dott. Geol. Marco Papa

# 1 Misure MASW attiva e HVSR

Per la valutazione della  $V_{seq}$  e dell'amplificazione sismica di risonanza del substrato di interesse si è provveduto a realizzare uno stendimento SASW-MASW in combinazione con una misura HVSR. Le misure sono state realizzate utilizzando il "Tromino engineering", uno strumento in grado di misurare sia i microtremori sia le onde attivate da una sorgente sismica artificiale.

## 1.1 Metodo dei microtremori HVSR

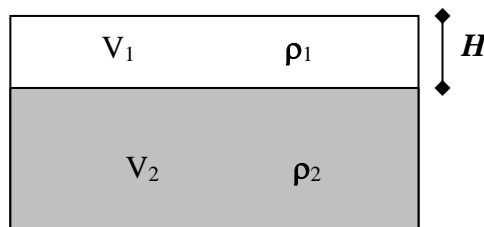
Il tremore sismico, comunemente definito "rumore sismico", esiste ovunque sulla superficie della terra. Esso è principalmente costituito da onde superficiali, ovvero da onde elastiche prodotte dall'interferenza costruttiva di onde P ed S che si propagano negli strati superficiali. Il rumore sismico è prodotto essenzialmente dal vento o dalle onde marine. A questo rumore di fondo, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ecc.) e naturali. I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S. In essi giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S, il che spiega la dipendenza di tutta la formulazione della velocità di queste ultime.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo da rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoschi e Igaraschi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

Le basi teoriche dell'H/V sono relativamente facili da comprendere in un mezzo del tipo strato + bedrock (o strato assimilabile al bedrock) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato. Considerando lo schema della figura sottostante in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizioni di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato. La frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde S è pari a

$$f_r = \frac{V_{s1}}{4 * H}$$

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi dello spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando la sopra riportata equazione.



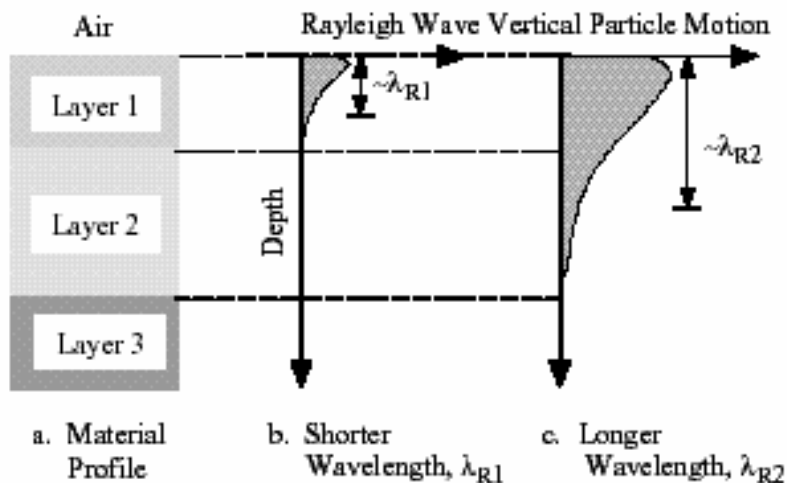
L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) in contenuto di frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

Un aspetto assai importante è che il rumore sismico agisce come sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo e degli edifici più o meno come una luce bianca diffusa illumina gli oggetti eccitando le lunghezze d'onda tipiche di ciascun oggetto e dandogli il suo tipico colore.

Questo risulta molto importante a livello ingegneristico perché, se un edificio ha frequenze proprie di vibrazione uguali a quelle del substrato su cui è fondato, durante un sisma, si assiste al fenomeno dell'accoppiamento delle vibrazioni. Questo effetto di amplificazione sismica produrrà un grande aumento della sollecitazione sugli edifici.

## 1.2 Metodo MASW

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.



Le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo SASW-MASW si mantiene fisso il sensore di misura e si sposta a intervalli regolari il punto di generazione delle onde.

Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente circa 8÷15 m, in funzione della rigidità del suolo.

Il metodo MASW consiste in tre fasi (Roma, 2002): (1) la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, (2) la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica, (3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson  $\mu$ ), la densità di massa  $\rho$  degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva

di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

### 1.3 Combinazione del metodo HVSR e MASW e risultati.

La combinazione tra le misure HVSR e quelle MASW permettono di ottimizzare la ricostruzione del modello di velocità delle onde di taglio Vs30.

Infatti, le MASW permettono di ottenere le misure di velocità di taglio nei primi metri che servono da base per interpretare gli strati più profondi osservabili solo dalle misure HVSR.

Inoltre, si è provveduto ad eseguire anche la calibrazione delle misure HVSR e MASW in base alle indagini geognostiche eseguite sul sito di indagine.

La prova eseguita impiegando la suddetta metodologia dei microtremori, combinata con la MASW, utilizzando l'inversione H/V con il metodo proposto da Nakamura, secondo la teoria descritta da Aki (1964) e Ben-Menahem & Sing (1981), ha evidenziato una **Vs\_eq(0.0-30.0)=233 m/s**.

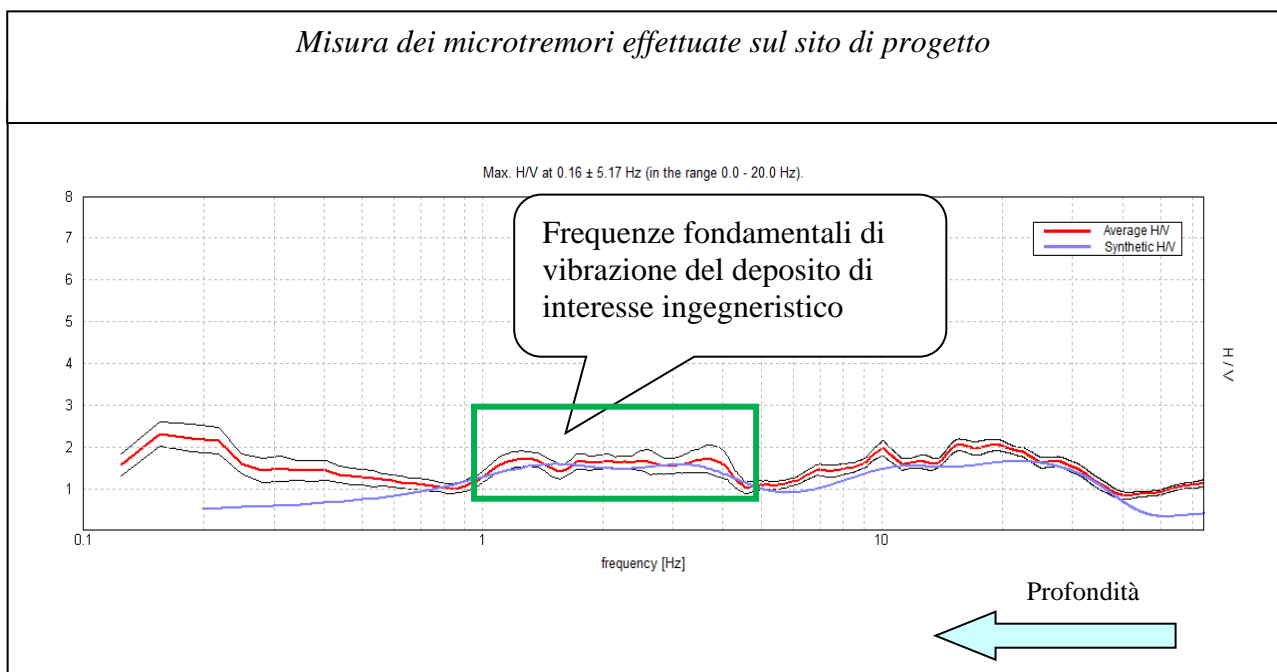
L'analisi delle frequenze fondamentali di amplificazione del sito evidenzia l'amplificazione di risonanza tipica del terreno e, di conseguenza, l'altezza critica degli edifici che in caso di sisma possono entrare in risonanza con il terreno.

Nel caso specifico è possibile individuare, in prima analisi, la sottostante frequenza fondamentale per il deposito esaminato.

<b>Frequenze fondamentali di vibrazione del deposito</b>	
Frequenza - f (Hz)	Periodo - T (sec)
1.1÷4	0.9÷0.25

Le verifiche del modello sismico delle opere in esame potranno essere utilmente confrontate con la frequenza fondamentale del sito indagato.

In generale si evidenzia comunque il basso contrasto del rapporto H/V, che risulta inferiore a 2.



## 2 VALORI DELLE $V_{S,eq}$ CARATTERISTICHE DEL SITO: CATEGORIA DEL SUOLO

Il D.M. 17-01-2018, Norme tecniche per le costruzioni, stabilisce delle categorie del suolo ai fini di valutare l'amplificazione sismica del sito in esame.

Considerando la geologia della zona, osservando che il substrato sismico si trova a profondità superiore a 30 m, facendo quindi riferimento alla velocità nei primi trenta metri di profondità del substrato indagato come richiesto dalle NTC2018 per il metodo semplificato, visto che dalle misure geofisiche risulta una  $V_{S,30} = 233 \text{ m/s}$ , si può affermare che il sottosuolo del sito di interesse appartiene alla categoria **C**.

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

<b>Categoria</b>	<b>Descrizione</b>
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di <math>V_{s,30}</math> superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.</i>
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s,30}</math> compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
<b>C</b>	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s,30}</math> compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
<b>D</b>	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s,30}</math> inferiori a 180 m/s.</i>
<b>E</b>	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente a quelle definite per le categorie C o D, con spessore del substrato non superiore a 30 m.</i>

I valori di  $V_S$  sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{S,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

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

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

N = numero di strati;

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

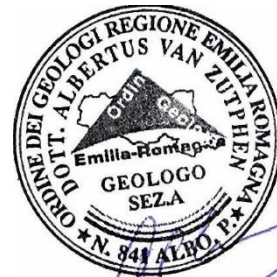
Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera.

Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

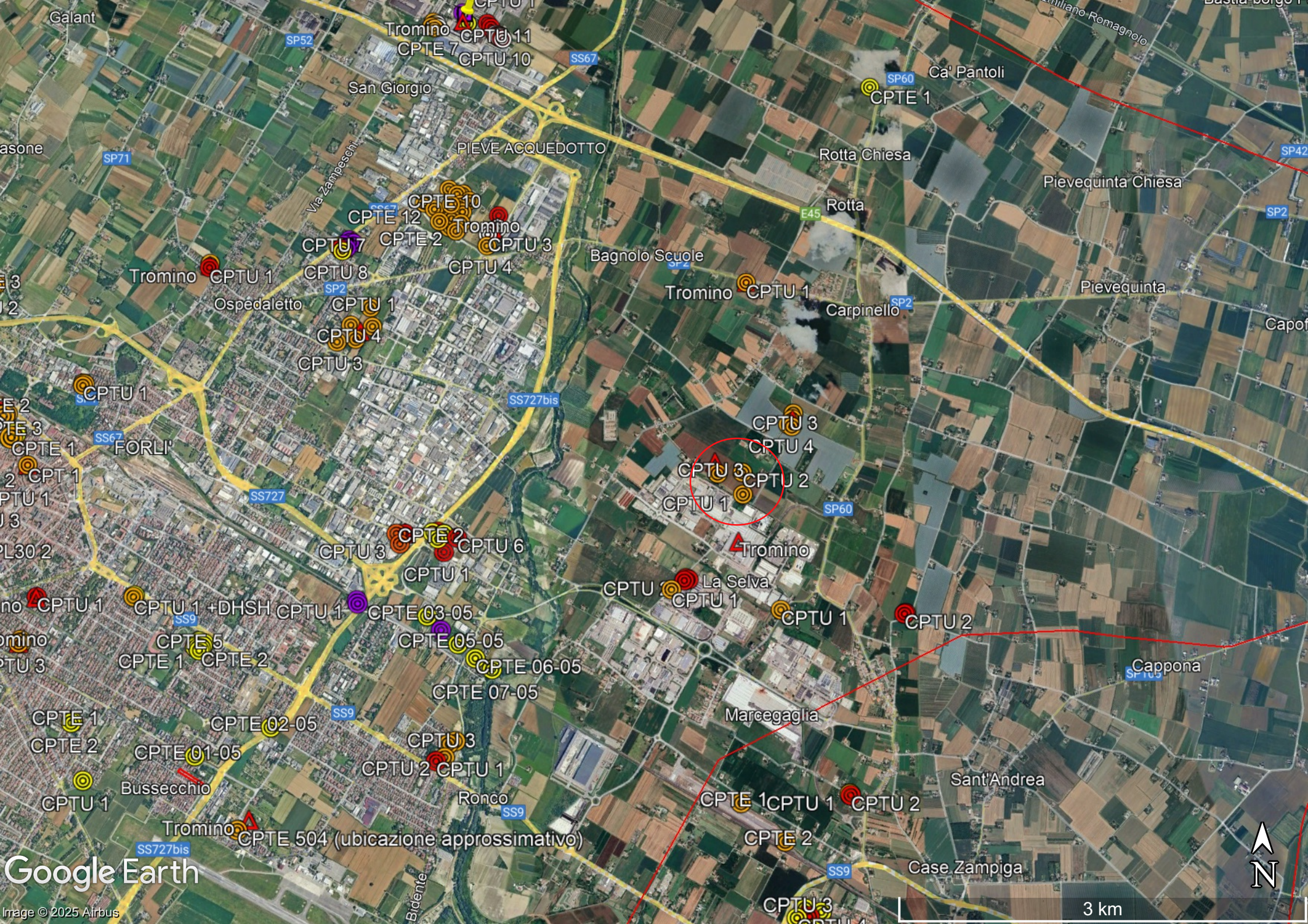
**Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è definita dal parametro  $V_{S,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.**

---

Aprile, 2025



# ALLEGATI





Via Bianco da Durazzo

Via B. Rossellino

Via B. Rossellino

Via del Santuario

Tromino CPTU 1

CPTU 4 CPTU 3

MASW + Tromino

CPTU 3

CPTU 2

Via del Senoni

CPTU 1

Via del Santuario

Via del

Google Earth

Image © 2025 Airbus

300 m

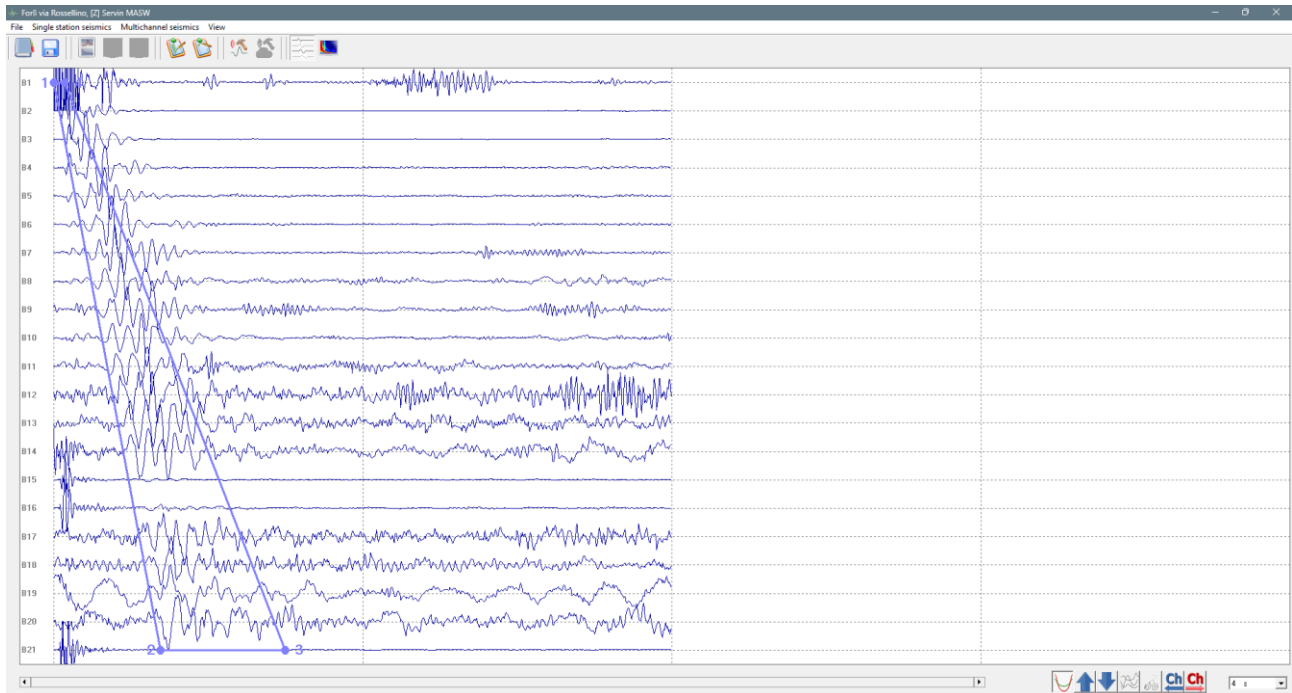


## FORLÌ VIA ROSSELLINO, SERVIN T1

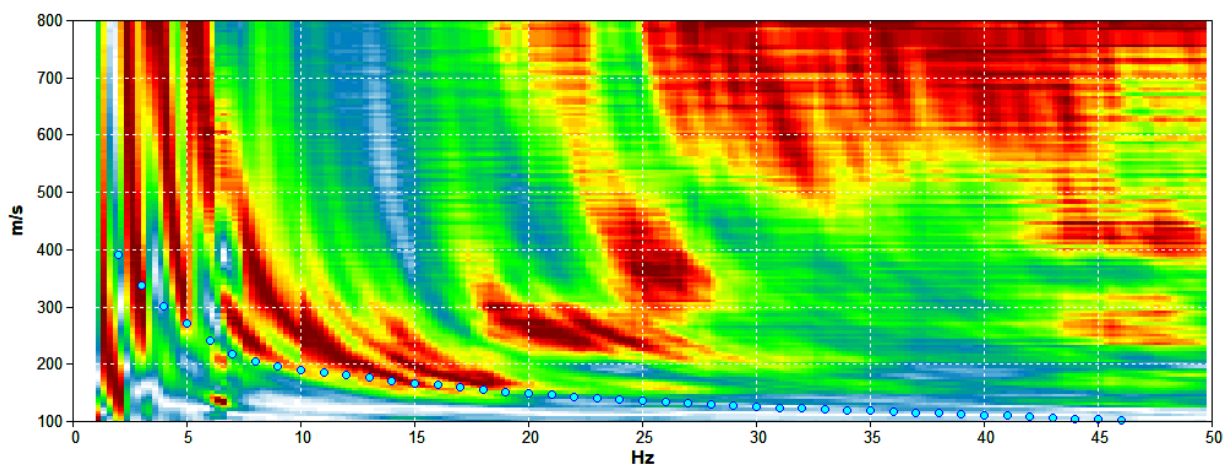
Start recording: 07/04/2025 12:11:44 End recording: 07/04/2025 12:37:56  
Trace length: 0h26'12". Analyzed 69% trace (manual window selection)  
Sampling rate: 128 Hz

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 36.0 39.0 42.0 45.0 48.0 51.0 54.0 57.0 60.0 m.

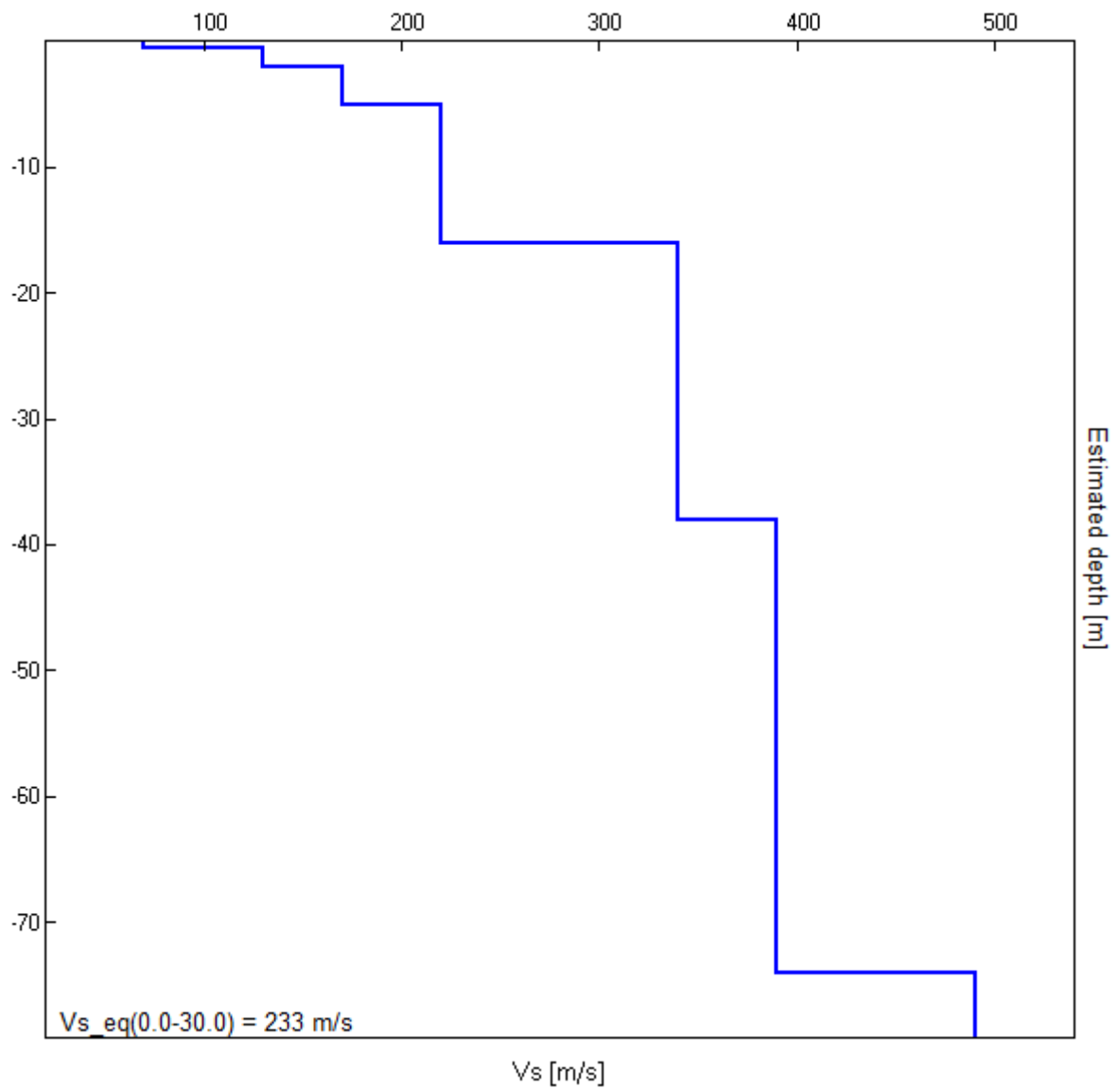


MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.60	0.60	70	0.42
2.10	1.50	130	0.42
5.10	3.00	170	0.42
16.10	11.00	220	0.42
38.10	22.00	340	0.42
74.10	36.00	390	0.42
inf.	inf.	490	0.42

$Vs_{eq}(0.0-30.0) = 233 \text{ m/s}$

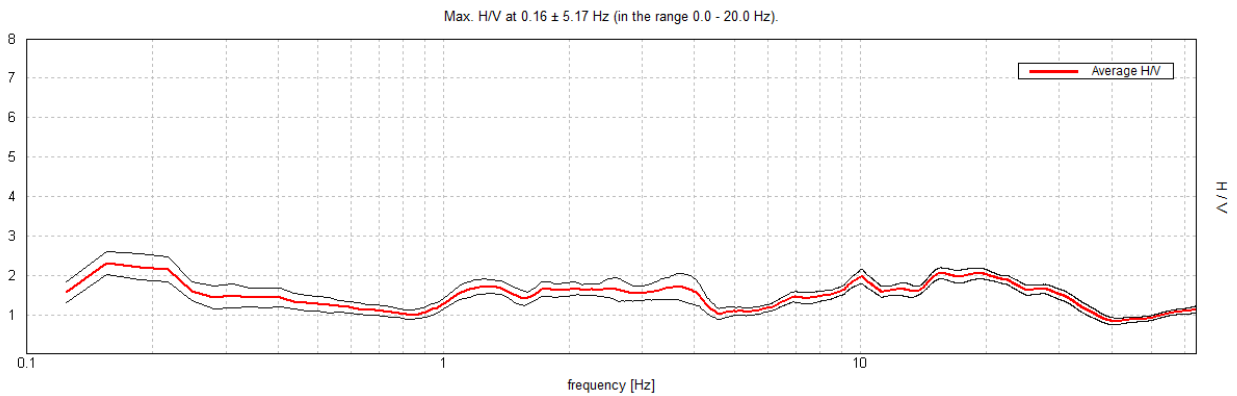


## FORLÌ VIA ROSSELLINO, SERVIN T1

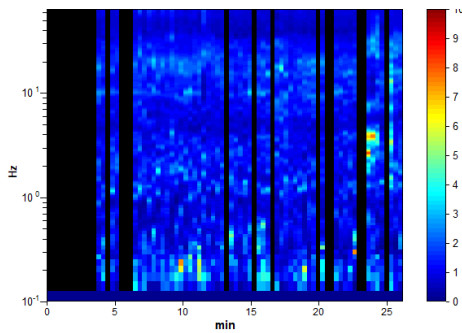
Instrument: TEB-0704/01-22  
 Data format: 32 bit  
 Full scale [mV]: 89  
 Start recording: 07/04/2025 12:11:44 End recording: 07/04/2025 12:37:56  
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN  
 GPS data not available

Trace length: 0h26'12". Analyzed 69% trace (manual window selection)  
 Sampling rate: 128 Hz  
 Window size: 20 s  
 Smoothing type: Triangular window  
 Smoothing: 10%

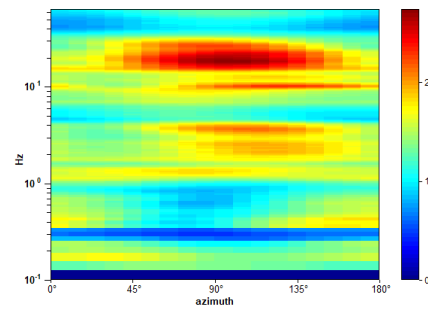
### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



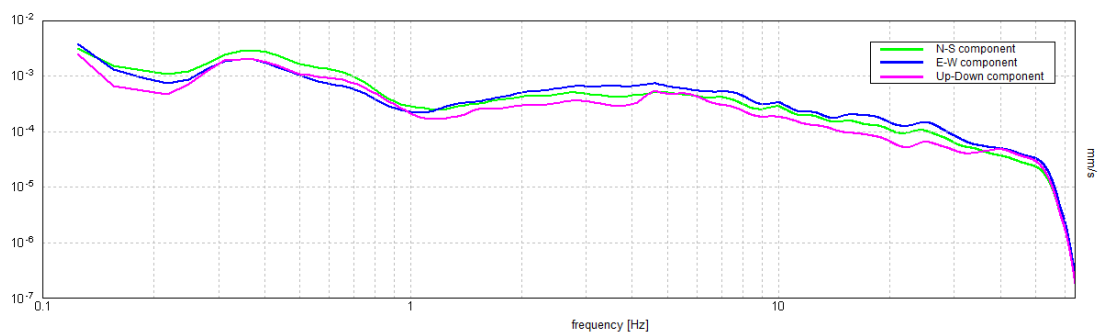
### H/V TIME HISTORY



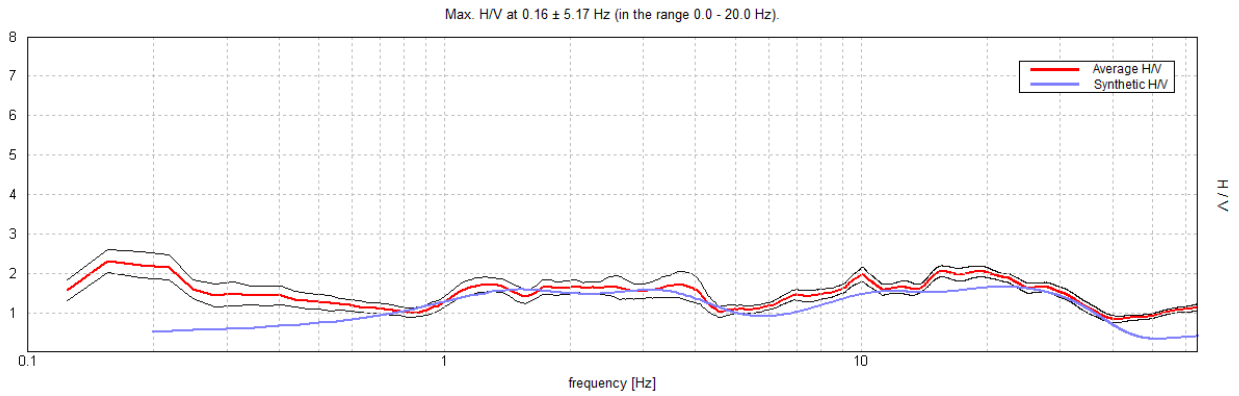
### DIRECTIONAL H/V



### SINGLE COMPONENT SPECTRA

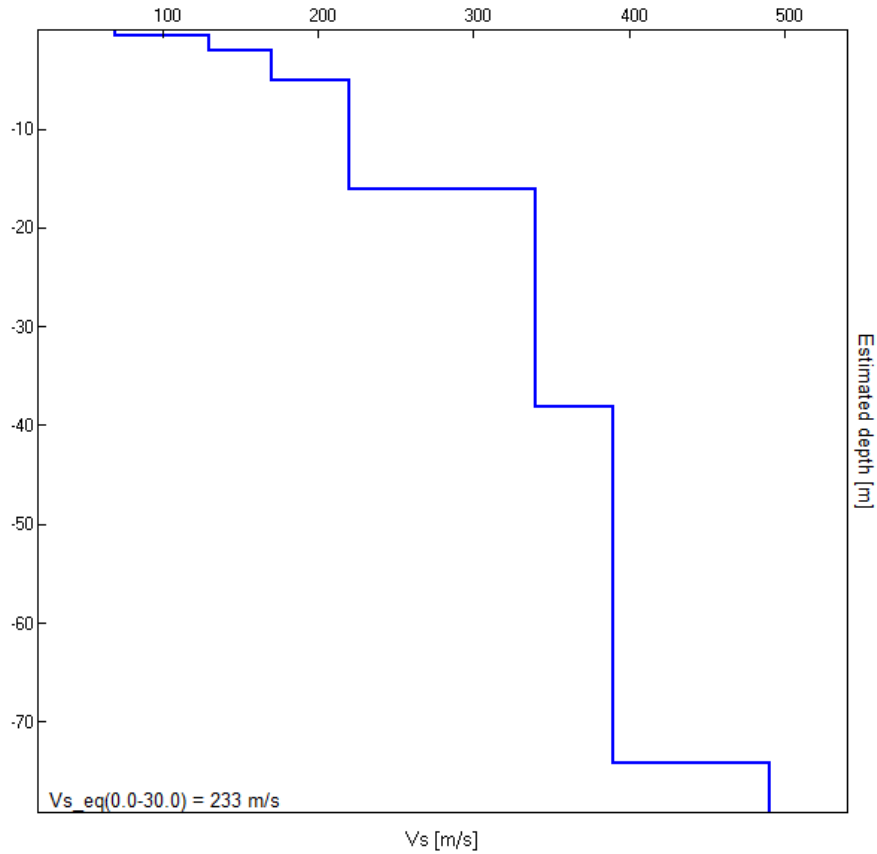


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.60	0.60	70	0.42
2.10	1.50	130	0.42
5.10	3.00	170	0.42
16.10	11.00	220	0.42
38.10	22.00	340	0.42
74.10	36.00	390	0.42
inf.	inf.	490	0.42

Vs\_eq(0.0-30.0) = 233 m/s



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

**Max. H/V at 0.16 ± 5.17 Hz (in the range 0.0 - 20.0 Hz).**

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	0.16 > 0.50		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	168.8 > 200		<b>NO</b>
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 9 times	<b>OK</b>	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	<b>OK</b>	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			<b>NO</b>
$A_0 > 2$	2.31 > 2	<b>OK</b>	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 33.08315  < 0.05$		<b>NO</b>
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	5.16924 < 0.03906		<b>NO</b>
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2899 < 3.0	<b>OK</b>	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.2 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

**ALLEGATO 3:  
VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI  
LIQUEFAZIONE DEI TERRENI**

Comune Forlì  
 Via Via Rossellino  
 Localita' Forniolo  
 Committente Servin  
 Data 7-apr-25

**CPT 1**  
 Falda presunta 0.5 metri

**NTC 2018**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
1.000		
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudo	6.140

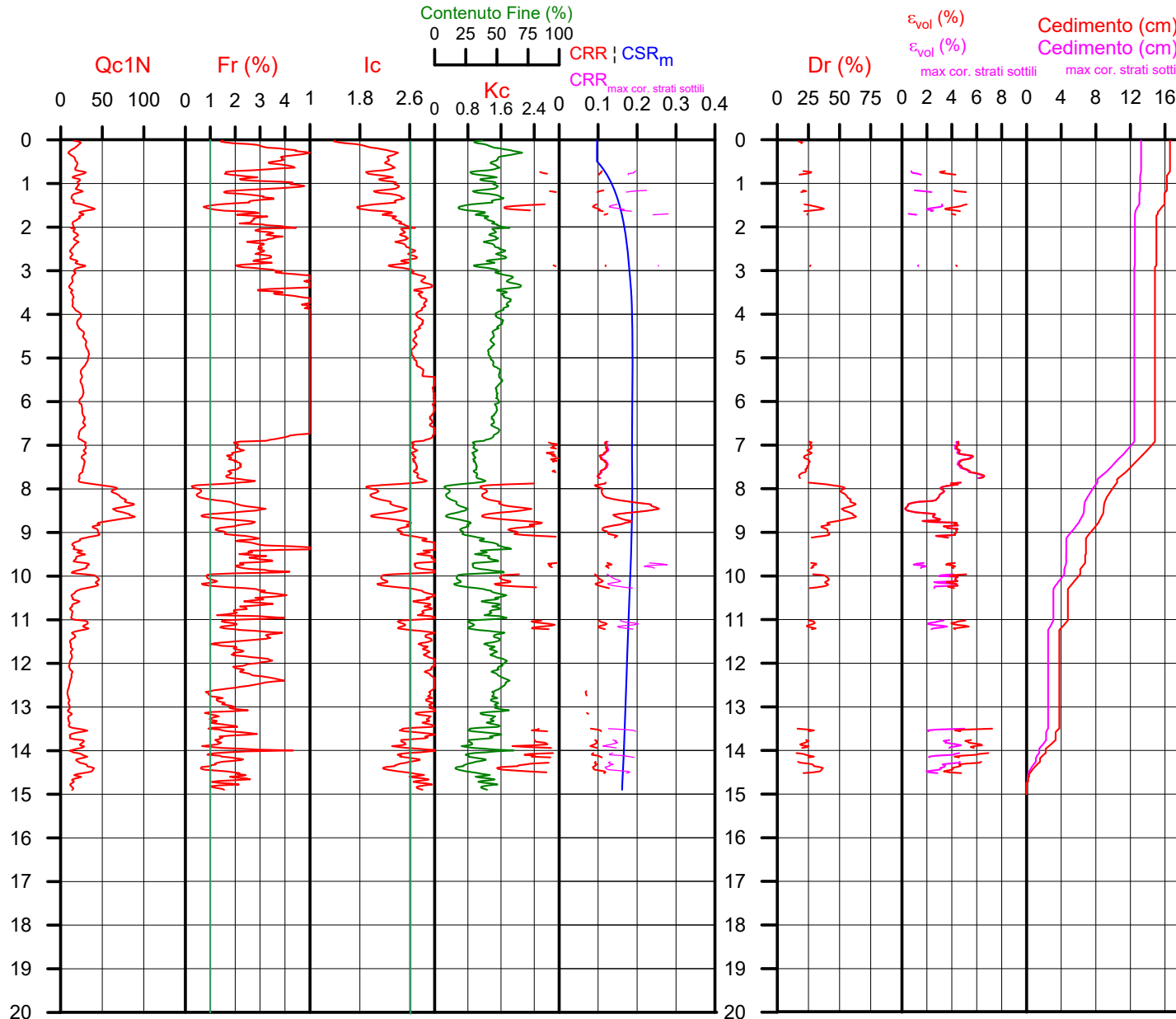
**DGR Emilia-Romagna 476 / 2021**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
1.000		
	magnitudo	6.140



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
 di Van Zutphen Albert & C.  
 Via Matteotti 50  
 48012 Bagnacavallo (RA)  
 www.geo55.com



**PROCEDURA**

**VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO LE LINEE GUIDA AGI 2005 PER TR = 332 ANNI**

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato con MSF secondo NCEER (correzione per magnitudo)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da Ic e Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>cs</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998:
  - Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione: F<sub>slq</sub> = CRR 7.5 / CSR 6.14

**CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)**

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento totale</b>	<b>16.6</b>	<b>96.1</b>
<b>Cedimento totale considerando strati sottili</b>	<b>13.2</b>	<b>91.8</b>

**VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982)** (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su F<sub>slq</sub> e la profondità.

INDICE I <sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE AGI 2005	POTENZIALE DI ROTTURA
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
4.6	IL <= 5 BASSO
7.6	5 < IL <= 15 ELEVATO
	IL > 15 ESTREMAMENTE ELEVATO

**VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE E LA PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PPbl (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)**

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su F<sub>slq</sub> e la profondità.

INDICE I <sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
4.6	IL <= 2 BASSA
7.7	2 < IL <= 5 MODERATA
	5 < IL <= 15 ELEVATA
	IL > 15 MOLTO ALTA

INDICE PPbl DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
14	PPbl <= 15 NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
18	15 < PPbl <= 35 LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
	35 < PPbl <= 65 LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABLE
	65 < PPbl <= 85 LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABLE
	PPbl > 85 LIQUEFAZIONE QUASI CERTA

Comune Forlì  
 Via Via Rossellino  
 Localita' Forniolo  
 Committente Servin  
 Data 7-apr-25

**CPT 2**  
 Falda presunta 0.5 metri

**NTC 2018**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
1.000		
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudo	6.140

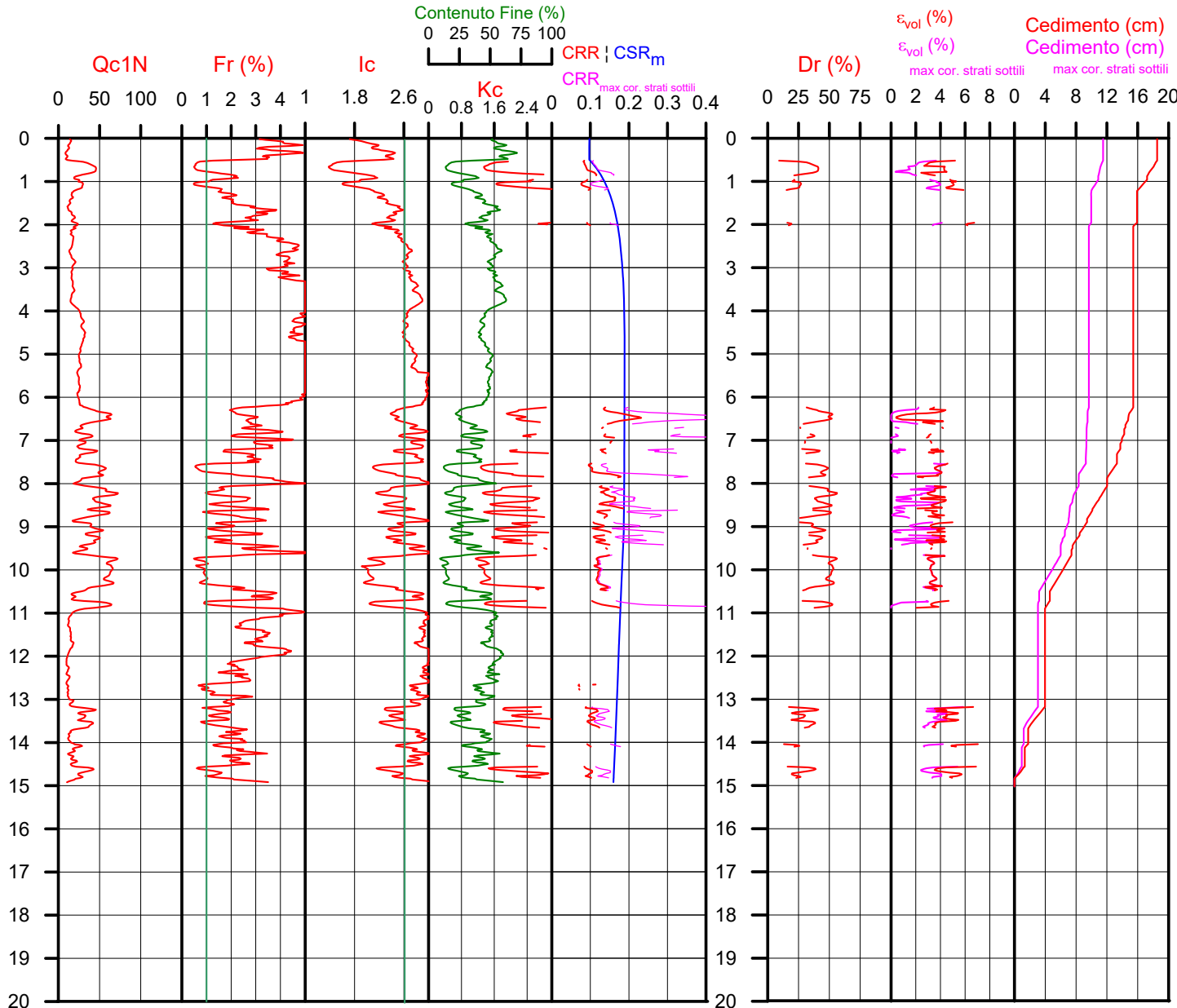
**DGR Emilia-Romagna 476 / 2021**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
1.000		
	magnitudo	6.140



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
 di Van Zutphen Albert & C.  
 Via Matteotti 50  
 48012 Bagnacavallo (RA)  
 www.geo55.com



**PROCEDURA**

**VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO LE LINEE GUIDA AGI 2005 PER TR = 332 ANNI**

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato con MSF secondo NCEER (correzione per magnitudo)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con:
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da Ic e Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1Ncs per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998:
  - Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione: Fslq = CRR 7.5 / CSR 6.14

**CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)**

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
	18.5	240.6
Cedimento totale	18.5	240.6
Cedimento totale considerando strati sottili	11.5	130.8

**VALUTAZIONE DELL' INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982)** (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fslq e la profondità.

INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE AGI 2005	POTENZIALE DI ROTTURA
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
2.7	IL <= 5 BASSO
8.1	5 < IL <= 15 ELEVATO
	IL > 15 ESTREMAMENTE ELEVATO

**VALUTAZIONE DELL' INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE E LA PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PPbl (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)**

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fslq e la profondità.

INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
2.7	IL <= 2 BASSA
8.1	2 < IL <= 5 MODERATA
	5 < IL <= 15 ELEVATA
	IL > 15 MOLTO ALTA

INDICE PPbl DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili	
con correzione per strati sottili	
14	% PPbl <= 15 NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
21	15 < PPbl <= 35 LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
	35 < PPbl <= 65 LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABLE
	65 < PPbl <= 85 LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABLE
	PPbl > 85 LIQUEFAZIONE QUASI CERTA

Comune Forlì  
 Via Via Rossellino  
 Localita' Forniolo  
 Committente Servin  
 Data 7-apr-25

**CPT 3**  
 Falda presunta 0.5 metri

**NTC 2018**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
1.000		
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudine	6.140

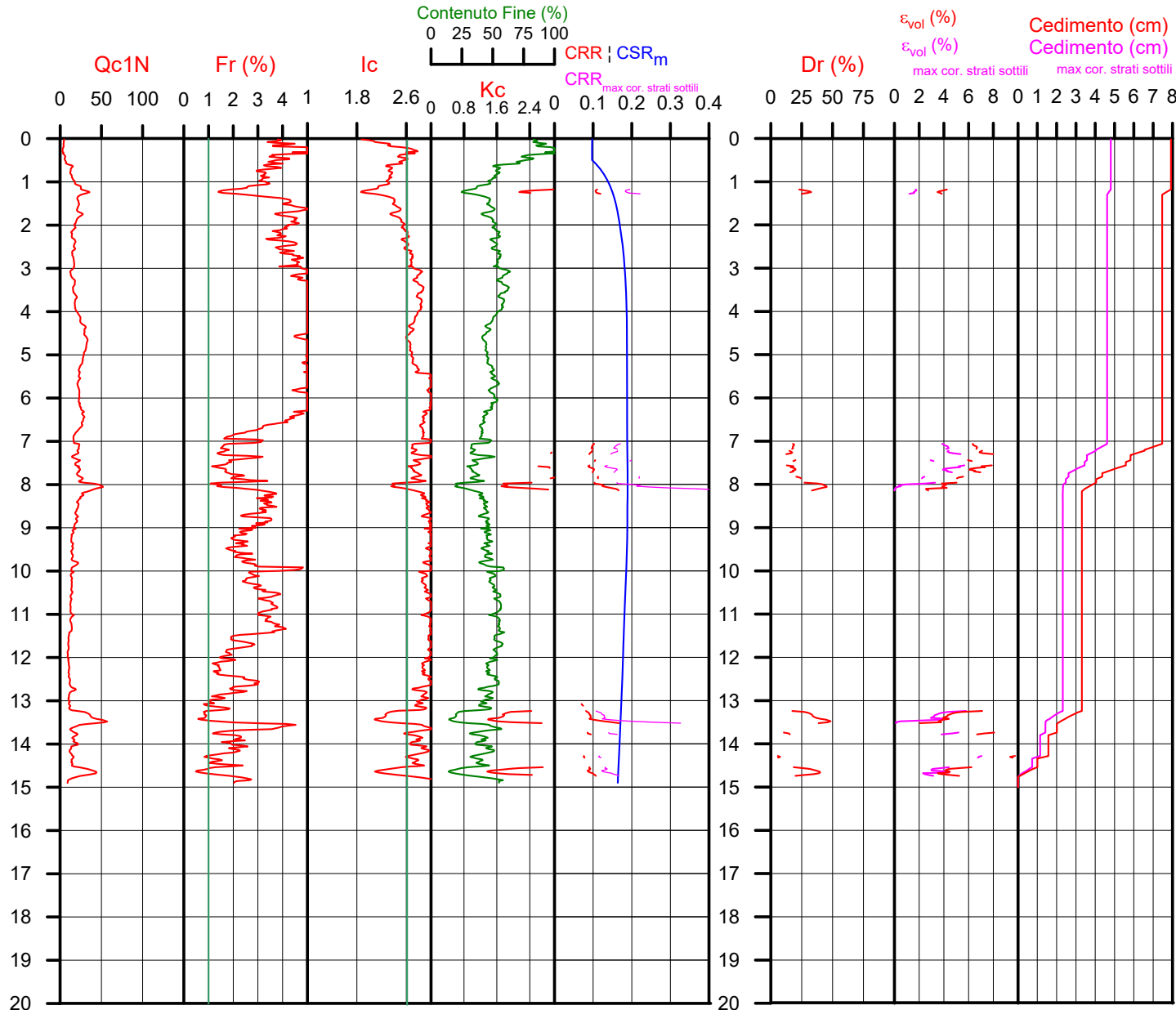
**DGR Emilia-Romagna 476 / 2021**

latitudine 44.227296°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
1.000		
	magnitudine	6.140



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
 di Van Zutphen Albert & C.  
 Via Matteotti 50  
 48012 Bagnacavallo (RA)  
 www.geo55.com



**PROCEDURA**

**VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO LE LINEE GUIDA AGI 2005 PER TR = 332 ANNI**

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato con MSF secondo NCEER (correzione per magnitudine)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da Ic e Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1Ncs per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998:
  - Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione: Fslq = CRR 7.5 / CSR 6.14

**CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)**

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
	7.9	32.0
<b>Cedimento totale</b>	<b>7.9</b>	<b>32.0</b>
<b>Cedimento totale considerando strati sottili</b>	<b>4.8</b>	<b>13.2</b>

**VALUTAZIONE DELL' INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982)** (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fslq e la profondità.

INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE AGI 2005	POTENZIALE DI ROTTURAZIONE
senza correzione per strati sottili: 3.2	IL <= 5: BASSO
con correzione per strati sottili: 0.9	5 < IL <= 15: ELEVATO
	IL > 15: ESTREMAMENTE ELEVATO

**VALUTAZIONE DELL' INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE E LA PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PPbl (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)**

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fslq e la profondità.

INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili: 3.2	IL <= 2: BASSA
con correzione per strati sottili: 0.9	2 < IL <= 5: MODERATA
	5 < IL <= 15: ELEVATA
	IL > 15: MOLTO ALTA

INDICE PPbl DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)	GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili: 7	PPbl <= 15: NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
con correzione per strati sottili: 4	15 < PPbl <= 35: LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
	35 < PPbl <= 65: LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABLE
	65 < PPbl <= 85: LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABLE
	PPbl > 85: LIQUEFAZIONE QUASI CERTA

Comune Forlì  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

# CPT 1

Falda presunta 0.5 metri

## NTC 2018

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudine	6.140

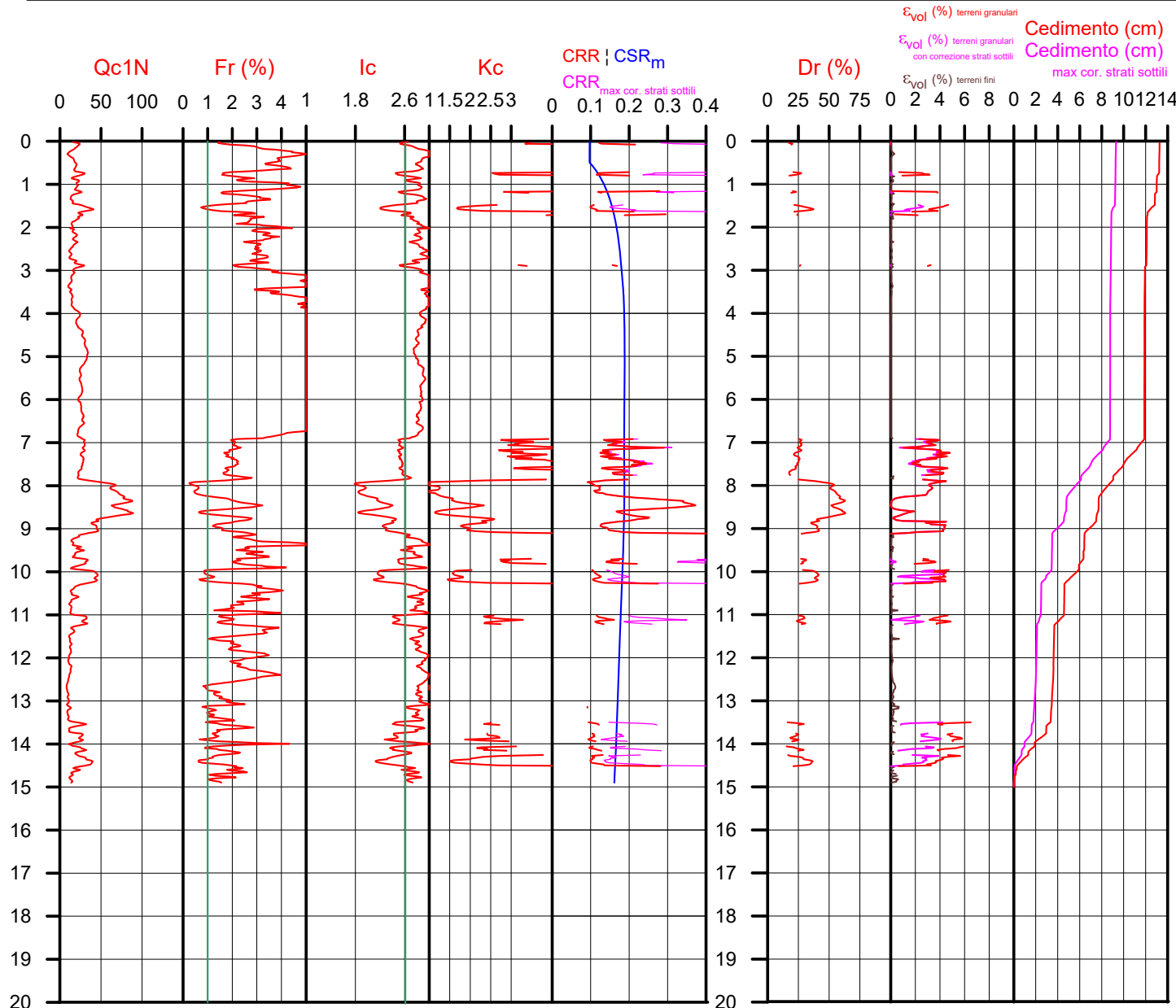
## DGR Emilia-Romagna 476 / 2021

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
	magnitudine	6.140



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & CABAL 2009 PER TR = 332 ANN

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato MSF secondo NCEER (correzione per magnitudine)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con
  - Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da Ic secondo Robertson & Cabal 2009
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>cs</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione: Fsl<sub>iq</sub> = CRR 7.5 / CSR 6.14

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE PER TERRENI GRANULARI (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova per terreni granulari	Cedimento terreni granulari (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>12.5</b>	<b>81.4</b>
<b>Cedimento considerando strati sottili</b>	<b>8.5</b>	<b>70.7</b>

### CALCOLO DEL CEDIMENTO PER TERRENI FINI (ROBERTSON 2009)

Parametri utilizzati:

- \* Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento dei terreni fini calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento terreni fini (cm)	Cedimento totale fini + granulari (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>0.8</b>	<b>13.3</b>
<b>Cedimento considerando strati sottili</b>	<b>0.8</b>	<b>9.3</b>

### VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982) (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fsl<sub>iq</sub> e la profondità,

- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra
- \* Profondità

INDICE I <sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE		POTENZIALE DI ROTTURA	
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili		
	<b>1.9</b>	IL ≤ 2	BASSO
<b>4.0</b>		2 < IL ≤ 5	MODERATO
		5 < IL ≤ 15	ELEVATO
		IL > 15	ESTREMAMENTE ELEVATO

Comune Forlì  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

# CPT 2

Falda presunta 0.5 metri

## NTC 2018

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
1.000		
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudine	6.140

## DGR Emilia-Romagna 476 / 2021

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
1.000		
	magnitudine	6.140

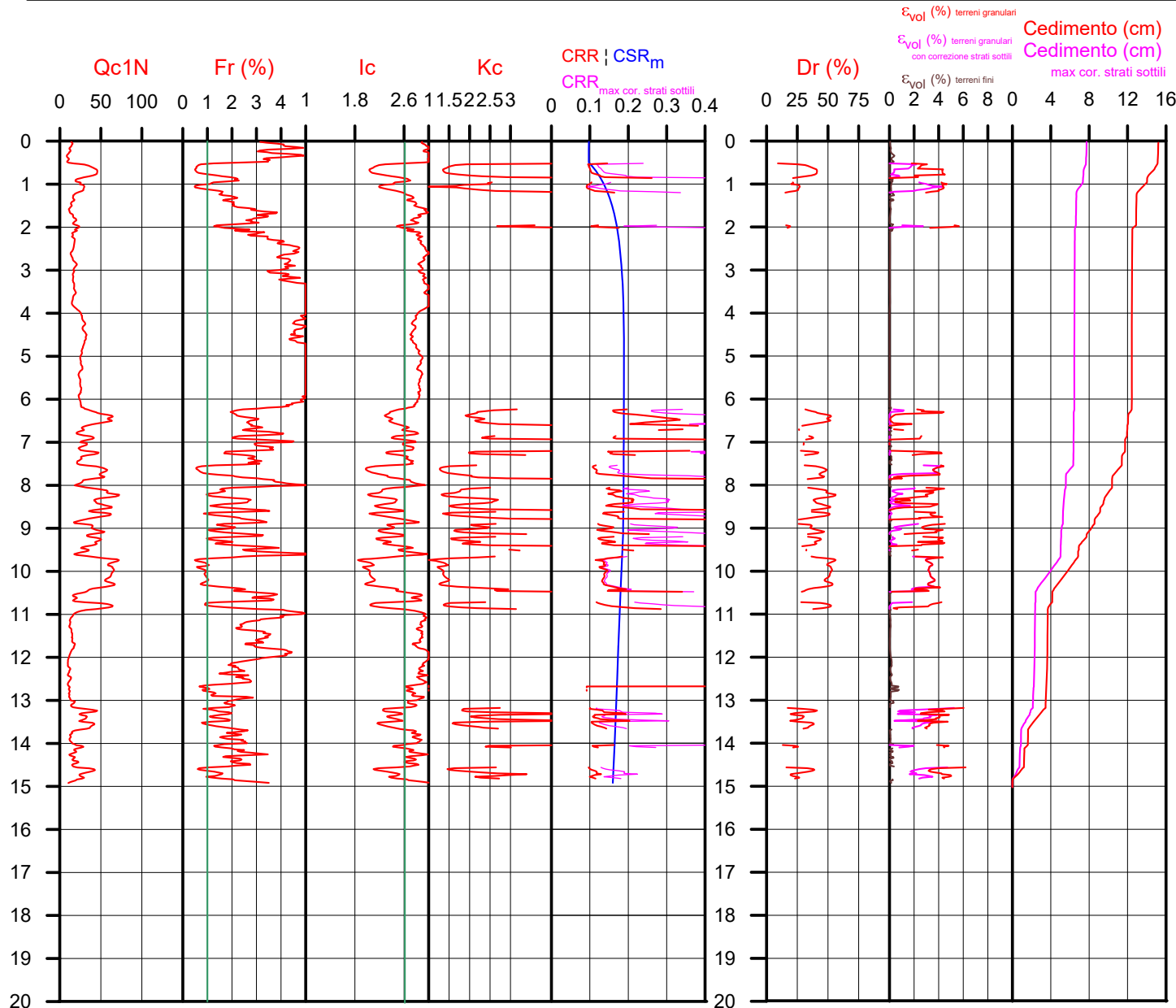


**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.

Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)

www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & CABAL 2009 PER TR = 332 ANN

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato MSF secondo NCEER (correzione per magnitudine)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con
  - Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da Idriss & Boulanger 2009
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1Ncs per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione:  $F_{slq} = CRR / CSR$

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE PER TERRENI GRANULARI (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova per terreni granulari	Cedimento terreni granulari (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>14.6</b>	<b>187.3</b>
Cedimento considerando strati sottili	7.1	83.8

### CALCOLO DEL CEDIMENTO PER TERRENI FINI (ROBERTSON 2009)

Parametri utilizzati:

- \* Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento dei terreni fini calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento terreni fini (cm)	Cedimento totale fini + granulari (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>0.7</b>	<b>15.2</b>
Cedimento considerando strati sottili	0.7	7.7

### VALUTAZIONE DELL' INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982) (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fslq e la profondità,

- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra
- \* Profondità

INDICE IL DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE		POTENZIALE DI ROTTURA	
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	IL	
	1.3	IL ≤ 2	BASSO
4.5		2 < IL ≤ 5	MODERATO
		5 < IL ≤ 15	ELEVATO
		IL > 15	ESTREMAMENTE ELEVATO

Comune Forlì  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

# CPT 3

Falda presunta 0.5 metri

## NTC 2018

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.726
longitudine 12.110152°		
tipo di suolo C	fattore amplificazione	1.448
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	2.500
		1.000
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA	magnitudine	6.140

## DGR Emilia-Romagna 476 / 2021

latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2)	1.970
longitudine 12.110152°		
Suolo di riferimento Pianura 2	fattore amplificazione	1.700
amplificazione topografica	amax al p.c. (m/sec2)	3.349
		1.000
	magnitudine	6.140

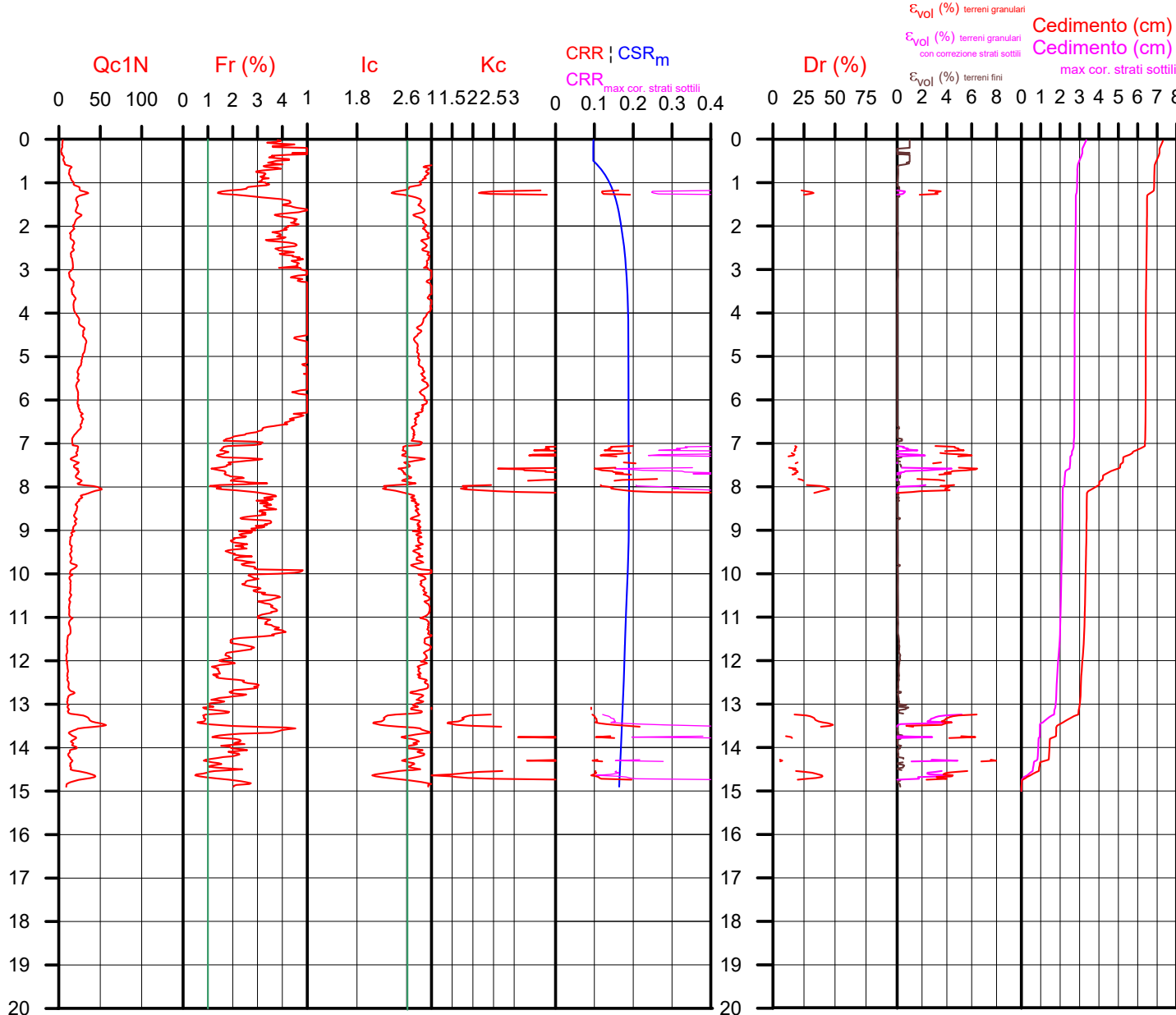


**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.

Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)

www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & CABAL 2009 PER TR = 332 ANN

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR 6.14 calcolato MSF secondo NCEER (correzione per magnitudine)
- \* CRR (Cyclic Resistance Ratio) calcolato con
  - Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
  - Fattore Kc per la correzione di Qc1N to Qc1Ncs per granulometria calcolato da il secondo Robertson & Cabal 2009
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>cs</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione: Fsl<sub>iq</sub> = CRR 7.5 / CSR 6.14

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE PER TERRENI GRANULARI (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova per terreni granulari	Cedimento terreni granulari (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>6.0</b>	<b>28.0</b>
<b>Cedimento considerando strati sottili</b>	<b>2.1</b>	<b>6.5</b>

### CALCOLO DEL CEDIMENTO PER TERRENI FINI (ROBERTSON 2009)

Parametri utilizzati:

- \* Qc1N secondo Idriss & Boulanger 2004
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento dei terreni fini calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento terreni fini (cm)	Cedimento totale fini + granulari (cm)
<b>Cedimento</b>	<b>1.3</b>	<b>7.3</b>
<b>Cedimento considerando strati sottili</b>	<b>1.3</b>	<b>3.3</b>

### VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (IWASAKI 1982) (Riferimento Linee Guida AGI 2005; pagina 105)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fsl<sub>iq</sub> e la profondità,

- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra
- \* Profondità

INDICE I <sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE		POTENZIALE DI ROTTURA	
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	IL <= 2	BASSO
<b>1.6</b>	<b>0.2</b>	2 < IL <= 5	MODERATO
		5 < IL <= 15	ELEVATO
		IL > 15	ESTREMAMENTE ELEVATO

Comune Forlì  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

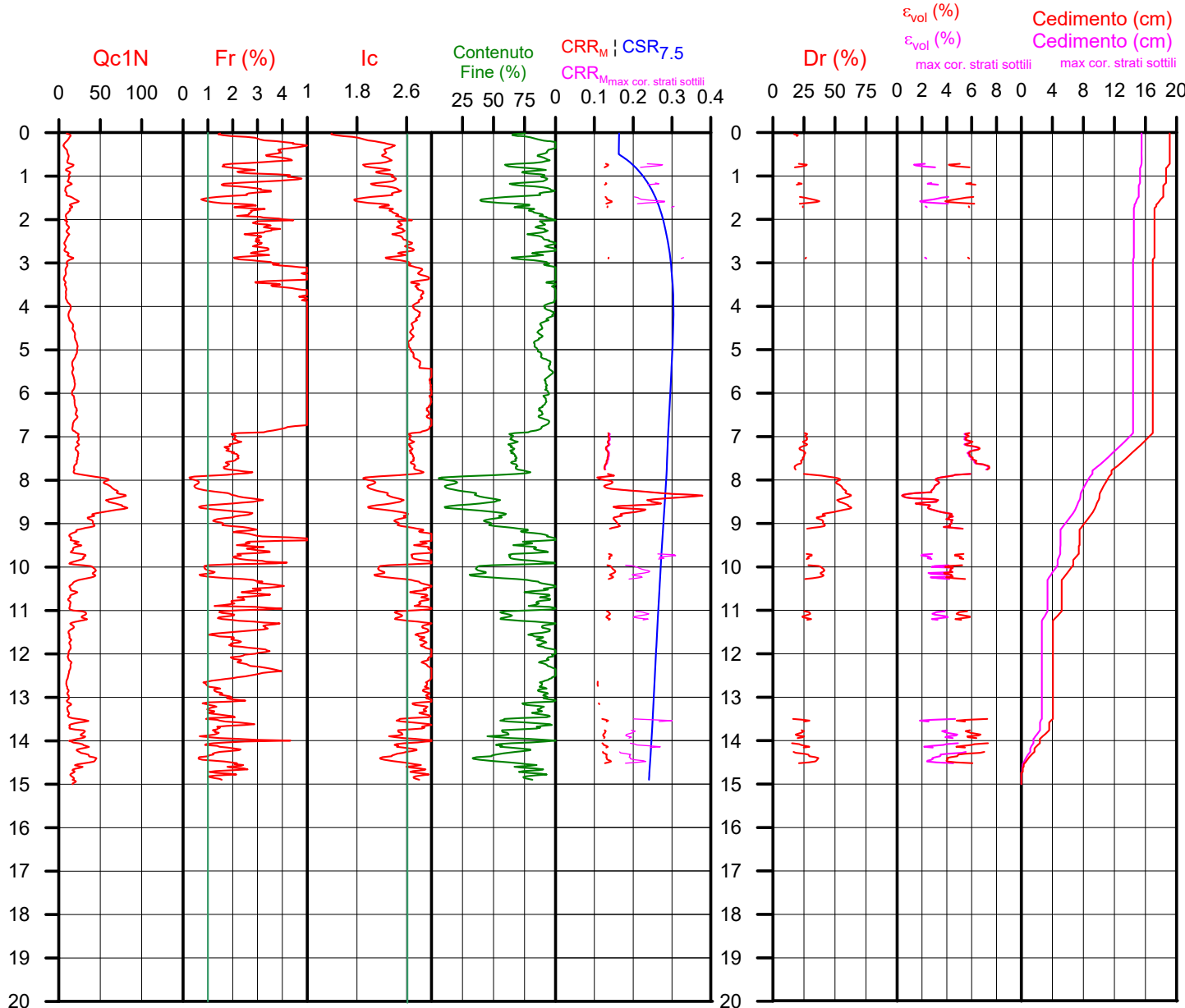
**CPT** 1  
Falda presunta 0.5 metri

NTC 2018		DGR Emilia-Romagna 476 / 2021	
latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.726	latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.970
longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.448	longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.700
tipo di suolo C	amax al p.c. (m/sec2) 2.500	Suolo di riferimento Pianura 2	amax al p.c. (m/sec2) 3.349
amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140	amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA			



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO BOULANGER & IDRISSE 2014 PER TR = 332 ANNI

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR secondo Boulanger & Idriss 2014 (Cyclic Stress Ratio per magnitudine 7.5)
- \* CRR<sub>m</sub> (Cyclic Resistance Ratio corretto per magnitudine 6.14) calcolato con
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Contenuto di fine secondo Boulanger & Idriss 2014
  - Correzione di Qc1N a Qc1N<sub>cs</sub> basato su contenuto di fine e Qc1N
  - MSF (Magnitude Scaling Factor secondo Boulanger & Idriss 2014"
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>cs</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di correzione per tensione efficace K<sub>σ</sub> secondo Boulanger & Idriss 2014.
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998: Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta.
- \* **Fattore di sicurezza per liquefazione: Fsl<sub>iq</sub> = CRR<sub>6.14</sub> \* K<sub>s</sub> / CSR<sub>7.5</sub>**

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento totale</b>	<b>19.1</b>	<b>116.9</b>
<b>Cedimento totale correzione strati sottili</b>	<b>15.5</b>	<b>112.3</b>

### VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>l</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (SONMEZ 2003)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fsl<sub>iq</sub> e la profondità.

INDICE I <sub>l</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Sonmez 2005)		POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	
	IL <= 2	BASSA
	2 < IL <= 5	MODERATA
<b>10.3</b>	<b>6.5</b>	<b>ELEVATA</b>
	IL > 15	MOLTO ALTA

### PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PPbi (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)

INDICE PPbi DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)			GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	%	
		PPbi <= 15	NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
<b>20</b>	<b>16</b>	15 < PPbi <= 35	LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
		35 < PPbi <= 65	LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABLE
		65 < PPbi <= 85	LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABLE
		PPbi > 85	LIQUEFAZIONE QUASI CERTA

Comune Fori  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

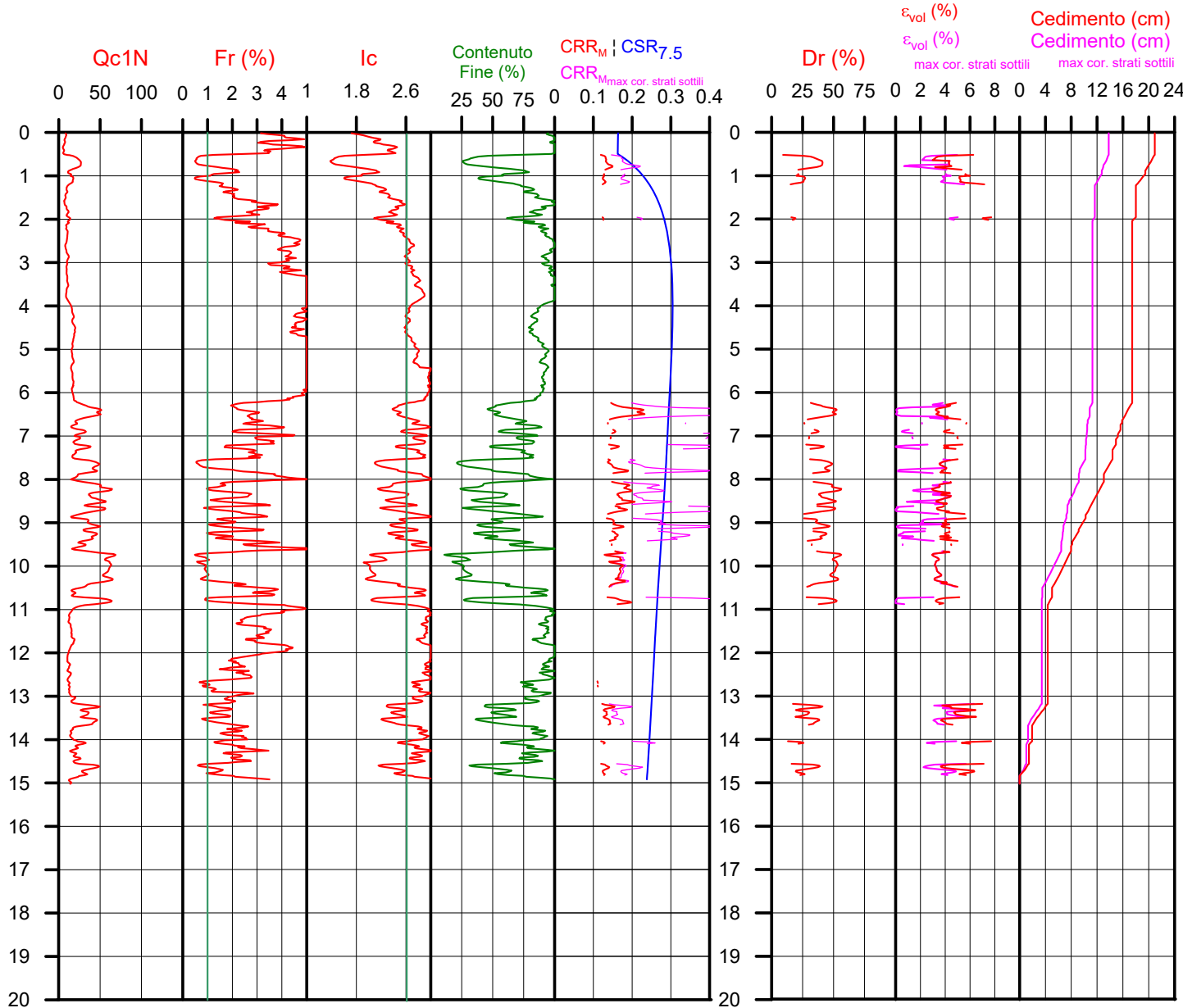
**CPT 2**  
Falda presunta 0.5 metri

NTC 2018		DGR Emilia-Romagna 476 / 2021	
latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.726	latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.970
longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.448	longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.700
tipo di suolo C	amax al p.c. (m/sec2) 2.500	Suolo di riferimento Pianura 2	amax al p.c. (m/sec2) 3.349
amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140	amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA			



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO BOULANGER & IDRISSE 2014 PER TR = 332 ANNI

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR secondo Boulanger & Idriss 2014 (Cyclic Stress Ratio per magnitudine 7.5)
- \* CRR<sub>m</sub> (Cyclic Resistance Ratio corretto per magnitudo 6.14) calcolato con
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Contenuto di fine secondo Boulanger & Idriss 2014
  - Correzione di Qc1N a Qc1N<sub>cs</sub> basato su contenuto di fine e Qc1N
  - MSF (Magnitude Scaling Factor secondo Boulanger & Idriss 2014"
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>cs</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di correzione per tensione efficace K<sub>σ</sub> secondo Boulanger & Idriss 2014.
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998: Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta.
- \* **Fattore di sicurezza per liquefazione: F<sub>slq</sub> = CRR<sub>6.14</sub> \* K<sub>s</sub> / CSR<sub>7.5</sub>**

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento totale</b>	<b>20.9</b>	<b>262.3</b>
<b>Cedimento totale correzione strati sottili</b>	<b>13.8</b>	<b>161.6</b>

### VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (SONMEZ 2003)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su F<sub>slq</sub> e la profondità.

INDICE I <sub>L</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Sonmez 2005)		POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	
		IL <= 2 BASSA
	4.5	2 < IL <= 5 MODERATA
11.8		5 < IL <= 15 ELEVATA
		IL > 15 MOLTO ALTA

### PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PP<sub>bi</sub> (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)

INDICE PP <sub>bi</sub> DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)			GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	%	
		PP <sub>bi</sub> <= 15	NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
24	16	15 < PP <sub>bi</sub> <= 35	LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
		35 < PP <sub>bi</sub> <= 65	LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABILE
		65 < PP <sub>bi</sub> <= 85	LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABILE
		PP <sub>bi</sub> > 85	LIQUEFAZIONE QUASI CERTA

Comune Fori  
Via Via Rossellino  
Localita' Forniolo  
Committente Servin  
Data 7-apr-25

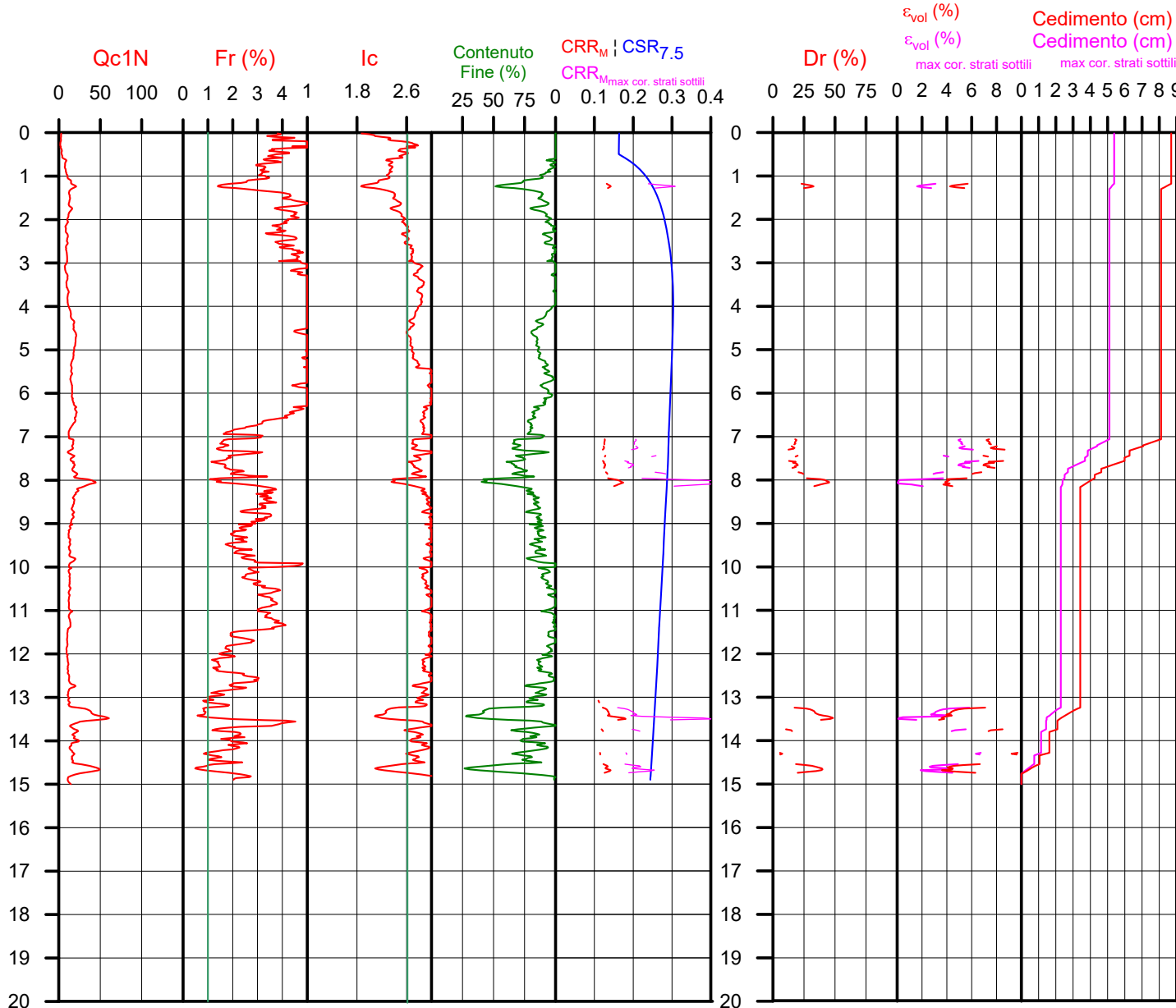
**CPT 3**  
Falda presunta 0.5 metri

NTC 2018		DGR Emilia-Romagna 476 / 2021	
latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.726	latitudine 44.227286°	amax substrato (m/sec2) 1.970
longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.448	longitudine 12.110152°	fattore amplificazione 1.700
tipo di suolo C	amax al p.c. (m/sec2) 2.500	Suolo di riferimento Pianura 2	amax al p.c. (m/sec2) 3.349
amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140	amplificazione topografica 1.000	magnitudine 6.140
3. STATO LIMITE SALVAGUARDIA DELLA VITA			



**Società di Geologia Territoriale**

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
www.geo55.com



## PROCEDURA

### VERIFICA DI LIQUEFAZIONE SECONDO BOULANGER & IDRISSE 2014 PER TR = 332 ANNI

- \* amax e fattore di amplificazione secondo NTC 2018
- \* CSR secondo Boulanger & Idriss 2014 (Cyclic Stress Ratio per magnitudine 7.5)
- \* CRR<sub>m</sub> (Cyclic Resistance Ratio corretto per magnitudine 6.14) calcolato con
  - Qc1N secondo Qc1N secondo Robertson & Wride 1998
  - Contenuto di fine secondo Boulanger & Idriss 2014
  - Correzione di Qc1N a Qc1N<sub>sa</sub> basato su contenuto di fine e Qc1N
  - MSF (Magnitude Scaling Factor secondo Boulanger & Idriss 2014"
  - Fattore Kh per la correzione di Qc1N<sub>sa</sub> per strati sottili di sabbia in mezzo argilla
- \* Applicazione di correzione per tensione efficace K<sub>σ</sub> secondo Boulanger & Idriss 2014.
- \* Applicazione di criteri di esclusione di liquefazione secondo Robertson & Wride 1998: Ic > 2.60 e Fr > 1% e spessori sopra falda presunta.
- \* **Fattore di sicurezza per liquefazione: Fsl<sub>iq</sub> = CRR<sub>6.14</sub> \* K<sub>s</sub> / CSR<sub>7.5</sub>**

### CALCOLO DEL CEDIMENTO E DELL' INDICE DI SPOSTAMENTO LATERALE (ISHIHARA & YOSEMINE 1993)

Parametri utilizzati:

- \* Densità Relativa Dr secondo Tutsaoki 1990
- \* Fattore di sicurezza per liquefazione come sopra

Cedimento ed indice di spostamento laterale calcolato tra piano campagna e massima profondità della prova	Cedimento (cm)	Indice di spostamento laterale LDI (cm)
<b>Cedimento totale</b>	<b>8.7</b>	<b>32.9</b>
<b>Cedimento totale correzione strati sottili</b>	<b>5.4</b>	<b>13.7</b>

### VALUTAZIONE DELL' INDICE I<sub>l</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (SONMEZ 2003)

Metodo di valutazione degli effetti di liquefazione basato su Fsl<sub>iq</sub> e la profondità.

INDICE I <sub>l</sub> DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (Sonmez 2005)		POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	
	<b>1.3</b>	IL <= 2 BASSA
<b>3.9</b>		2 < IL <= 5 MODERATA
		5 < IL <= 15 ELEVATA
		IL > 15 MOLTO ALTA

### PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE PP<sub>bi</sub> (FACCIORUSSO & VANNUCCHI 2009)

INDICE PP <sub>bi</sub> DI PROBABILITA' DI LIQUEFAZIONE (Facciorusso 2009)			GUIDIZIO DI PERICOLISITA'
senza correzione per strati sottili	con correzione per strati sottili	%	
<b>7</b>	<b>4</b>	PP <sub>bi</sub> <= 15	NON LIQUEFAZIONE QUASI CERTA
		15 < PP <sub>bi</sub> <= 35	LIQUEFAZIONE IMPROBABILE
		35 < PP <sub>bi</sub> <= 65	LIQUEFAZIONE E NON LIQUEFAZIONE UGUALMENTE PROBABILE
		65 < PP <sub>bi</sub> <= 85	LIQUEFAZIONE MOLTO PROBABILE
		PP <sub>bi</sub> > 85	LIQUEFAZIONE QUASI CERTA