



Codice: 019 /2021

Data: gennaio 2022

Revisione n°:

Data:

Il presente elaborato tecnico deve essere ritenuto valido esclusivamente per le opere descritte; questo Studio di Geologia non è responsabile di altre opere o interventi non strettamente collegati a quanto in oggetto.



Provincia di Forlì Cesena

COMUNE DI FORLÌ



Committente:



ACER FC
V.le G.Matteotti, 44
47122 Forlì

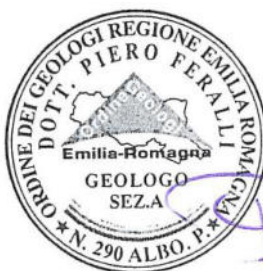
Progetto:

Costruzione di nuovo fabbricato da 28 alloggi, area ex Autoparco, Via Autoparco, a Forlì.

RELAZIONE GEOLOGICA

Il geologo:

dott. Piero Feralli



INDICE

1. PREMESSA	2
1.1 Scopi del documento.....	2
1.2 Norme di riferimento.....	3
1.3 Allegati.....	3
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E VINCOLI LOCALI.....	4
2.1 Localizzazione e inquadramento cartografico	4
2.2 Programmazione territoriale	5
3. MODELLO GEOLOGICO.	8
3.1 Inquadramento geologico.....	8
3.2 Caratteri stratigrafici locali	10
3.3 Morfologia.....	11
3.4 Idrogeologia.....	11
3.5 Tettonica e Sismica	13
3.6 Subsidenza	18
4. MODELLO SISMICO	19
4.1 Categoria di suolo di fondazione	19
4.2 Microzonazione sismica	21
4.3 Azioni sismiche.....	22
5. MODELLO GEOTECNICO	26
5.1 Premessa	26
5.2 Determinazione dei parametri caratteristici.....	26
5.3 Coefficiente di reazione del terreno.....	30
5.4 Altezza critica degli scavi.....	30
5.5 Spinta delle terre.....	32
5.6 Liquefazione per effetto sismico	32
5.7 Stima della Q lim.	41
6. CONCLUSIONI.....	43
ALLEGATO 1 - "ELABORATI CARTOGRAFICI".....	44
ALLEGATO 2 - "PROVE GEOGNOSTICHE"	51



Provincia di Forlì Cesena
COMUNE DI FORLÌ

Costruzione di nuovo fabbricato da 28 alloggi, area ex Autoparco, Via Autoparco, a Forlì.

1. PREMESSA

Questo Studio di Geologia è stato incaricato di effettuare una indagine geologica e geofisica e della redazione del presente documento relativo al progetto di costruzione di un nuovo edificio residenziale pubblico, ubicato nell'area ex Autoparco, in Via Autoparco a Forlì.

Il progetto prevede la costruzione di un nuovo edificio ad uso residenziale, di edilizia pubblica, con 28 alloggi, di forma rettangolare, dimensione di metri 52,0 x 22,30 con quattro piani fuori terra e piano interrato per ricovero autoveicoli.

1.1 Scopi del documento.

Il presente documento ha lo scopo di caratterizzare l'area dal punto di vista geologico, geomorfologico e idrogeologico e di individuare i principali parametri meccanici e sismici dei terreni, tenendo conto dei contenuti del D. M. 17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" e della successiva Circolare Esplicativa del 17.07.2018 "Istruzioni sulle NTC 2018".

Nel corso dell'indagine saranno esaminati:

- a) l'inquadramento geologico generale, gli aspetti morfologici, la litologia del sottosuolo, il sistema idrologico ed idrogeologico, i caratteri sismici e la stabilità dei luoghi;
- b) i parametri geomeccanici e sismici del terreno;
- c) la categoria sismica del suolo.
- d) valutazione preliminare della pressione ammissibile;
- e) valutazione della dipensione alla liquefazione con sisma.

La campagna di indagini, effettuata allo scopo, ha compreso:

- studio della documentazione esistente, relativa all'area in oggetto e della bibliografia classica, comprendente anche precedenti indagini eseguite su aree circostanti.
- analisi della documentazione di programmazione locali (PTCP, PSC, POC, RUE).
- analisi di indagini geognostiche eseguite in passato sull'area adiacente dove è stato già realizzato un edificio comparabile per dimensioni e tipologia.
- ricognizione sul campo dello stato attuale.
- esecuzione di una indagine geognostica comprendente n. 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTe, spinte fino alla profondità di rifiuto dell'avanzamento. Le prove sono state eseguite mediante penetrometro statico dotato di spinta verticale di 200 KNw e attrezzato con punta ad acquisizione elettrica che dispone di una punta conica con apertura di 60° e manicotto laterale con una superficie di 150 cmq. Le aste cave che compongono la batteria di perforazione, con diametro di 36 mm., sono dotate di anello allargatore per diminuire l'attrito laterale che il terreno può esercitare in particolare in presenza di terreni maggiormente argillosi. E' stata utilizzata una velocità di infissione non superiore a 2 cm/secondo. Nel corso della prova viene rilevata, in continuo, la resistenza alla penetrazione di punta e il valore dell'attrito laterale sul manicotto. La documentazione, vedi Allegato 2 al presente documento, consiste nella resa su grafico dei seguenti parametri:



- la progressione della resistenza alla penetrazione della punta Q_t in MPa;
 - l'attrito sul manicotto laterale R_f in %;
 - la pressione nei pori in kPa;
 - l'indice di comportamento del suolo;
 - il tipo di comportamento del suolo.
- esecuzione di una indagine geofisica con metodologia MASW
 - esecuzione di una indagine geoelettrica mediante lo stendimento di 7 linee di tomografia elettrica
 - elaborazione delle risultanze delle indagini.

1.2 Norme di riferimento.

La presente relazione è stata realizzata nel rispetto delle disposizioni contenute nelle normative di riferimento di seguito elencate:

- Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione – D.M. 11 Marzo 1988 - Circ. Min. LL.PP. n.30483, 24 settembre 1988;
- Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normativa tecnica per le costruzioni in zona sismica – O.P.C.M. n° 3274 del 20 marzo 2003 e successive modifiche;
- Norme tecniche per le costruzioni – D.M. 17 gennaio 2018 (G.U. del 20/02/2018 supplemento ordinario n.42 - Circolare Cons. Sup. LL.PP. del 17/07/2018 “ Istruzione sulle Norme Tecniche per la Costruzione di cui al D.M. 17 gennaio 2018;
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n° 360 del 29 aprile 2019 “Atto di coordinamento tecnico, sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49 L.R. n. 24/2017)”.

E inoltre, in base a quanto consigliato da:

- AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche giugno 1977;
- AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio, maggio 1990;
- Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, settembre 1988 ed EC8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica;
- ISRM International Society for Rock Mechanics: Rock characterization testing, monitoring suggested methods- Commission on Testing Methods; 1981.

1.3 Allegati.

Alla presente Relazione Geologica sono allegate le seguenti documentazioni:

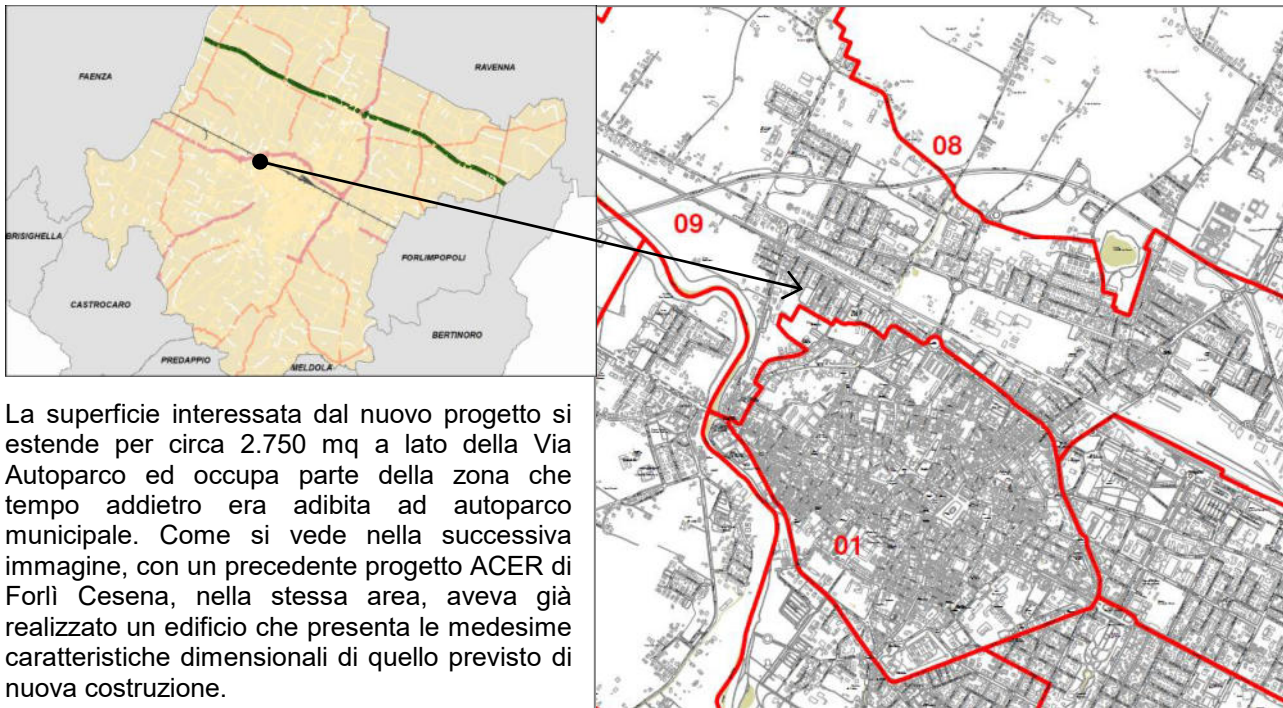
- Allegato 1 - “ELABORATI CARTOGRAFICI”, comprendente:
 - a) stralcio dalla Carta Topografica Regionale, in scala 1:25.000 (TAVOLA 1);
 - b) stralcio dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 (TAVOLA 2);
 - c) stralcio della mappa catastale del Comune di Forlì in scala 1:2.000 (TAVOLA 3);
 - d) carta geologica di inquadramento in scala 1:10.000 (TAVOLA 4);
 - e) planimetria con ubicazione delle prove prese a riferimento (TAVOLA 5).
- Allegato 2 - “INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE”, comprendente:
 - f) risultanze delle prove penetrometriche
 - g) relazione specialistica sulle prove geofisiche e geoelettriche.



2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E VINCOLI LOCALI

2.1 Localizzazione e inquadramento cartografico

L'area oggetto del presente studio è ubicata nella zona nord ovest della città, al margine esterno del centro storico e ricade nel quartiere 09 "Foro Boario e San Benedetto", come indicato nello stralcio cartografico della mappa delle vie e dei quartieri del Comune di Forlì.



La superficie interessata dal nuovo progetto si estende per circa 2.750 mq a lato della Via Autoparco ed occupa parte della zona che tempo addietro era adibita ad autoparco municipale. Come si vede nella successiva immagine, con un precedente progetto ACER di Forlì Cesena, nella stessa area, aveva già realizzato un edificio che presenta le medesime caratteristiche dimensionali di quello previsto di nuova costruzione.



Dal punto di vista cartografico sono interessati:

- 1) la Tavola 240 S.O. "FORLÌ" della Cartografia Topografica Regionale in scala 1:25.000;
- 2) l'Elemento 240134 "Forlì nord ovest" della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000;
- 3) la mappa catastale del Comune di Forlì, Foglio 143 Particella 1297.

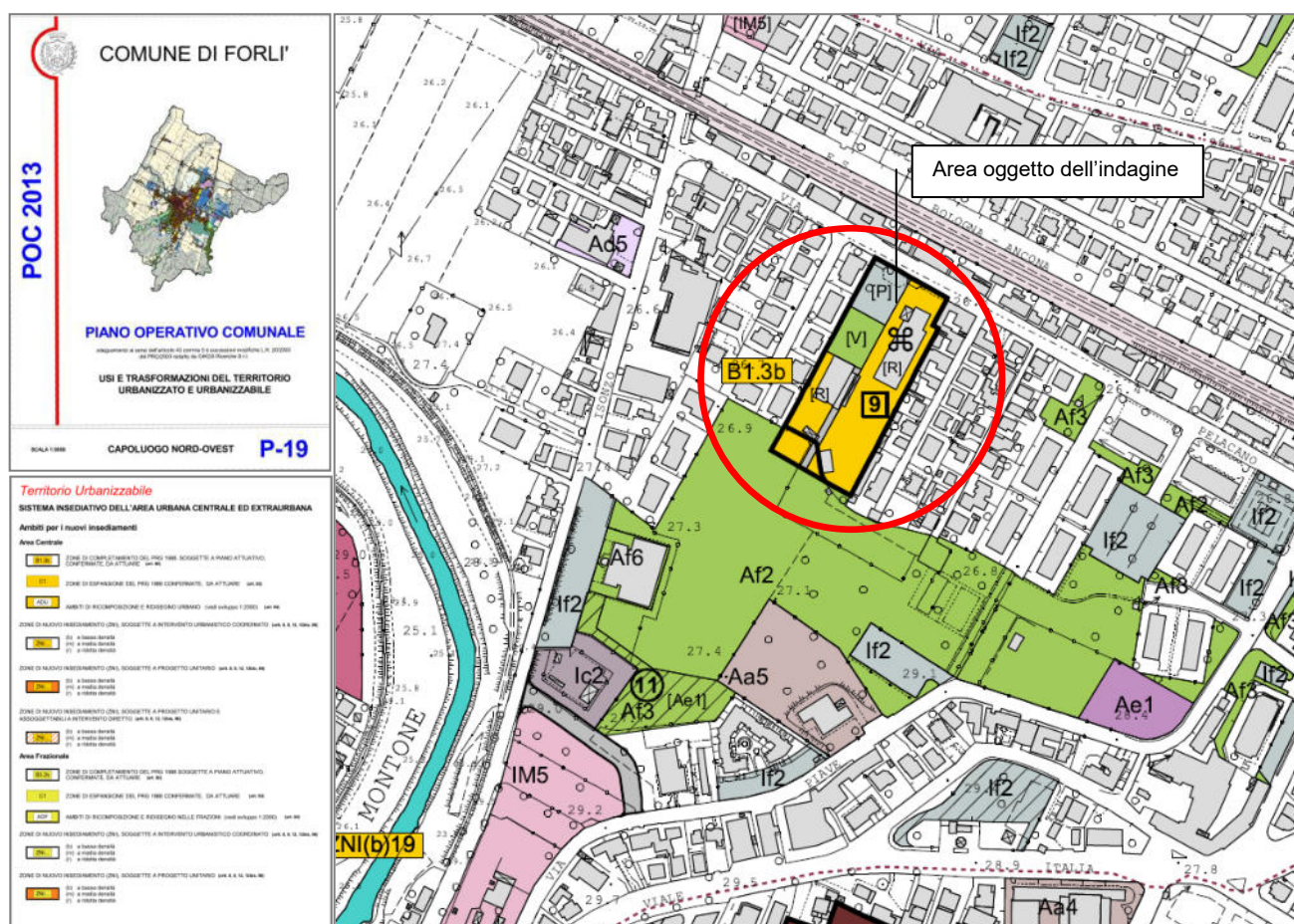
2.2 Programmazione territoriale

Vincolo idrogeologico

L'area interessata non rientra nella perimetrazione delle zone da sottoporre alle norme di tutela del vincolo idrogeologico ai sensi del R.D.L. n. 3267 del 30/12/1923 "Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani", del R.D. n. 1126 del 16/05/1926 "Approvazione del regolamento per l'applicazione del R.D.L. n. 3267 del 30/12/1923 e della Deliberazione di G.R. Emilia-Romagna n.1117 del 11/07/2000 "Direttiva Regionale concernente le procedure amministrative e le norme tecniche relative alla gestione del Vincolo Idrogeologico", ai sensi e in attuazione degli artt. 148,149,150,151 della L.R. 21/04/1999 n.3.

PSC – POC - RUE

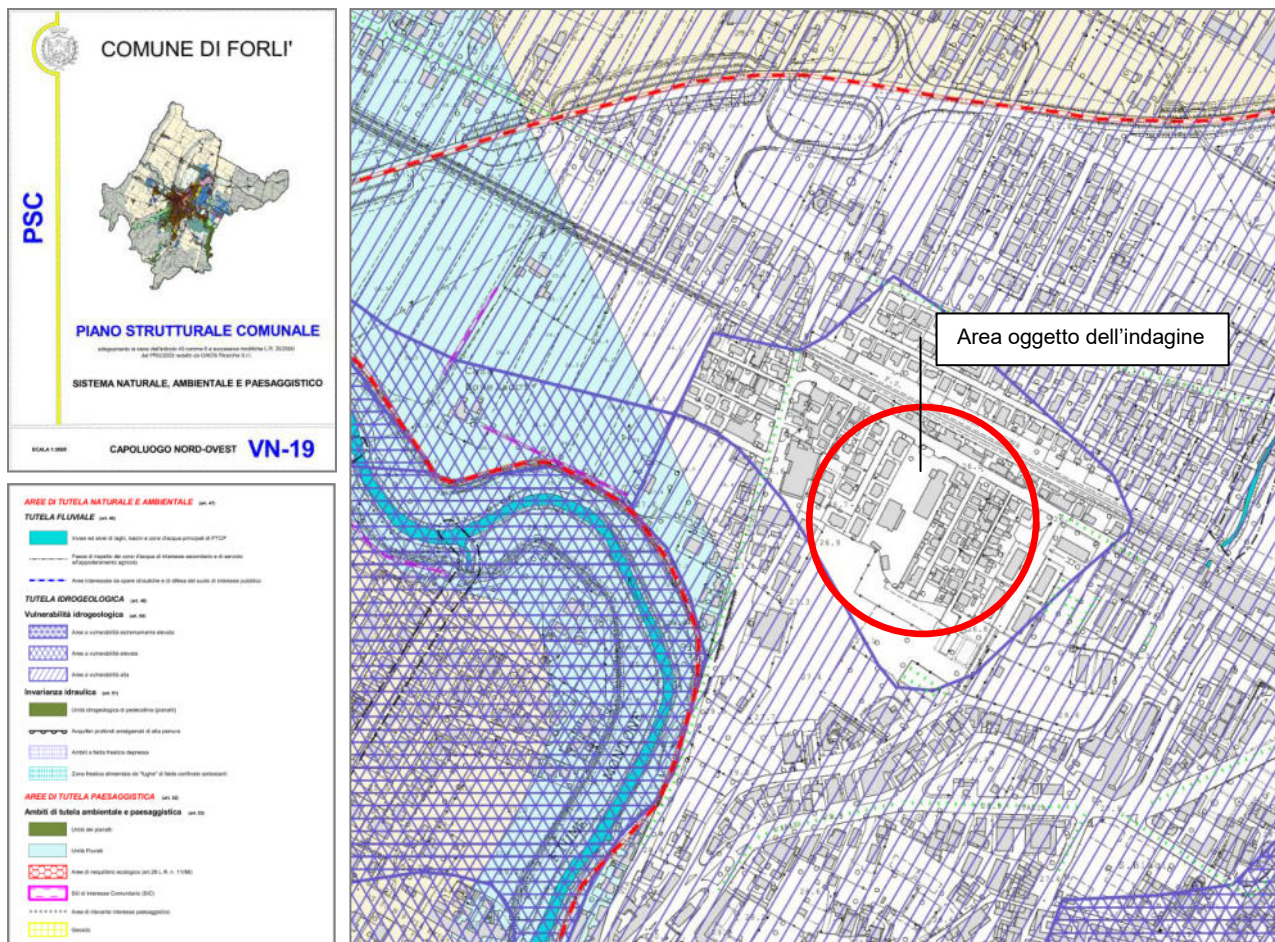
In relazione alla programmazione territoriale del Comune di Forlì, il sito è compreso nel Sistema Insediativo dell'Area Urbana Centrale, come Ambito per i nuovi insediamenti – "Zona di completamento del PRG 1988, soggetta a piano attuativo, confermata, da attuare (art. 90)", come si vede dallo stralcio della Tavola P-19 "Capoluogo Nord-Ovest" del POC, che si allega di seguito.



Sono state esaminate le previsioni di tutela contenute nel Piano Strutturale del Comune di Forlì.

Nella tavola VN 19 "Capoluogo nord-ovest" del PSC "Sistema naturale, Ambientale e Paesaggistico", di cui si allega, di seguito uno stralcio, l'area oggetto di studio, non rientra nelle fasce di territorio classificate come aree oggetto di vulnerabilità idrogeologica (art. 50 delle NTA).





Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli

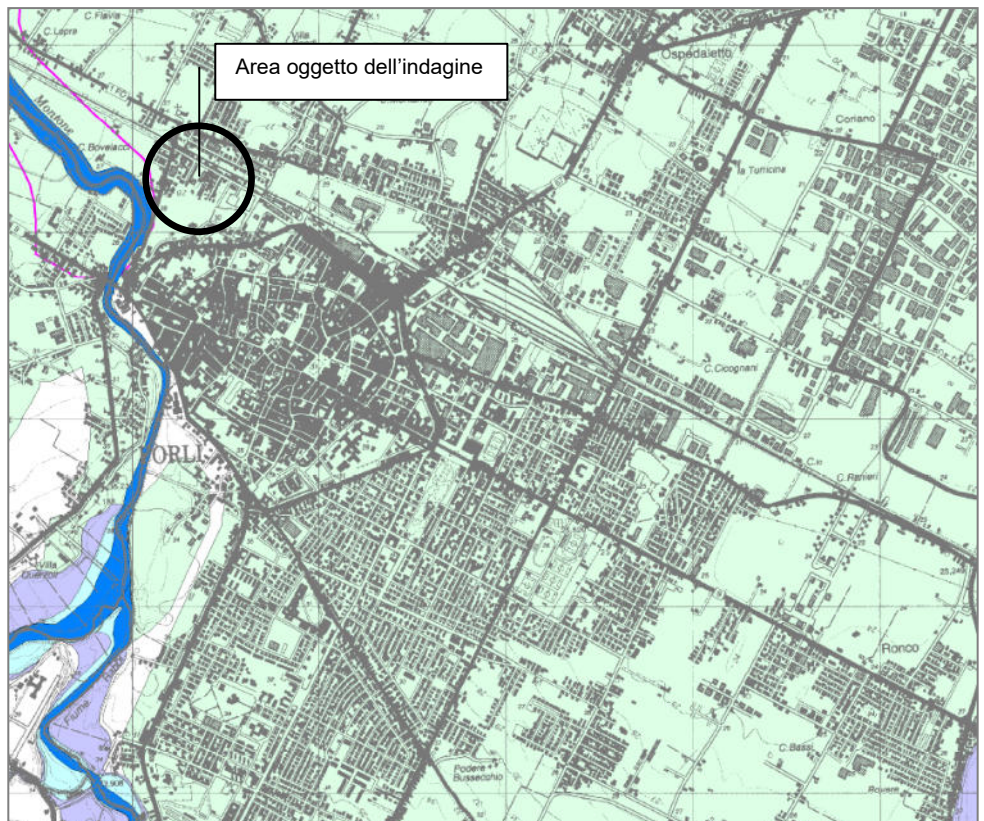
Il 17 febbraio 2017, con la pubblicazione nella G.U.R.I. n. 27 del 2/02/2017, è entrato in vigore il D.M. 25/10/2016 che sopprime le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali; l'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli confluisce pertanto nell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po.

Gli atti di pianificazione in vigore sono costituiti fondamentalmente dal "Piano Stralcio Rischio Idrogeologico" e dalla "Direttiva per la sicurezza idraulica" ad esso collegata e dalle successive varianti agli stessi.

E' stata verificata la conformità dell'opera in progetto alle disposizioni e conseguenti limitazioni d'uso del suolo, disposte dal Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, approvato con Delibera di G. R. n° 350 del 17/03/2003 e successivo progetto di "Variante di coordinamento tra il Piano di Gestione del Rischio di alluvioni e il Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico" adottato dal Comitato Istituzionale con delibera n. 2/2 del 7 novembre 2016.

Come si evince dalla figura, tratta dalla Tavola 240 NO – 240 SO "Perimetrazioni delle aree a rischio idrogeologico", l'area oggetto d'indagine ricade in una fascia di territorio definita "Area di potenziale allagamento", come da Art. 6 delle N.T.A.

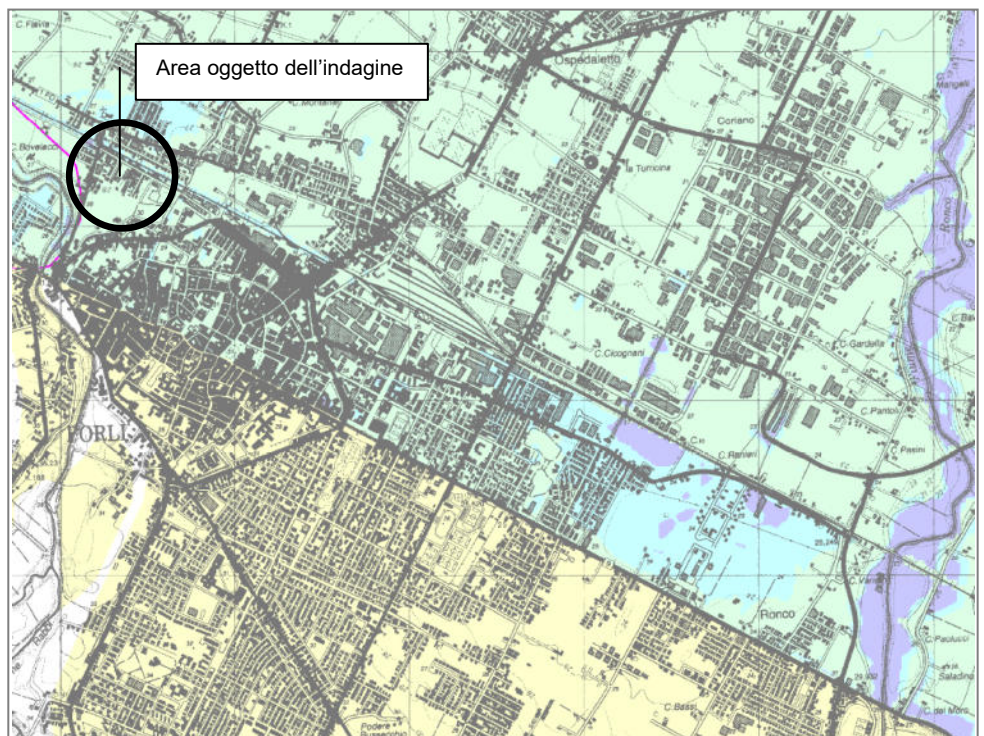




Il comma 4 del citato articolo 6 riporta:

...."4. L'Autorità di Bacino definisce con la "Direttiva per le verifiche e il conseguimento degli obiettivi di sicurezza idraulica", approvata con Delibera Comitato Istituzionale n. 3/2 del 20/10/2003, i tiranti idrici di riferimento e fornisce indicazioni riguardo agli accorgimenti tecnico-costruttivi e ai diversi gradi di cautela da adottare in funzione dei tiranti idrici di riferimento.".....

Nel successivo stralcio cartografico, tratto dall'Allegato 6 - Tavola 240 NO – 240 SO "Tiranti idrici di riferimento per le aree di pianura sottoposte a rischio di allagamento (art. 6)", viene indicato il tirante idrico di riferimento per l'area in oggetto, che risulta fino a 50 cm.



3. MODELLO GEOLOGICO.

Si fa riferimento ai seguenti documenti bibliografici:

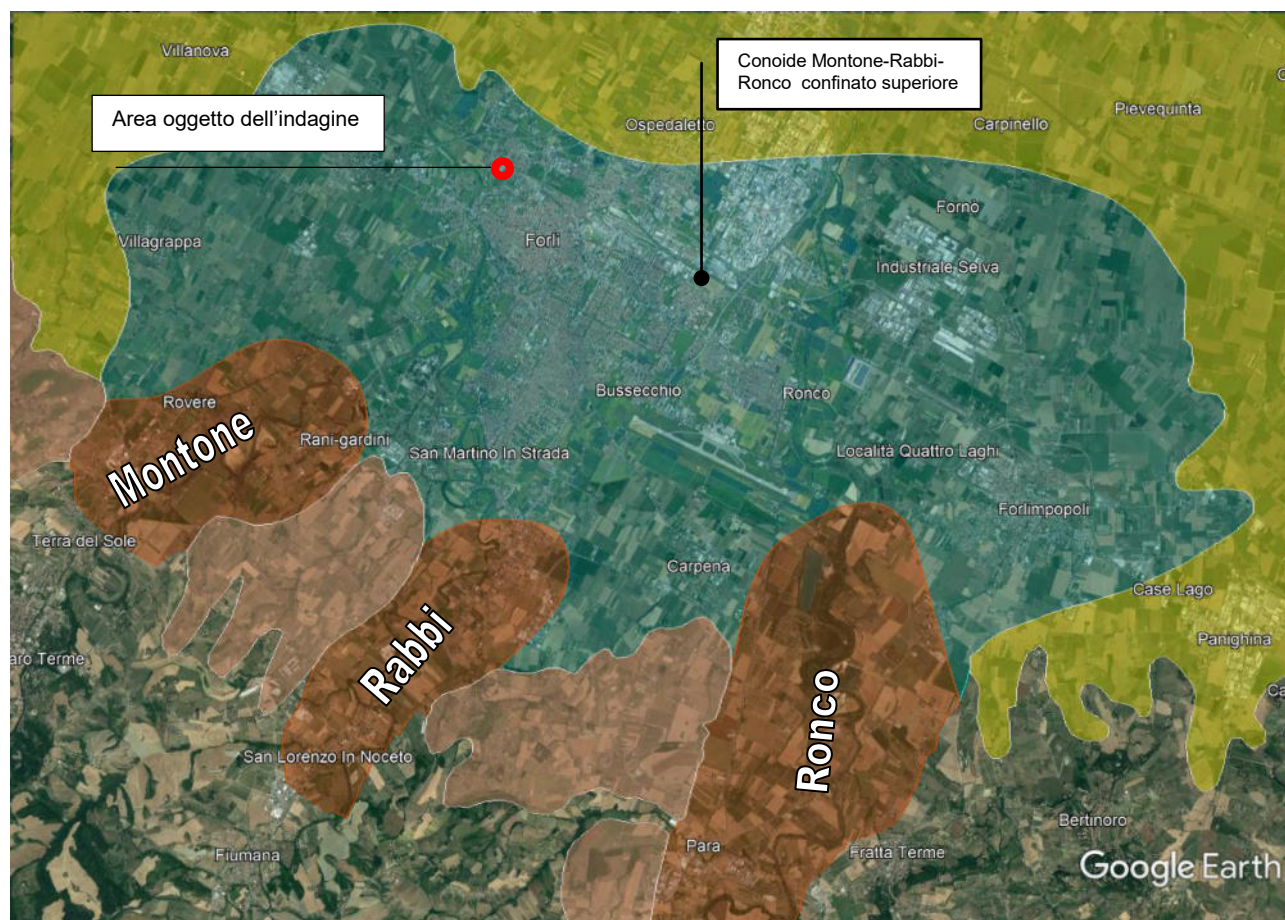
- Foglio 100 della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000;
- Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna in scala 1.250.000;
- Carta Geologica d'Italia Progetto CARG - R.E.R, F. 240 – 241 in scala 1:50.000;
- Sezione 240130 "Forlì" della Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000;
- Studio di settore riguardante la componente geologica ed idrogeologica nella pianificazione comunale di Viel, Frassinetti e Calò, realizzato in occasione della Variante al P.R.G. di Forlì;
- Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna – R.E.R., ENI AGIP, 1998.

3.1 Inquadramento geologico.

L'area ricade in quella parte di territorio comunale posta a sud del tracciato della S.S. 9 "Emilia", poco a monte del confine che segna il passaggio tra i depositi alluvionali Pleistocenici della parte alta della pianura che ricoprono i conoidi e quelli Olocenici, sabbioso argillosi, della parte più bassa della pianura degradante verso la linea costiera.

In genere la litologia di superficie, entro i primi metri di profondità (fino a circa 20 m., massimo 25 m.), è costituita da depositi alluvionali del Pleistocene superiore che si presentano come fitte alternanze lentiformi di argille e limi mescolati disordinatamente con materiale vario sabbioso - limoso alterato; la parte più alta è per lo più costituita da un mantello argilloso impuro.

Intercalati a questi depositi coesivi-incoerenti si ritrovano livelli ghiaiosi correlabili con i cicli deposizionali di materiale alluvionale negli ambienti di conoide dei fiumi Ronco, Rabbi e Montone; lo spessore di tali depositi, organizzati in sequenze alternate di prevalenti sedimenti fini limo argillosi e grossolani ghiaioso sabbiosi sempre subordinati, varia tra 250 e 280 metri. Nella successiva immagine si vede che l'area in oggetto è ubicata nella zona centrale del conoide Montone – Rabbi – Ronco, confinato superiormente.



Facendo riferimento alla classificazione della carta geologica regionale i depositi alluvionali della pianura sono definiti come appartenenti al SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE (AES), definito come:



“Unità costituita da depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, di conoide alluvionale ghiaiosa e di interconoide, passanti lateralmente a limi più o meno sabbiosi e argillosi di piana alluvionale. In affioramento comprende anche depositi litorali e marini. L'unità è suddivisa in subsinterni, sulla base dell'individuazione di deboli discordanze angolari o di scarpate erosive particolarmente ampie, e, nel sottosuolo della pianura, di bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino-marginali e palustri su depositi di conoide e di piana alluvionale. Nel sottosuolo della pianura l'unità è costituita dall'alternanza di cicli trasgressivo-regressivi di depositi grossolani e fini, di ambiente alluvionale e subordinatamente di ambiente deltizio e litorale, nelle porzioni sommitali dei quali frequentemente si intercalano suoli. Il contatto di base è erosivo e discordante sul Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (in aree limitrofe) e sui depositi marini miopliocenici. Lo spessore massimo in pianura è di un centinaio di metri circa, quello nel sottosuolo circa 200 m.. (Pleistocene Medio - Olocene)”

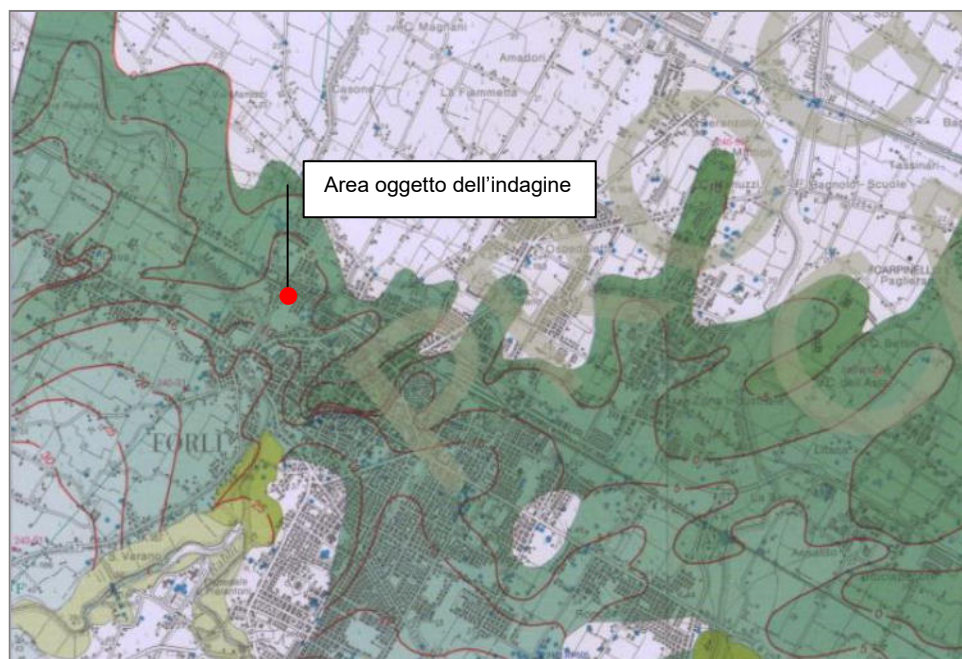
Nel dettaglio, come è illustrato anche nella Cartografia geologica (Tavola 4), la porzione di territorio comunale su cui insiste l'area in oggetto è caratterizzata da depositi alluvionali correlabili con i depositi classificati come “AES 8a - Unità di Modena” dalla cartografia geologica regionale; tali terreni appartengono al SUBSINTEMA DI RAVENNA (AES 8) e sono caratterizzati, per l'area di Forlì-Cesena, da:

“Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositati alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoide e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (meno di 100 cm). Può ricoprire resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Limite inferiore inconforme, marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonatato a parzialmente carbonatato contenente resti archeologici di età dal Neolitico al Romano. Lo spessore massimo dell'unità è generalmente di alcuni metri, talora plurimetrico. (Olocene)”

Le formazioni Pleistoceniche si spingono molto verso monte fino a sovrapporsi con il Pliocene subappenninico. I depositi, di spessori notevoli, formano altipiani subappenninici dolcemente inclinati verso la pianura; altipiani che già formavano verso la fine del Pliocene una fascia subappenninica incisa, in seguito, dai corsi d'acqua dell'Olocene in modo tale da assumere la caratteristica forma attuale, digitata e a lembi isolati verso monte ed espansa verso la pianura. Il colore caratteristico di tali terreni, tendente da giallo rossiccio fino al nocciola, è dato dalla comune ferrettizzazione per alterazione chimico fisica.

Relativamente ai Sistemi deposizionali e litologie, la Carta Geologica di Sottosuolo d'Italia. – Progetto CARG - R.E.R, F. 240 – 241 in scala 1:50.000, indica per questa porzione di territorio, Depositati alluvionali – Conoide e piana alluvionale - Alternanze di sabbie, limi e argille di tracimazione fluviale indifferenziata definite così: “Alternanze di sabbie fini e finissime, limi ed argille in strati da molto sottili a spessi. Depositati di tracimazione fluviale non differenziati a causa dei processi di erosione, bioturbazione e pedogenesi, che hanno modificato le tessiture e le forme originarie e non hanno consentito di distinguere i depositi di argine da quelli di piana inondabile.”

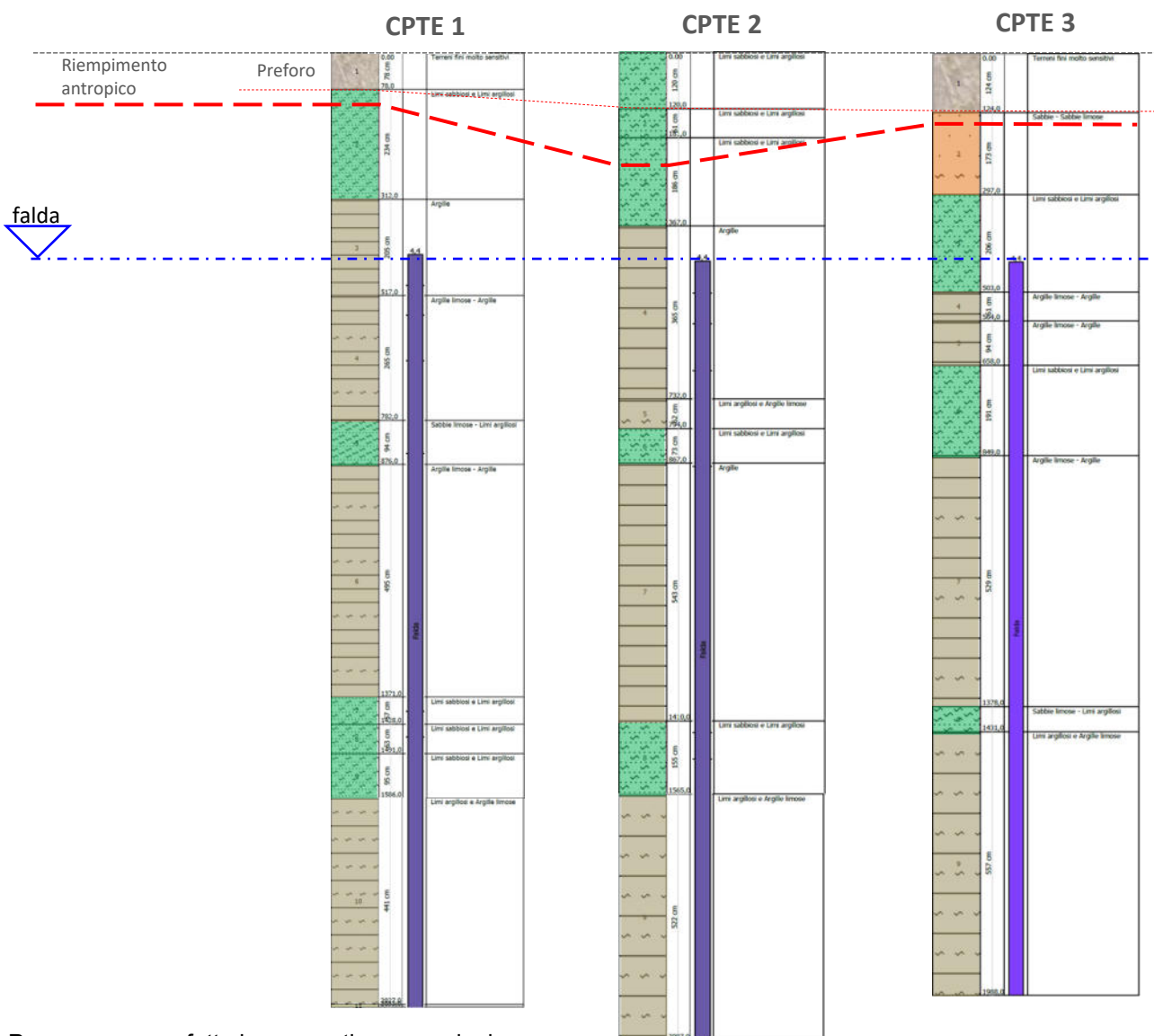
Dall'allegato alla Carta Geologica d'Italia “Tetto delle ghiaie alluvionali e depositi deltizi e litorali”, di cui se ne propone stralcio a scala libera, si rileva che l'area in questione ricade in una zona compresa tra le isobate del tetto delle ghiaie di 5,0 e 10,0 metri s.l.m.; quindi data una quota del piano di campagna di circa 26,0-27,0 m. s.l.m. risulta una soggiacenza del tetto delle ghiaie tra 16,0 e 22,0 m. dal piano di campagna. Questo dato trova conferma nei risultati delle prove penetrometriche che infatti si sono fermate al tetto delle ghiaie tra 20,0 m. (prova CPTE 3) e 20,8 m. (prova CPTE 2) di profondità dal piano di campagna.



3.2 Caratteri stratigrafici locali

Sulla base di quanto suggerito da Robertson (1986), relativamente alla interpretazione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica, è stata ricostruita la litologia del sottosuolo che viene schematizzata nelle successive colonne stratigrafiche in cui le diverse litologie sono state indicate con il seguente schema:

- Terreni tipicamente argillosi o argilloso limosi (coesivi)
- Terreni misti da limo argilloso a limoso sabbiosi (coesivi/incoerenti)
- Terreni sabbiosi o sabbioso limosi (prevalentemente incoerenti)



Possono essere fatte le seguenti osservazioni:

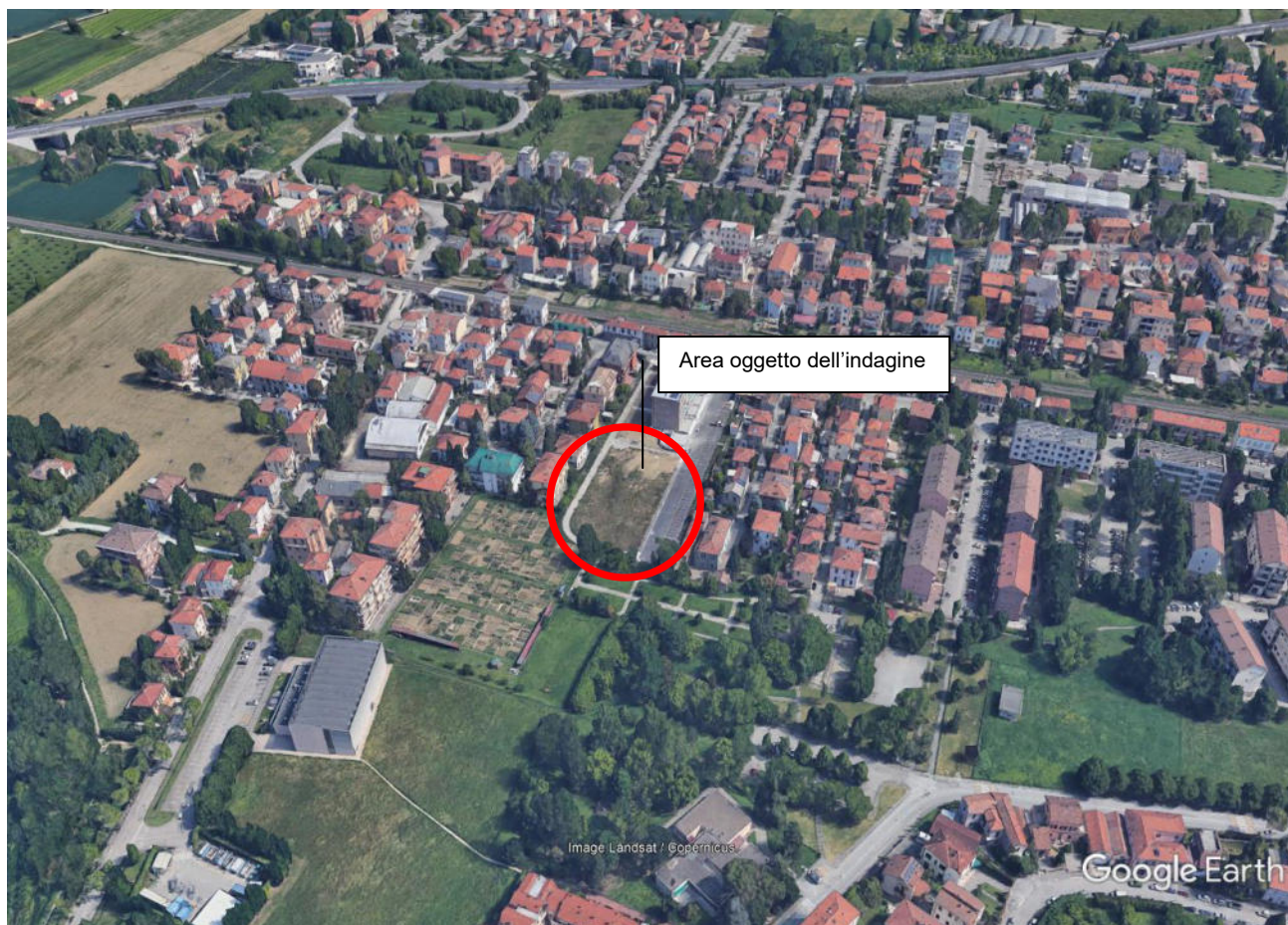
- Su tutti i punti prova, a causa di uno spessore di detrito antropico, macerie, materiali di riporto, di spessore variabile, è stato necessario realizzare un preforo tra 0,70 e 1,20 m. per permettere il passaggio della punta statica;
- Come viene messo in evidenza nella allegata relazione tecnica sulle prove geofisiche, gli stendimenti geoelettrici hanno rilevato la presenza di uno spessore di materiale di riempimento variabile da 1,50 m nelle prove CPTE 1 e 3 e di 2,5 metri nella prova CPTE 2, correlabile con passati riempimenti antropici.



- La litologia dei terreni in posto è caratterizzata da prevalenti argille e argille limose e subordinati livelli da limoso argillosi a limoso sabbiosi;
- Fino alla profondità di fine prova (circa 20 m. dal p.c.) non sono stati rilevati strati decisamente sabbiosi o sabbioso limosi, con comportamenti tipicamente incoerenti.
- La falda superficiale, misurata in un esistente piezometro, risulta alla profondità di metri 4,40 dal piano di campagna, alla data di novembre 2021.

3.3 Morfologia.

Come già detto il sito in oggetto è ubicato nella zona nord-ovest della città, in una porzione di territorio completamente pianeggiante e fittamente edificato. Come si vede nella successiva immagine panoramica, tratta dal sito di Google Earth, l'intensiva urbanizzazione ha totalmente cancellato ogni elemento naturale.



A livello territoriale e sulla base dei dati riportati nella cartografia tecnica regionale, si rileva che il territorio circostante presenta una quasi assoluta orizzontalità.

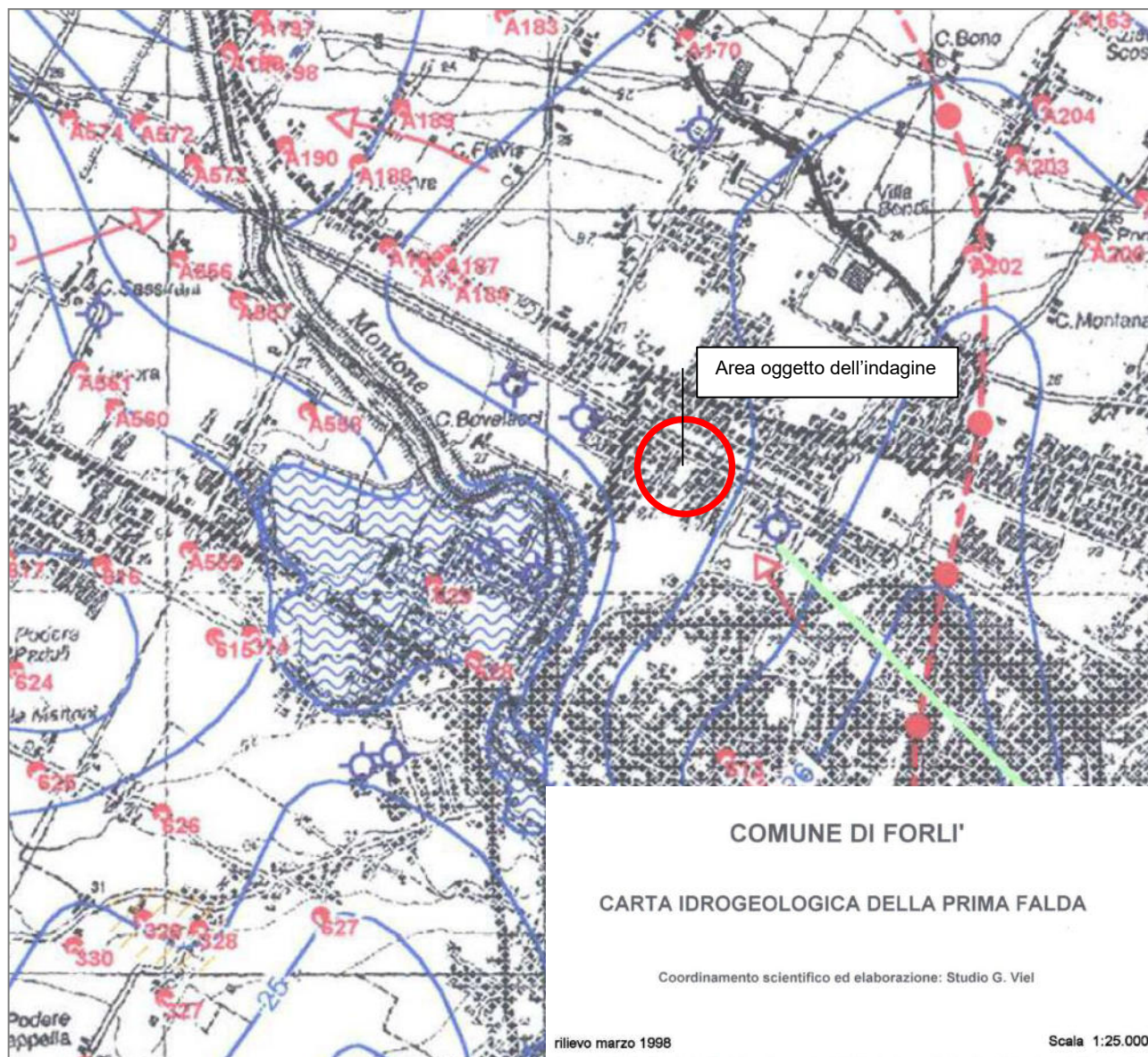
3.4 Idrogeologia

Questa parte di territorio comunale, rientra nella zona di interesse del Fiume Montone che scorre con direzione Sud – Nord a ovest dell'area, ad una distanza di circa 250 metri. L'alveo, arginato, è ribassato, rispetto al piano di campagna, di circa 6,0 – 7,0 metri; per la zona di interesse non risultano, storicamente, eventi di esondazione.

Relativamente alla situazione idrogeologica, con particolare riguardo alle acque della prima falda, si segnala che il rilievo eseguito dopo l'esecuzione delle prove penetrometriche ha evidenziato la presenza di falda alla profondità di 4,40 metri dal piano di campagna; si tratta comunque di un valore indicativo legato alla diversa permeabilità dei suoli superficiali della pianura, all'esistenza di strati ad elevata permeabilità, alla copertura/impermeabilizzazione esercitata dall'urbanizzazione soprastante ed alle importanti variazioni stagionali.



Facendo riferimento alla documentazione specifica, relativa al territorio comunale, illustrata nella successiva figura, stralciata dalla "Carta idrogeologica della prima falda" del Comune di Forlì, il sito in questione ricade nella fascia compresa tra le isofreatiche alla quota di 23,0 e 24,00 metri s.l.m. Tenendo conto che la quota del piano di campagna di circa 26,0 - 27,00 metri s.l.m., risulterebbe una soggiacenza di circa 3,0 / 4,0 metri dal piano campagna, che è coerente con quanto misurato in campagna.



LEGENDA

SIMBOLI GENERALI

- 180 Localizzazione dei pozzi freatici e relativo codice alfanumerico.
- 22 Curve isopiezometriche e relativa quota in metri s.l.m.
- ◊ Pozzi di prelievo idropotabile

FORMAZIONI IDROGEOLOGICHE

- Ricarica degli acquiferi profondi (Spungone e Lardiano).
- Formazione impermeabile delle Argille di Riolo Terme.

SISTEMA IDROGEOLOGICO DELLE ALLUVIONI RECENTI (Pleistocene)

- Limite di base del Sistema Idrogeologico.

UNITÀ IDROGEOLOGICA DI PEDECOLLINA (PIANALTI)

- Fronte di ricarica dell'acquifero superficiale (0 - 100m ?) di pianura.
- Zona idrogeologica di pedecollina dei terrazzi antichi.
- Limite idrogeologico tra acquiferi semiconfinati.

UNITÀ IDROGEOLOGICA DI FONDOVALLE

- Limite di fondo valle recente.
- Acquiferi di fondo valle.

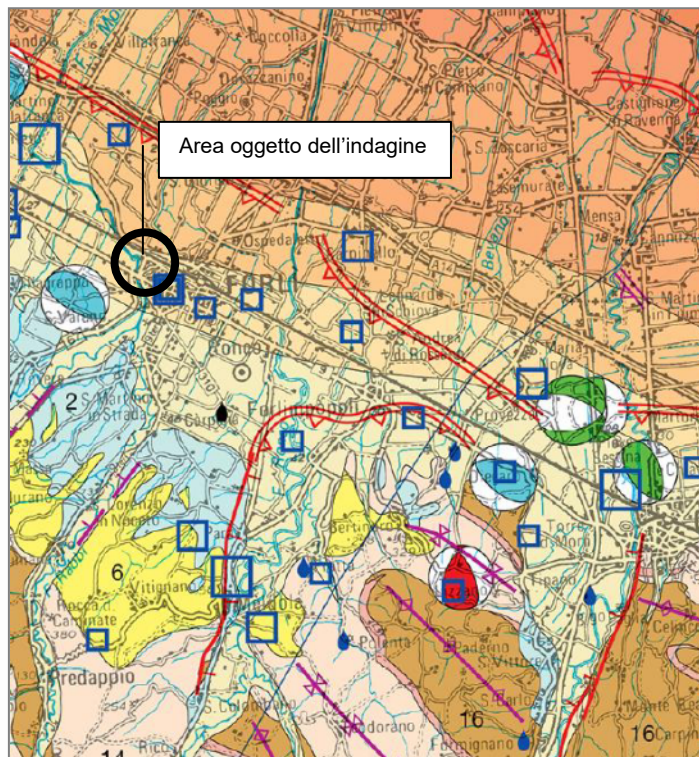
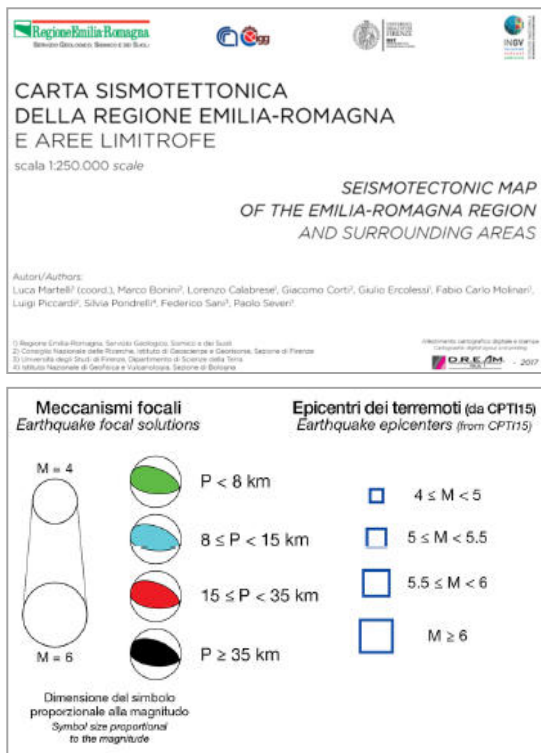
UNITÀ IDROGEOLOGICA DI PIANURA

- Acquiferi profondi amalgamati di Alta Pianura.
- Acquiferi superficiali (0 - 15 metri) della pianura.
- Ambito a falda freatica depressa.
- Limite idrogeologico tra acquiferi a diverse caratteristiche.
- +
- Zona freatica alimentata da "fughe" di falde confinate sottostanti.
- Spartiacque sotterranei.
- Deflusso della falda superficiale.
- Assi di drenaggio della falda superficiale.
- Limite della falda freatica in acquiferi amalgamati.
- Limite presunto della falda superficiale saliente.



3.5 Tettonica e Sismica.

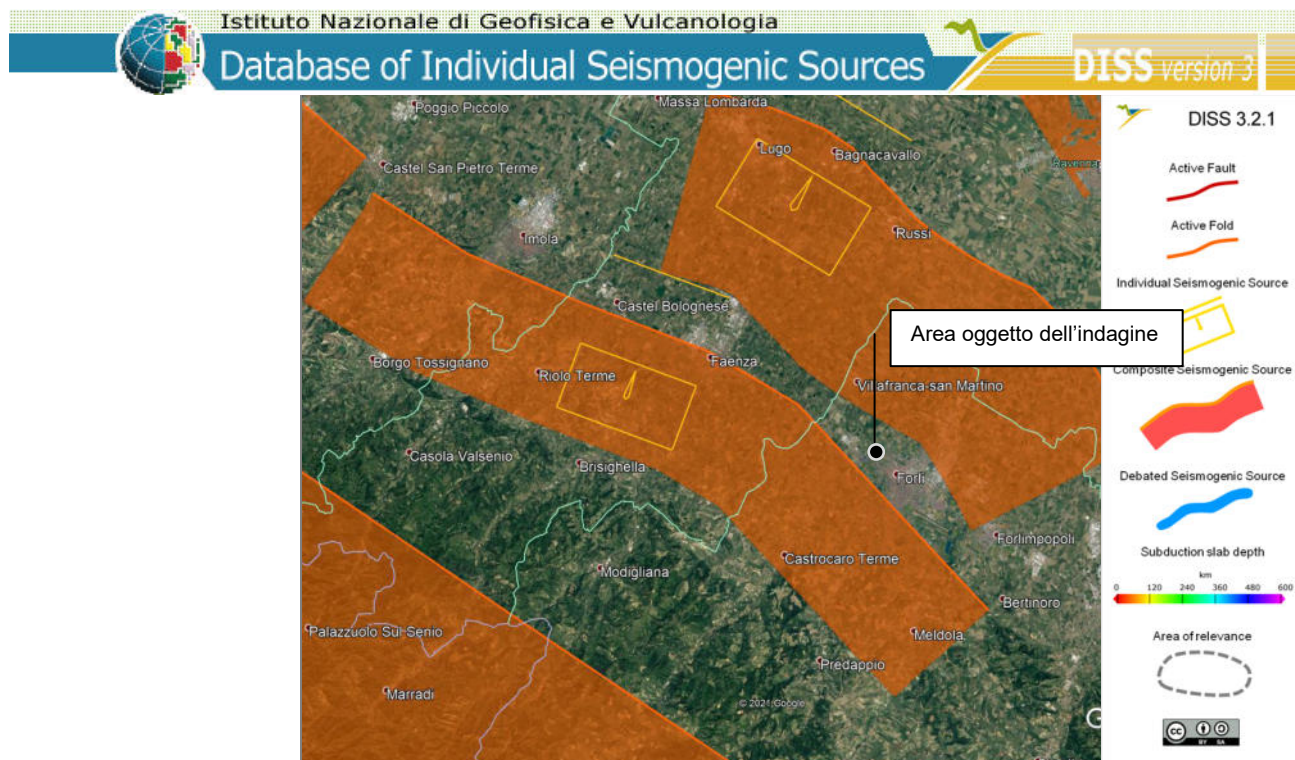
La Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, di cui si allega lo stralcio, non riporta elementi tettonici di qualche rilievo. Si deve segnalare la presenza di un asse di sinclinale a nord est, subparallelo all'asse della autostrada A14.







Il catalogo delle faglie capaci "ITHACA" (ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>), non riporta la presenza di faglie direttamente interessanti l'area in questione.



La sismicità del territorio s'inserisce nella sismicità complessiva dell'appennino settentrionale, caratterizzata da un regime tettonico compressivo da attribuire alla complessa evoluzione del margine di collisione tra Adriatico e Tirreno. Il Database of Individual Seismogenic Sources dell'INGV (*Gruppo di lavoro DISS (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Versione 3.2.1: Una raccolta di potenziali sorgenti di terremoti superiori a M 5.5 in Italia e nelle aree circostanti.* <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; doi: 10.6092 / INGV.IT-DISS3.2.1) evidenzia che il sito in questione ricade nella fascia intermedia tra due sorgenti sismogenetiche composite, di cui quella verso nord-est è denominata "Ascensione-Armaia" DISS-ID ITCS011 mentre quella a sud-ovest è denominata "Castel San Pietro Terme – Meldola" DISS-ID ITCS001; le cui caratteristiche salienti sono indicate nelle correlate tabelle.



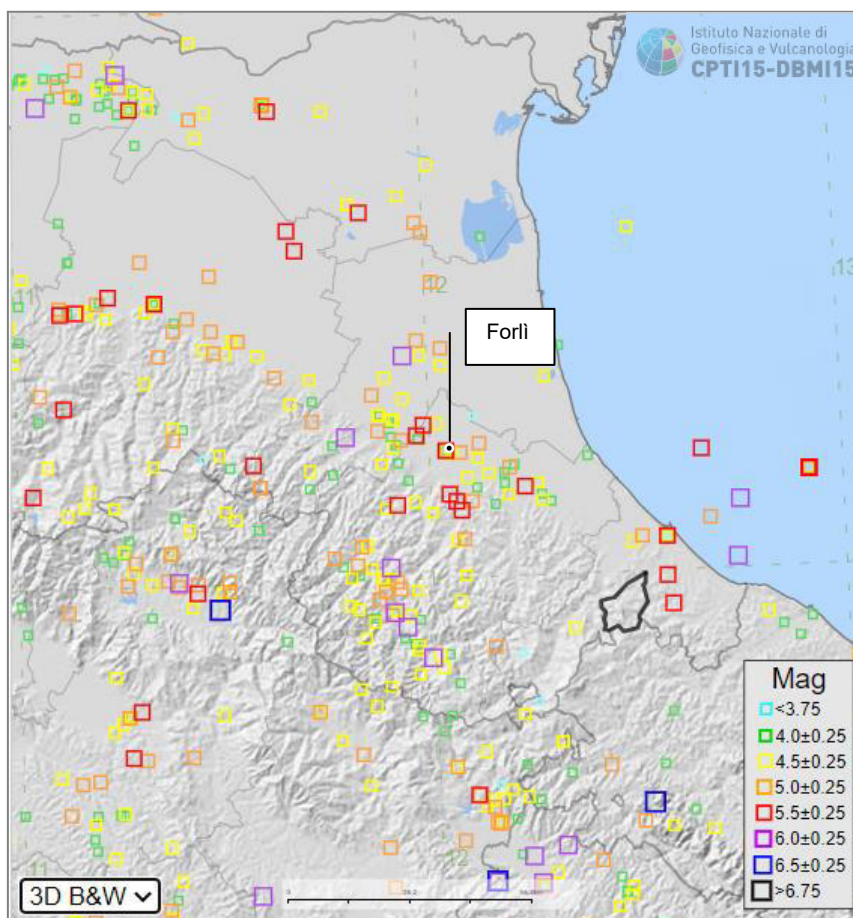
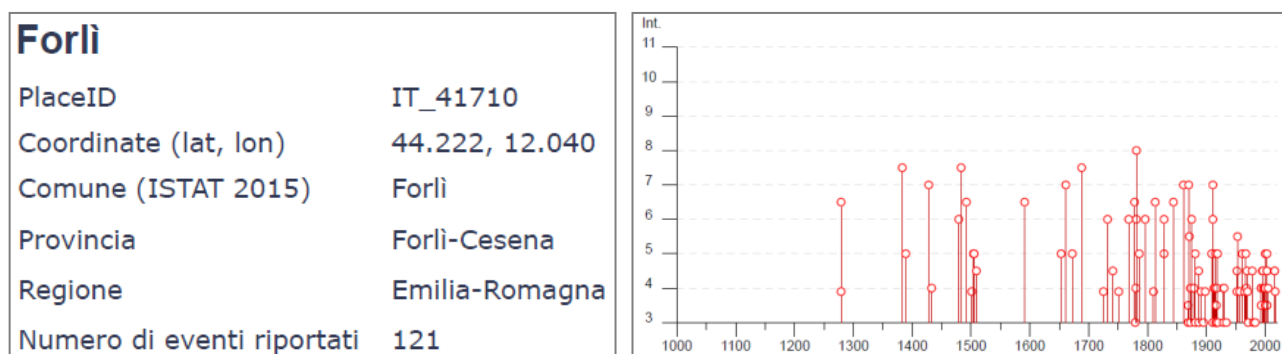
GENERAL INFORMATION			
DISS-ID	ITCS011		
Name	Ascensione-Armaia		
Compiler(s)	Burrato P.(1), Maesano F.E.(1)		
Contributor(s)	Burrato P.(1), Maesano F.E.(1), D'Ambrogio C.(2), Toscani G.(3), Basili R.(1)		
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy 2) Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale; Servizio Geologico d'Italia; Via Vitaliano Brancati, 48, 00144 Roma, Italy 3) Universit di Pavia; Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente; Via Ferrara, 1, 27100 Pavia, Italy		
Created	15-Nov-2013		
Updated	19-Jun-2015		
Display map ...	 		
Related sources	ITIS100		
PARAMETRIC INFORMATION			
PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
Min depth [km]	2.0	LD	Based on geological data from various Authors.
Max depth [km]	10.0	LD	Based on geological data from various Authors.
Strike [deg] min... max	110...140	LD	Based on geological data from various Authors.
Dip [deg] min... max	25...45	LD	Based on geological data from various Authors.
Rake [deg] min... max	80...100	EJ	Inferred from regional tectonic data.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.15...0.33	LD	Based on geological data from Maesano et al. (2015).
Max Magnitude [Mw]	6.0	EJ	Based on the strongest earthquake occurred in the region.

GENERAL INFORMATION			
DISS-ID	ITCS001		
Name	Castel San Pietro Terme-Meldola		
Compiler(s)	Burrato P.(1), Mariano S.(1)		
Contributor(s)	Burrato P.(1), Mariano S.(1), Basili R.(1)		
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy		
Created	08-Jan-2005		
Updated	25-Jun-2015		
Display map ...	 		
Related sources	ITIS093		
PARAMETRIC INFORMATION			
PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE	
Min depth [km]	2.0	OD	Based on geological data from various authors.
Max depth [km]	8.0	OD	Based on geological data from various authors.
Strike [deg] min... max	110... 140	LD	Based on geological data from various authors.
Dip [deg] min... max	30...40	LD	Based on geological data from various authors.
Rake [deg] min... max	80...100	LD	Based on geological data from various authors.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.24...0.63	EJ	Inferred from geological data on adjacent structures.
Max Magnitude [Mw]	5.8	OD	Derived from maximum magnitude of associated individual source(s).



La sismicità di origine tettonica che interessa la fascia pedeappenninica romagnola è decisamente elevata e storicamente si mette in risalto un incremento dell'attività da NO verso SE; peraltro si deve osservare che l'area forlivese rappresenta la porzione di territorio caratterizzata dal maggior numero di centri sismici sia a valle che a monte del "Sovrascorrimento" con eventi sismici significativi (VII - VIII grado della scala MCS) che hanno interessato tutti i principali centri urbani dislocati nei pressi di questa importante linea tettonica.

Il catalogo dei terremoti riporta per la porzione di pianura in questione svariati eventi, generalmente superficiali, compresi tra il 5° e 8° grado della scala MCS e numerosi altri di grado inferiore. Inoltre il territorio risente in modo marcato anche di eventi con zone epicentrali situate nelle immediate vicinanze dei relativi territori comunali. Nei successivi allegati grafici viene riportata la storia sismica del territorio comunale e l'ubicazione degli epicentri degli eventi storici tra l'anno 1000 ed il 2015, localizzati nel territorio provinciale (da DBMI15 - Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., Antonucci A., 2021. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)*, versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>. Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (2020). *The Italian earthquake catalogue CPTI15. Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(7), 2953-2984. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>).



Nella classificazione definita dai Decreti emessi fino al 1984 la sismicità è definita attraverso il "grado di sismicità" S. Nella proposta di riclassificazione del GdL del 1998 si utilizzano 3 categorie sismiche più una categoria di Comuni Non Classificati (NC). Nella **classificazione 2003** la sismicità è definita mediante quattro zone, numerate da 1 a 4.

La corrispondenza fra queste diverse definizioni è riportata nella tabella di seguito:

Ordinanza 3274	Decreti fino al 1984	GdL 1998	Classificazione 2003
1	S=12	prima categoria	zona 1
2	S=9	seconda categoria	zona 2
3	S=6	terza categoria	zona 3
4	non classificato	NC	zona 4

Secondo il provvedimento legislativo del 2003, aggiornato al luglio 2018, i comuni della Regione Emilia-Romagna sono classificati in 4 categorie principali, in base al loro rischio sismico, calcolato sia per frequenza che per intensità degli eventi.

- Zona 1: alta sismicità
- Zona 2: media sismicità
- Zona 3: bassa sismicità
- Zona 4: sismicità molto bassa

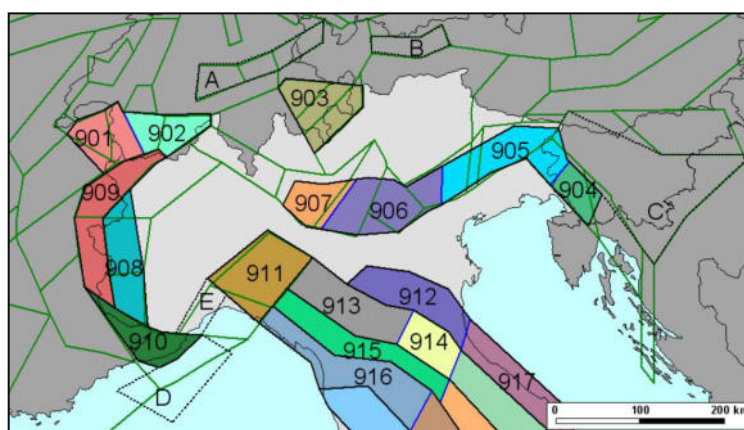
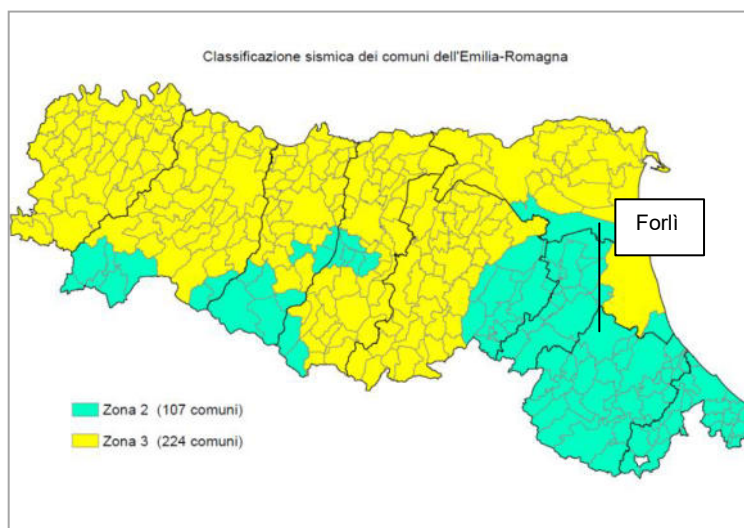
Relativamente alla provincia di Forlì, la classificazione sismica indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274/03 e successivi aggiornamenti fornisce la seguente classificazione: **Comune di Forlì: zona sismica 2 (media sismicità)**

Per la valutazioni di pericolosità sismica si fa riferimento alla zonazione sismogenetica ZS9 (INGV) che ha lo scopo di rappresentare il modello sismico – tettonico in base ai più recenti aggiornamenti degli studi relativi alla tettonica attiva del territorio.

L'area oggetto dello studio rientra nella zona identificata come 914, (complesso "Appennino settentrionale e centrale" zone sismogenetiche ZS che vanno dalla 911 alla 923). Ogni zonizzazione sismogenetica è caratterizzata da un definito modello cinematico il quale sfrutta una serie di relazioni di attenuazione stimate sulla base di misurazioni accelerometriche effettuate sia sul territorio nazionale che europeo. Sulla base di tali zone, per tutto il territorio italiano, sono state sviluppate le carte della pericolosità sismica.

Nella Zona Sismogenetica 914 sono previsti, sulla base dei meccanismi focali, valori di massima magnitudo pari a $M_{wmax} = 6,14$.

Facendo riferimento alla Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3519 del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone" ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s secondo lo schema riportato nella tabella.

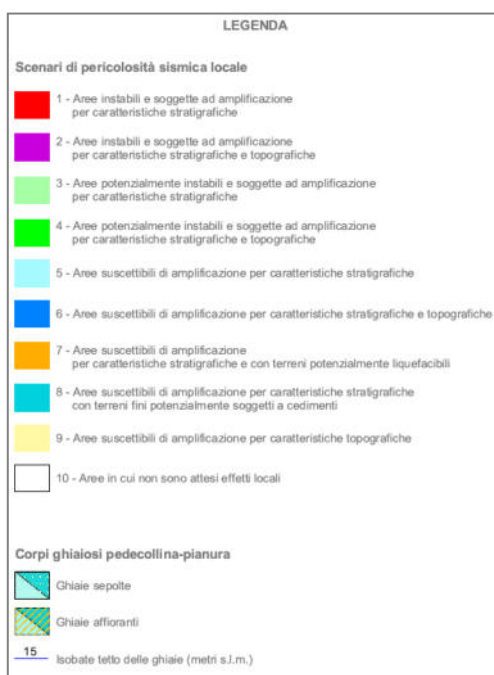
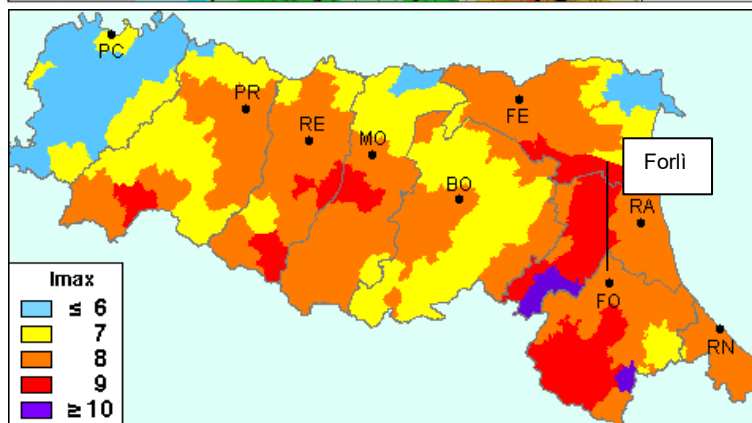
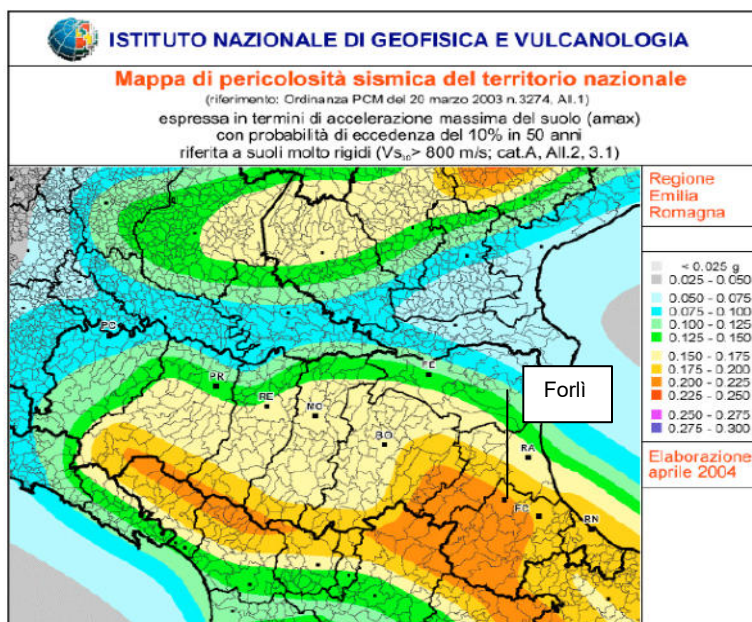


Zona	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g)	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (a_g)
1	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	$a_g \leq 0,05$ g	0,05 g

Nella figura, proposta a lato e tratta dal sito dell'I.N.G.V., sono indicati i valori di PGA calcolati nell'area regionale; per l'area in questione risulta una PGA compresa tra 0.200 e 0.225 g.

Sempre tratta dal sito dell'I.N.G.V. viene proposta anche la successiva figura che riporta la massima intensità macrosismica osservata nel territorio regionale. Relativamente al Comune di Forlì si evidenzia una I_{max} pari a 8.

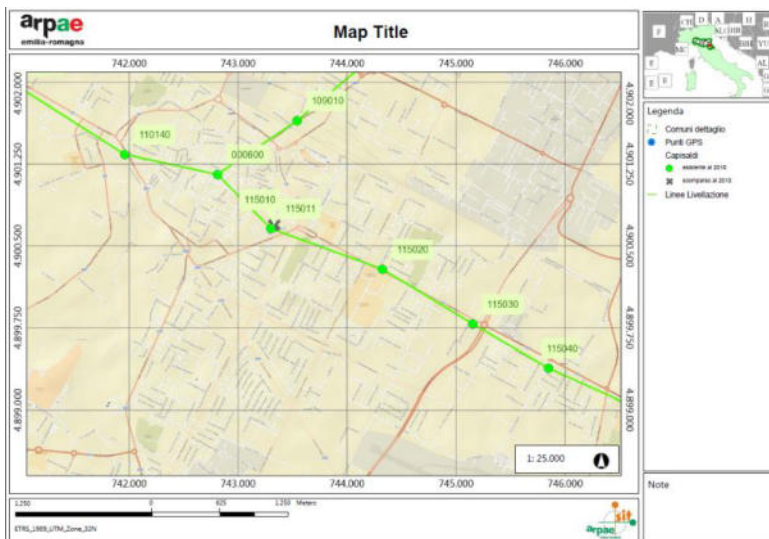
A completamento dell'argomento si riporta, di seguito, lo stralcio della Tavola 6 "Rischio sismico – Carta delle aree suscettibili di effetti locali" della Variante Integrativa del P.T.C.P. (tav. 240 SO), la relativa legenda e l'indicazione dell'ubicazione dell'area in oggetto; da questa cartografia si evince che la porzione di territorio interessata dallo studio viene caratterizzata come area suscettibile di amplificazione per caratteristiche stratigrafiche, con terreni fini potenzialmente soggetti a cedimento e con ghiaie sepolte.



3.6 Subsidenza.

La subsidenza è un fenomeno di abbassamento del suolo che può avere cause naturali, legate a processi geologici, e cause artificiali o antropiche legate alle azioni dell'uomo; nella pianura romagnola è dovuto prevalentemente a cause antropiche, legate ad elevate estrazioni di fluidi dal sottosuolo, ampiamente praticate nelle ultime decine di anni.

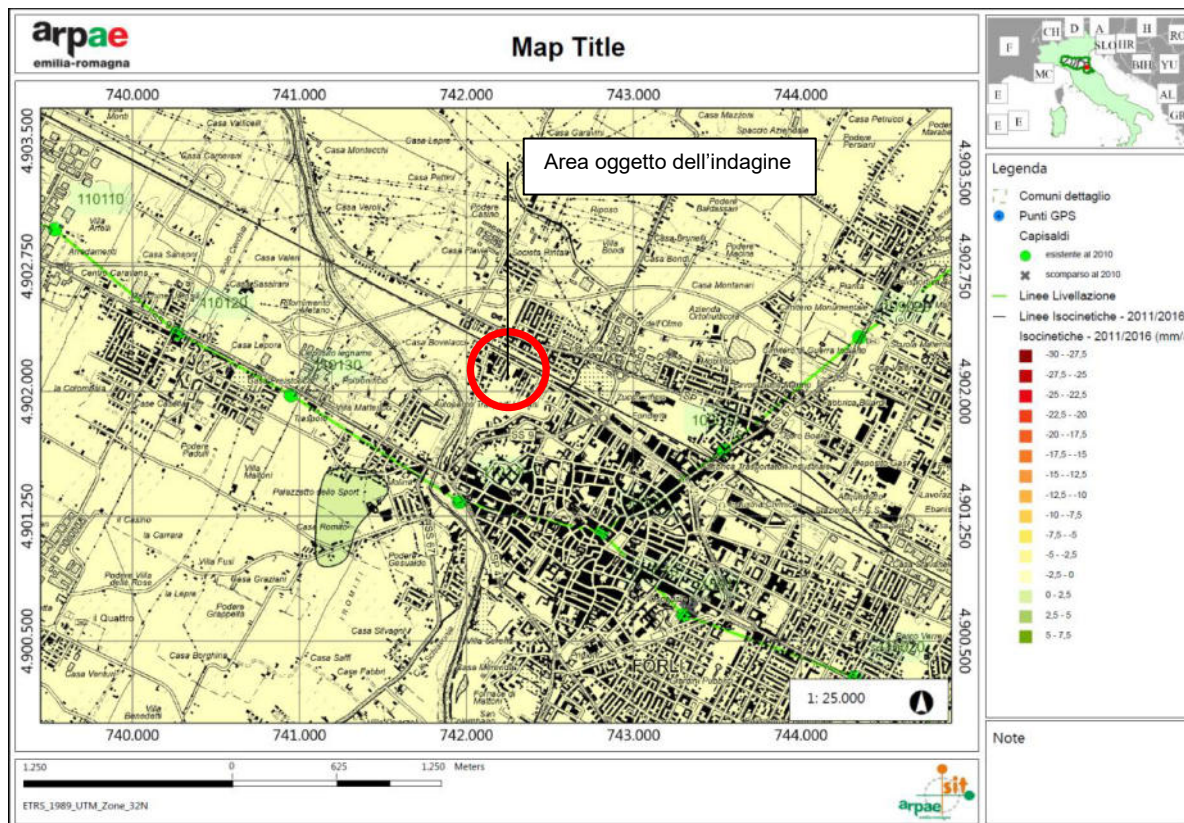
Arpa, su incarico della Regione e in collaborazione con il Dicam (Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e dei materiali) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, ha progettato e istituito nel 1997-98 una rete regionale di monitoraggio della subsidenza. Nella immagine viene rappresentata la Rete di Monitoraggio per l'area di Forlì.



Facendo riferimento ai dati riportati nel sito ARPAE (<https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/subsidenza/la-rete-regionale-di-monitoraggio-della-subsidenza>) che riporta i dati della RETE REGIONALE DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA, per la Provincia di Forlì Cesena, relativamente alla campagna 2016 – 2017, vengono evidenziati i seguenti dati:

“Nella provincia di Forlì-Cesena si evidenziano abbassamenti medi di circa 2 mm/anno, in riduzione rispetto al precedente rilievo. Continua la tendenza alla riduzione della subsidenza nell'area di Savignano sul Rubicone, in cui si notano abbassamenti massimi inferiori a 15 mm/anno localizzati in corrispondenza di San Mauro Pascoli. I centri di Forlì e Cesena sono sostanzialmente stabili con abbassamenti medi di circa 2 mm/anno.”

Nel successivo stralcio, sempre tratto dal sito Arpae, si vede che la zona interessata dallo studio evidenzia una velocità di abbassamento tra 0 e -2,5 mm/anno.



4. MODELLO SISMICO

Come detto, nell'area è stata eseguita una indagine geofisica con metodologia MASW che consente la determinazione diretta della velocità delle onde trasversali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) dei terreni del sottosuolo in esame in modo da ottenere una corretta caratterizzazione della categoria sismica del sottosuolo dell'area in oggetto (Vs30).

La metodologia e la tecnica di rilevamento è esaustivamente descritta nella relazione tecnica allegata al presente documento.

4.1 Categoria di suolo di fondazione

Facendo riferimento a NTC 2018, punto 3.2.2 "Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche", 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 all'espressione:

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.

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

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; per cui la velocità media di propagazione entro 30 metri di profondità delle onde di taglio V_{S30} , viene calcolata con l'espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^M \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

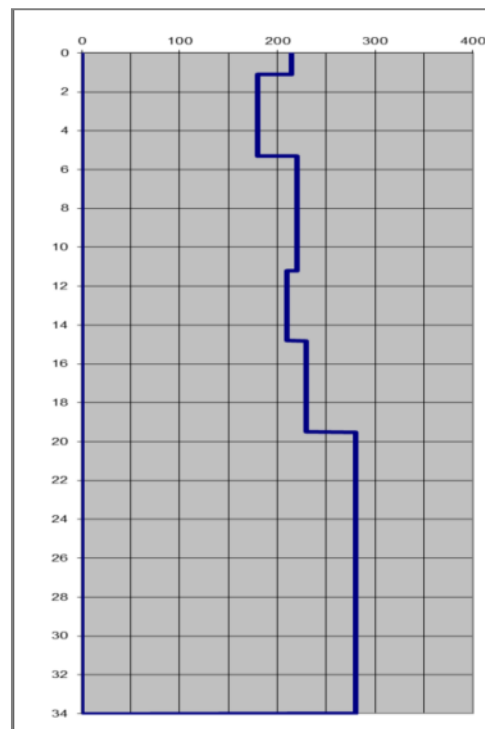
$V_{S,30}$ velocità sismica delle onde trasversali, ponderata su m 30;

h_i spessore dell'orizzonte i-esimo nei m 30 di riferimento;

V_i velocità delle onde S dell'orizzonte i-esimo di spessore h .

Relativamente alla velocità delle onde di taglio individuate, il caso in questione rientra nella seconda condizione vista, tenendo conto che fino alla profondità di 30 metri non si rileva velocità delle onde S di 800 m/s.

L'elaborazione della prova eseguita e la conseguente analisi del tracciato delle velocità delle onde S evidenzia intervalli di velocità che interpretati con l'ausilio degli elementi geologici conosciuti attraverso altre indagini geognostiche e documenti bibliografici di cui si è preso atto, porta al grafico ed alla tabella di seguito allegati



Risultati Elaborazione MASW

Strato	profondità		Spessor e m	Vel. m/sec
	da	a		
STRATO 1	0.00	1.10	1.10	215
STRATO 2	1.10	5.30	4.20	180
STRATO 3	3.50	11.20	7.70	220
STRATO 4	11.20	14.80	3.60	210
STRATO 5	14.80	19.50	4.70	230
STRATO 6	19.50	≥30.00	≥10.50	280

L'indagine geofisica evidenzia un valore di V_{S30} pari a **217 m/sec.**



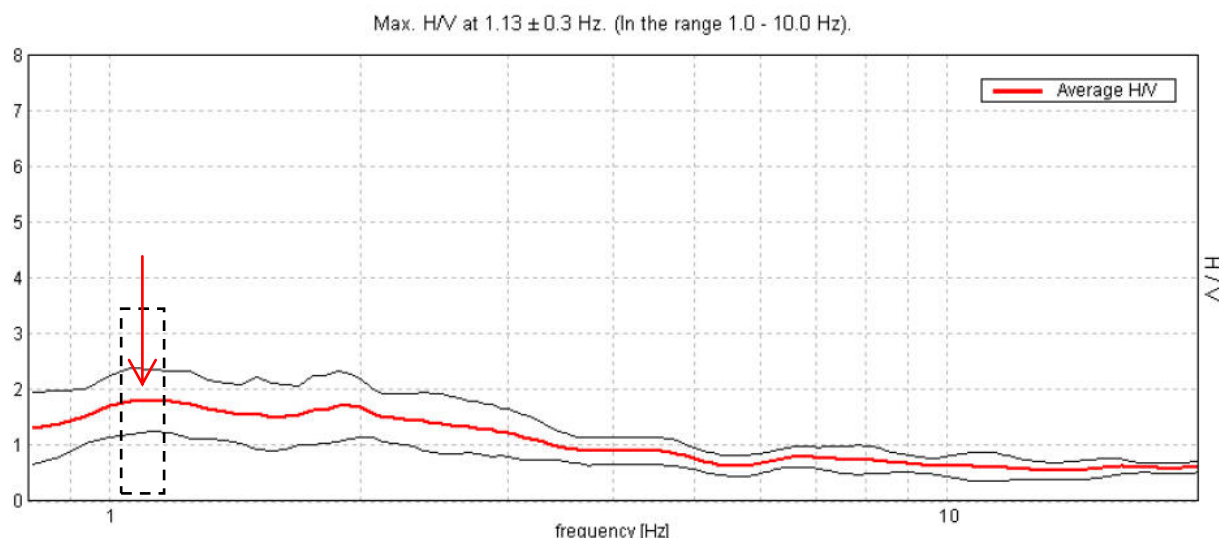
Con la determinazione delle onde di taglio Vs i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie di sottosuolo (N.T.C. 2018_Tabella 3.2.II):

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

Da questo dato emerge che tali terreni possono esser fatti rientrare nella **categoria C**, con riferimento alla Tabella precedente, che classifica “Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”.

Per quanto riguarda la determinazione della frequenza di vibrazione caratteristica del terreno si fa riferimento alla indagine sismica passiva a stazione singola (metodologia HVSR) eseguita nel giugno 2011, sul lotto adiacente a quello in questione dove è già stato realizzato un altro fabbricato di edilizia pubblica. La curva H/V “Rapporto spettrale verticale su orizzontale” ottenuta dall’indagine sismica passiva a stazione singola, viene utilizzata per la determinazione delle frequenze caratteristiche di risonanza del sito; tale curva viene rappresentata nel grafico qui riportato.

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

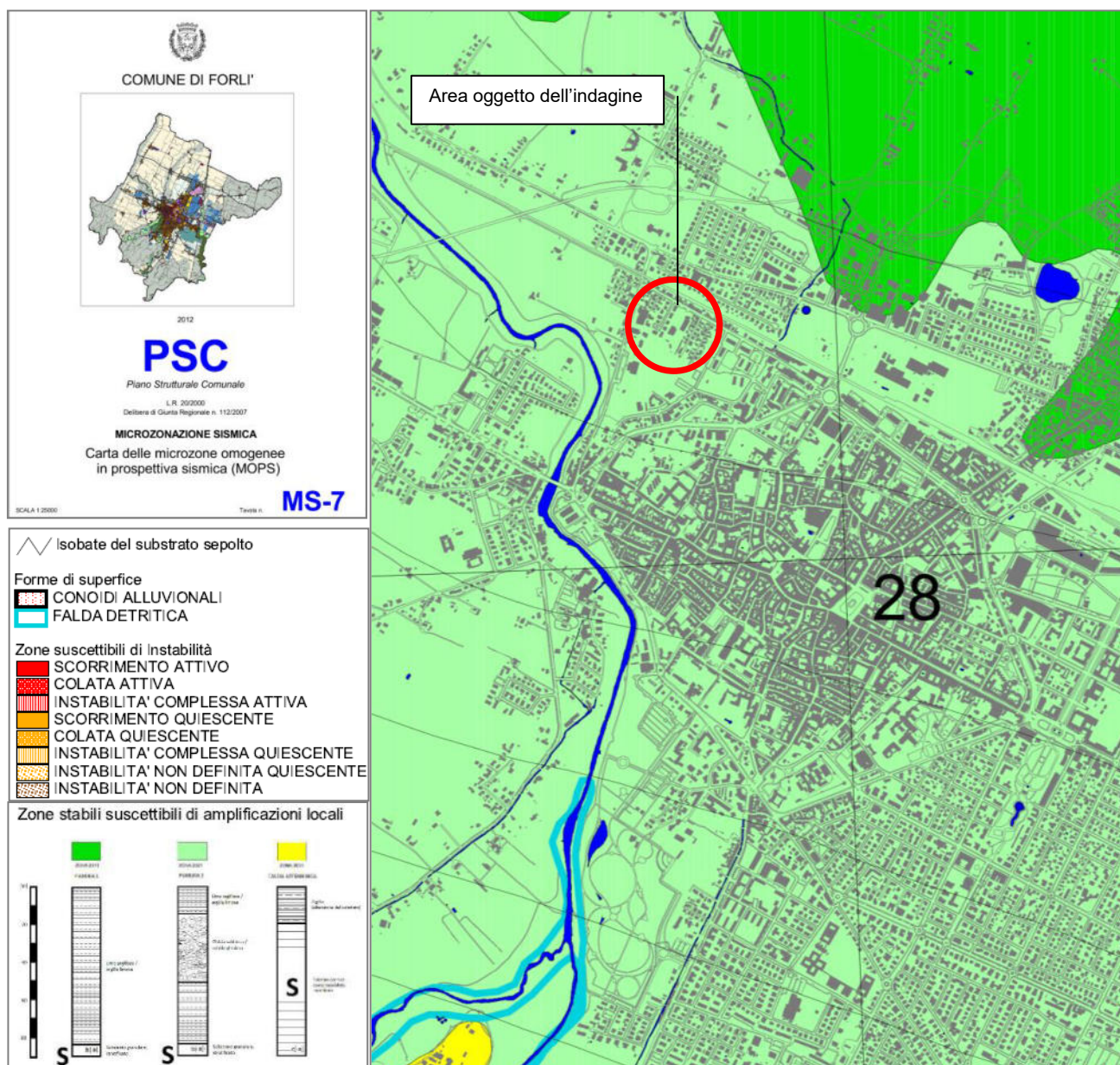


Analizzando i dati emersi, si evidenzia che il tracciato del rapporto spettrale, orizzontale su verticale H/V, segnala un picco significativo nell’intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (basse frequenze < 0,5 Hz e medie frequenze comprese tra 0,5 e 1 Hz) a 1,13 Hz..



4.2 Microzonazione sismica

Facendo riferimento alla documentazione di Microzonazione Sismica del Comune di Forlì ed in particolare alla Tavola MS-7 "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)", di cui si allega lo stralcio, si vede che l'area interessata dallo studio ricade in ZONA 2021 – PIANURA 2.



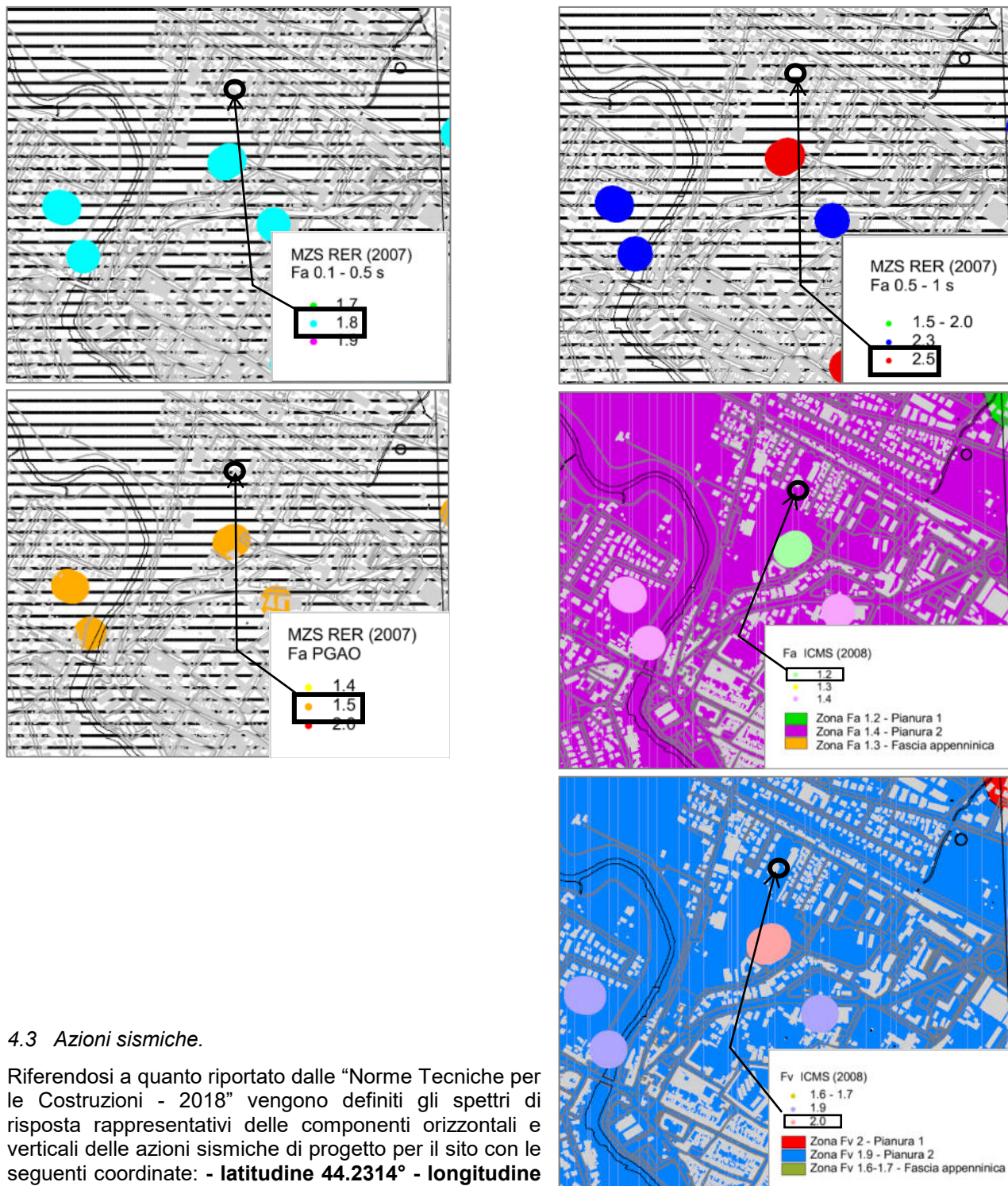
Come viene descritto nella Relazione Geofisica RE-2, della Microzonazione sismica, a firma di Silvia Castellaro, in data 29/01/2012, la zona "Pianura 2" viene definita:

Questa zona, con estensione NW--SE ed ubicata nella fascia centrale del territorio comunale, è caratterizzata da alcuni metri (5--30 m) di terreni fini a bassa velocità ($V_s \approx 200$ m/s) seguiti da terreni granulari più rigidi (sabbie e ghiaie, $V_s > 300$ m/s). Questa configurazione determina delle moderate amplificazioni per risonanza delle coperture fini a frequenze mediamente superiori a 3 Hz. I valori di V_{s30} si assestano tra 240 e 300 m/s).

In tutta l'area è ancora visibile una modesta amplificazione delle curve H/V a frequenze < 1 Hz, legata alla risonanza delle coperture sovrastanti uno strato rigido ($V_s \approx 600$ m/s) posto a profondità variabile tra 80 e 150 m.



Dalle Carte dei fattori di amplificazione $MS-6(1) \div MS-6(5)$, per l'area in oggetto risultano i seguenti:



4.3 Azioni sismiche.

Riferendosi a quanto riportato dalle “Norme Tecniche per le Costruzioni - 2018” vengono definiti gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti orizzontali e verticali delle azioni sismiche di progetto per il sito con le seguenti coordinate: - **latitudine 44.2314°** - **longitudine 12.0331°**

La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in tre fasi:

- Fase 1: Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1 – INGV);
- Fase 2: Scelta della strategia di progettazione;
- Fase 3: Determinazione dell'azione di progetto.

Ai fini dello studio in oggetto in questo documento si sviluppa la sola FASE 1” Pericolosità sismica” e la FASE 2 “Scelta della strategia di progettazione”, rimandando l'analisi della fase 3 al momento della progettazione strutturale.

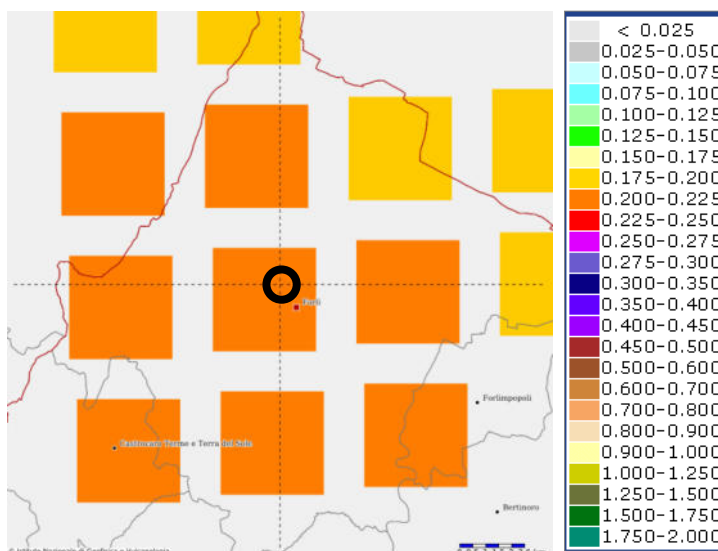


→ **FASE 1:** Tabella dei parametri che definiscono l'azione sismica, per il sito in questione; risultano i parametri illustrati nella successiva tabella e grafici, con:

- T_R = tempo di ritorno in anni
- a_g = accelerazione al sito in g
- F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, adimensionale
- T_c^* = periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale, in secondi.

Questi parametri sono definiti in corrispondenza dei punti di un reticolo di riferimento i cui nodi non distano fra loro più di 10 km., per diverse probabilità di superamento in 50 anni e per diversi periodi di ritorno.

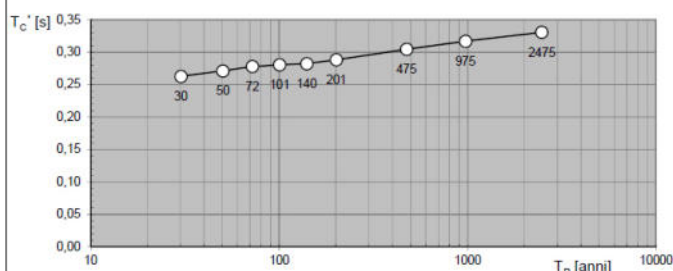
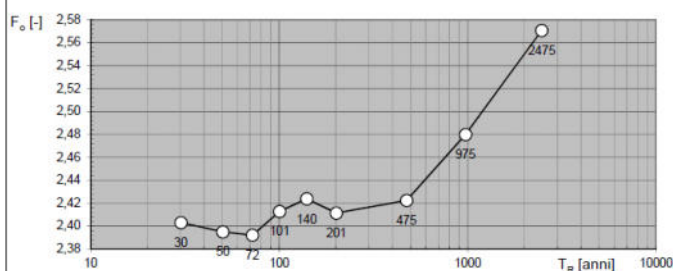
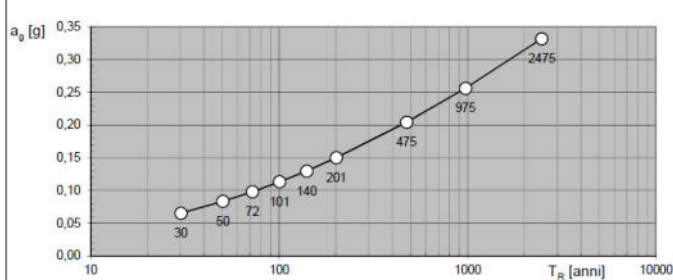
La mappa di pericolosità sismica del territorio, riportata in stralcio, tratta dal sito INGV, individua per questa porzione di territorio del Comune di Forlì >(nodo ID 18072) una accelerazione massima attesa, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e riferita a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/sec), compresa **tra 0.200 e 0.225 g**.



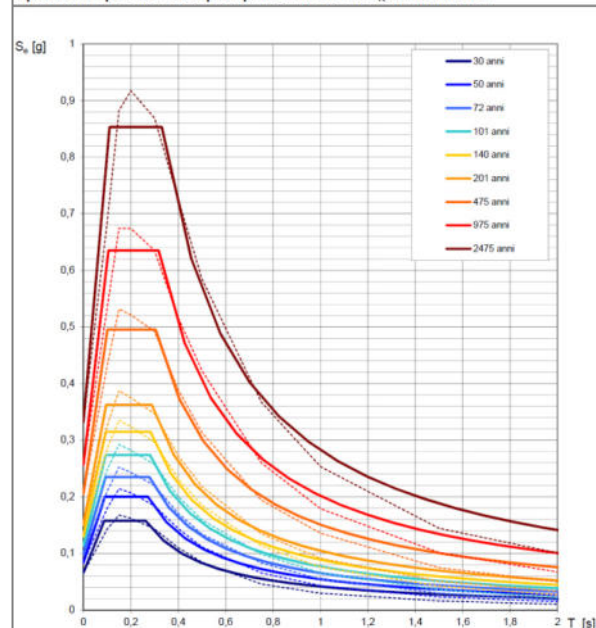
Valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* per i periodi di ritorno T_R di riferimento

T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
30	0,066	2,403	0,263
50	0,084	2,395	0,271
72	0,098	2,392	0,278
101	0,113	2,413	0,280
140	0,130	2,424	0,282
201	0,150	2,411	0,288
475	0,204	2,422	0,305
975	0,256	2,480	0,317
2475	0,332	2,571	0,331

Valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* : variabilità col periodo di ritorno T_R



Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_R di riferimento



FASE 1

Elaborazioni effettuate mediante il software Spettri – NTC ver. 1.03 dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, per il territorio del Comune di Forlì.



→ **FASE 2: Scelta della strategia di progettazione.**

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella Tab. 2.4.I dell'allegato A delle NTC 2018 e deve essere precisata nei documenti di progetto. La **costruzione** in oggetto ricade nella **tipologia 2**.

Tabella 2.4.I – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U : $V_R = V_N \times C_U$. Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II.

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso C_U

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

La struttura in progetto viene classificato in **classe II**, da cui risulta: $V_R = V_N \times C_U = 50 \times 1 = 50$.

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;

- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;

- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.



Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella 3.2.I.

Tabella 3.2.I – Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato

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%

Ai fini della definizione dell'Azione Sismica di progetto occorre valutare gli effetti che le condizioni stratigrafiche locali hanno sulla Risposta Sismica Locale.

Sulla base degli esiti dell'indagine geofisica presa in considerazione, si assume, come già detto una V_{s30} pari a **217 m/sec**, il suolo di fondazione dell'area di studio ricade quindi nella categoria di tipo **C**.

Per la determinazione dell'azione sismica occorre considerare anche il contributo derivante dalla morfologia superficiale. Per condizioni topografiche complesse occorre predisporre specifiche analisi di RSL; nel caso in cui la topografia non presenti particolare complessità, è possibile adottare la classificazione della tabella 3.2.IV. Trattandosi di zona pianeggiante, l'area in esame ricade nella categoria **T1**, a cui non è attribuibile alcun fenomeno di amplificazione sismica legato alle condizioni topografiche.

Tabella 3.2.IV – Categorie topografiche

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

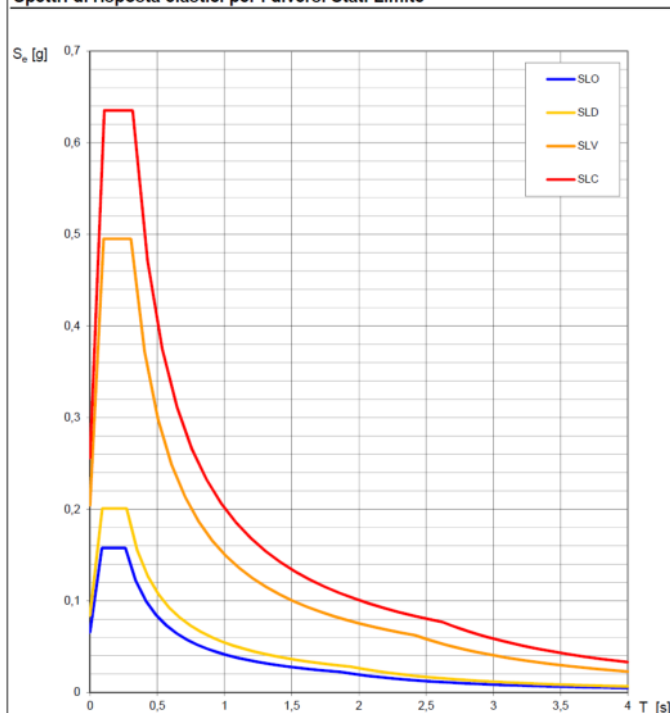
Dal punto di vista progettuale, lo spettro di risposta elastico in accelerazione riveste particolare importanza nella definizione delle Azioni Sismiche da adottare. Esso viene riferito ad uno smorzamento ξ convenzionale pari al 5% e la sua forma spettrale dipende dai fattori precedentemente citati (pericolosità di base a_g , stratigrafia, topografia, probabilità di superamento nel periodo di riferimento riferiti agli stati limite di progetto). Nella successiva tabella e relativi grafici vengono riportati gli Spettri in accelerazione orizzontale relativi agli stati limite per l'area di studio, caratterizzati, come precedentemente osservato, da probabilità di superamento differenti nel periodo di riferimento V_R .

Nel caso specifico, tali spettri si riferiscono a costruzioni ordinarie **Tipo 2** con vita nominale V_N di **50** anni e classe d'uso **II**.

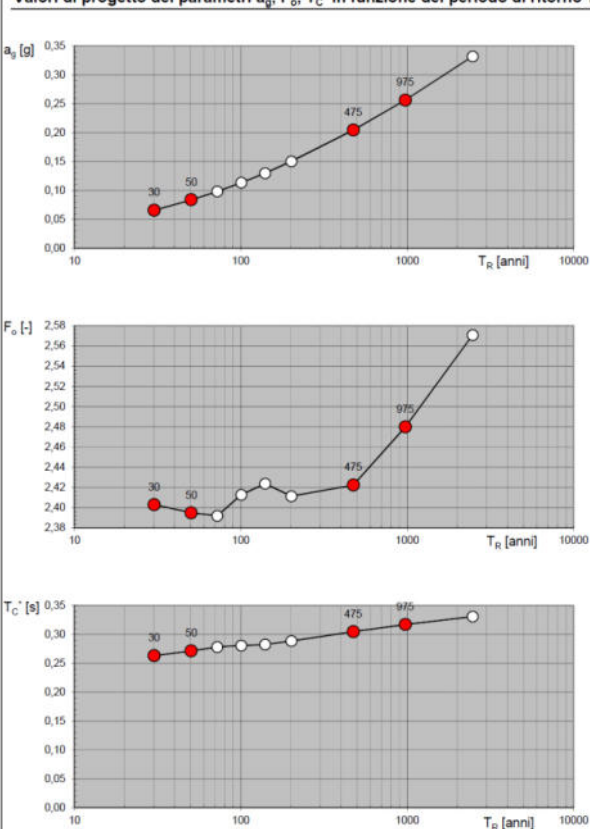
Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno SL

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_C [s]
SLO	30	0,066	2,403	0,263
SLD	50	0,084	2,395	0,271
SLV	475	0,204	2,422	0,305
SLC	975	0,256	2,480	0,317

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite



Valori di progetto dei parametri a_g , F_0 , T_C in funzione del periodo di ritorno T_R



FASE 2: Elaborazioni effettuate mediante il software Spettri – NTC ver. 1.03 dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, per il territorio del Comune di Forlì



5. MODELLO GEOTECNICO

5.1 Premessa

Ai fini della determinazione dei parametri fisico-meccanici dei terreni, si fa ricorso all'interpretazione, secondo quanto suggerito da Robertson (1986), delle prove penetrometriche CPTe (punta elettrica), eseguite nel lotto interessato.

Considerando la modesta estensione del lotto, la situazione morfologica e geologica generale, l'approfondita conoscenza del territorio, le dimensioni della struttura in progetto, si ritiene che i dati in possesso dello scrivente siano ampiamente sufficienti ai fini di una corretta e sufficiente conoscenza dei terreni di fondazione e dei parametri geotecnici necessari per la progettazione esecutiva delle opere.

I risultati delle prove sono stati elaborati mediante il software di calcolo "Static probing 2021" della ditta GeoStru software; in base a quanto emerso dal rilievo di campagna e sulla base dei dati desunti dalle indagini geognostiche citate in precedenza verranno individuati i livelli omogenei per caratteri litologici e fisico meccanici che caratterizzano l'area in cui si svilupperà il progetto.

5.2 Determinazione dei parametri caratteristici.

Facendo riferimento alle usuali relazioni di interpretazione delle prove penetrometriche statiche possono essere individuati i parametri meccanici caratteristici dei terreni, per strati omogenei, che vengono illustrati nella successiva tabella.

Vengono utilizzate le seguenti correlazioni:

Terreni incoerenti	Densità relativa: Harman
	Angolo di resistenza a taglio: Robertson&Campanella (1983)
	Modulo di Young: Robertson&Campanella (1983)
	OCR: Larsson (1991)
	Modulo edometrico: Kulhawy-Mayne (1990)
	Modulo di deformazione a taglio: Imai e Tomauchi
	Modulo di reazione Ko: Kulhawy-Mayne (1990)
	Peso unità di volume: Meyerhof
Terreni coesivi	Coesione non drenata: Terzaghi
	Modulo edometrico: metodo generale
	Peso unità di volume: Meyerhof
	OCR: Larsson (1991)
	Modulo di deformazione a taglio: Imai e Tomauchi
	Modulo di deformazione non drenato: Cancelli (1980)

Di seguito vengono rappresentati:

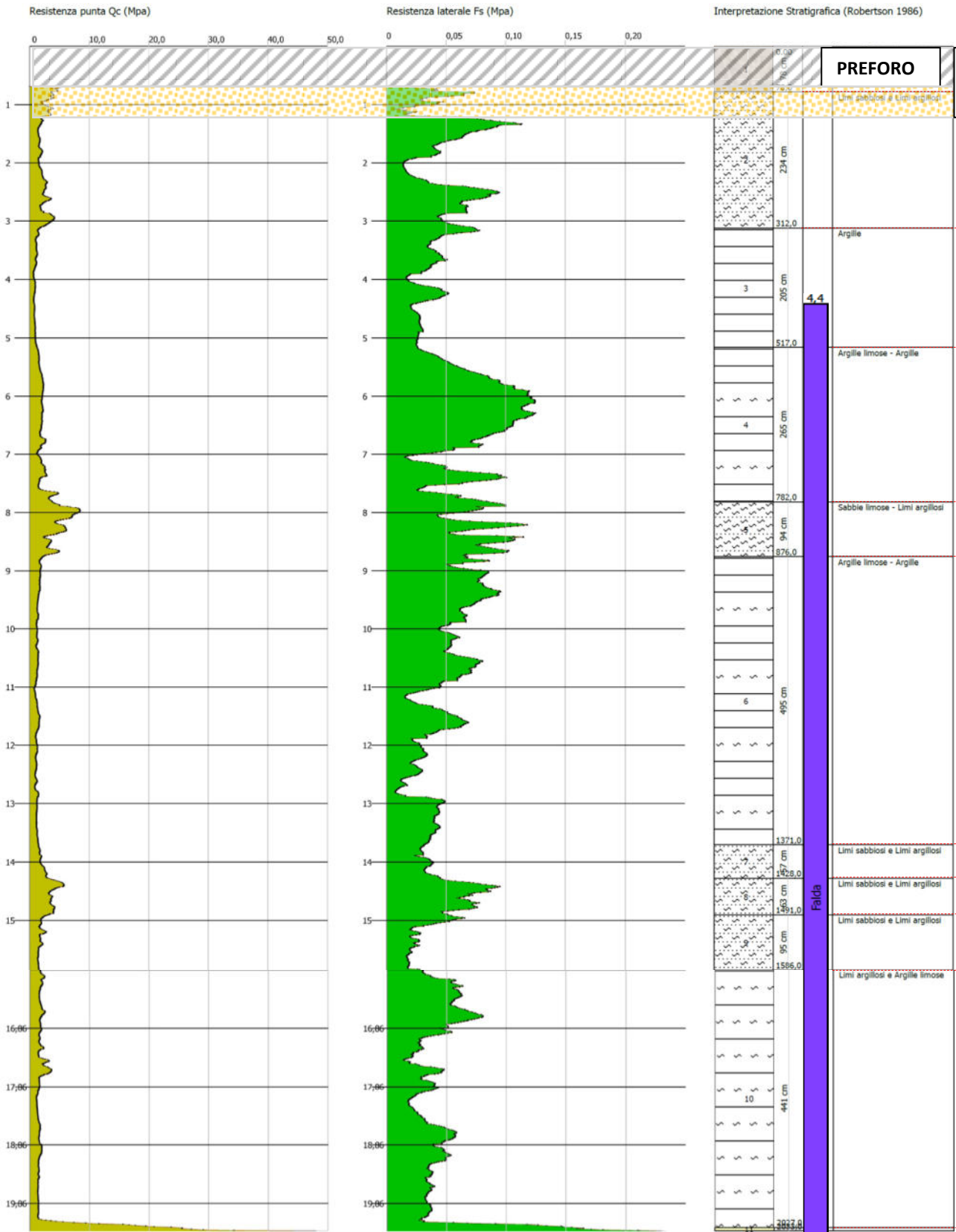
- I grafici della resistenza alla punta Q_c e della resistenza laterale F_s ;
- La colonna stratigrafica risultante dalla interpretazione delle prove penetrometriche, secondo Robertson (1986) e la definizione degli strati omogenei;
- La tabella, in cui sono indicati i parametri fisico meccanici caratteristici degli strati omogenei individuati nella precedente colonna stratigrafica e la relativa legenda con indicazione delle unità di misura. Si sottolinea che il n. progressivo dello strato, indicato nelle tabelle, è corrispondente al n. dello strato visibile nella relativa colonna stratigrafica.



Probe CPTE - Cone Penetration Test Tip Electric Nr.1
Strumento utilizzato PAGANI 200 kN (CPTE)

Committente: ACER FC
Cantiere: VIA AUTOPARCO
Località: FORLÌ

Data: 12/01



STIMA PARAMETRI GEOTECNICI								G:	Modulo di deformazione a taglio (Mpa)			
Nr:	Numero progressivo strato							OCR:	Grado di sovraconsolidazione			
Prof:	Profondità strato (m)							Puv:	Peso unità di volume (KN/m³)			
Tipo:	C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente								PuvS:	Peso unità di volume saturo (KN/m³)		
Cu:	Coesione non drenata (KPa)							Dr:	Densità relativa (%)			
Eu:	Modulo di defomazione non drenato (Mpa)							Fi:	Angolo di resistenza al taglio (°)			
Mo:	Modulo Edometrico (Mpa)							Ey:	Modulo di Young (Mpa)			
Nr.	Prof.	Tipo	Cu	Eu	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Ey
1	0,78	CI	25,5	19,2	2,8	7,5	0,8	17,1	17,9	65,3	45	1
2	3,12	CI	118,7	88,1	4,7	19,2	1,4	19,6	20,4	54,5	40,1	4,7
3	5,17	C	48,1	33,5	4,2	11,1	<0.5	18,1	18,8	--	--	--
4	7,82	C	104,9	75,1	4,2	17,8	<0.5	19,4	20,2	--	--	--
5	8,76	CI	249,1	182,8	10	30,3	<0.5	20,8	21,6	45,7	36,2	10
6	13,71	C	64,7	43,6	4,7	13,3	<0.5	18,5	19,3	--	--	--
7	14,28	CI	104,9	72,6	4,2	17,9	<0.5	19,3	20,1	6,6	27,6	4,2
8	14,91	CI	201	144,4	8	26,6	<0.5	20,5	21,2	28,1	32,2	8
9	15,86	CI	88,3	59,2	4,5	16	<0.5	19	19,8	5	25,1	3,5
10	20,27	C	100	67,1	4	17,3	<0.5	19,2	20	--	--	--
11	20,33	I	--	--	258,6	94,1	1	18,6	21,6	92,7	42,5	63,8



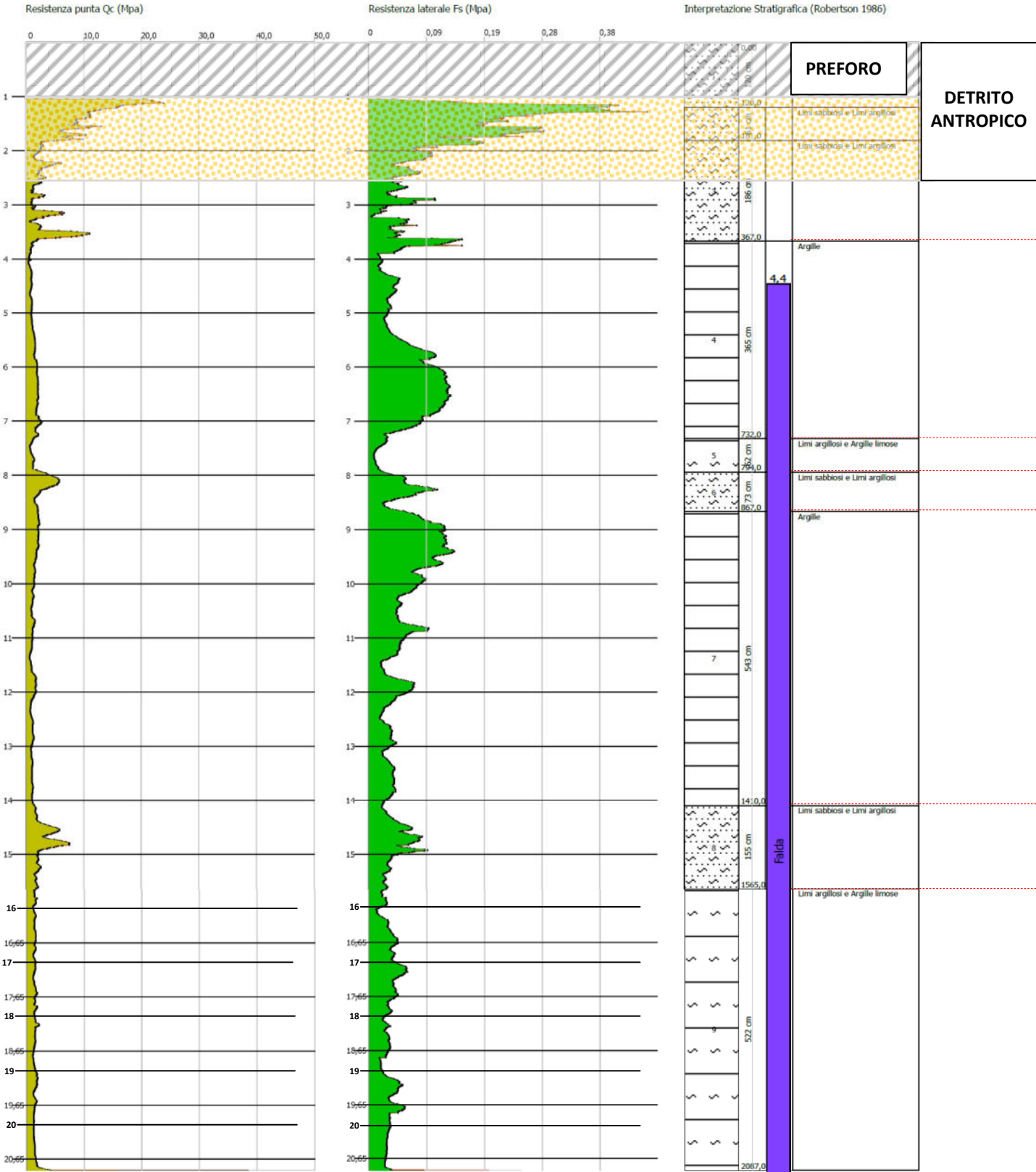
Probe CPTE - Cone Penetration Test Tip Electric Nr.2
Strumento utilizzato PAGANI 200 kN (CPTE)

Committente: ACER FC
Cantiere: VIA AUTOPARCO
Località: FORLÌ

Data: 12/01/2022

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI		G:	Modulo di deformazione a taglio (Mpa)
Nr:	Numero progressivo strato	OCR:	Grado di sovraconsolidazione
Prof:	Profondità strato (m)	Puv:	Peso unità di volume (KN/m³)
Tipo:	C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente	PuvS:	Peso unità di volume saturo (KN/m³)
Cu:	Coesione non drenata (KPa)	Dr:	Densità relativa (%)
Eu:	Modulo di defomazione non drenato (Mpa)	Fi:	Angolo di resistenza al taglio (°)
Mo:	Modulo Edometrico (Mpa)	Ey:	Modulo di Young (Mpa)

Nr.	Prof.	Tipo	Cu	Eu	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Ey
1	1,2	CI	131,4	98,7	5,3	20,5	<0.5	19,8	20,6	100	45	5,3
2	1,81	CI	474,6	355,8	19	44,9	<0.5	21,9	22,7	100	45	19
3	3,67	CI	142,2	104,9	5,7	21,4	1,6	19,9	20,7	52,8	39,3	5,7
4	7,32	C	70,6	50,2	4,7	14,1	<0.5	18,7	19,5	--	--	--
5	7,94	C	57,9	39,5	4,6	12,4	<0.5	18,3	19,1	--	--	--
6	8,67	CI	157,9	114,1	6,3	22,9	<0.5	20,1	20,9	31,1	33,7	6,3
7	14,1	C	65,7	44,1	4,7	13,4	<0.5	18,5	19,3	--	--	--
8	15,65	CI	143,2	100,8	5,7	21,5	<0.5	19,9	20,7	16,6	29,9	5,7
9	20,87	C	77,5	50,7	4,7	14,8	<0.5	18,7	19,5	--	--	--



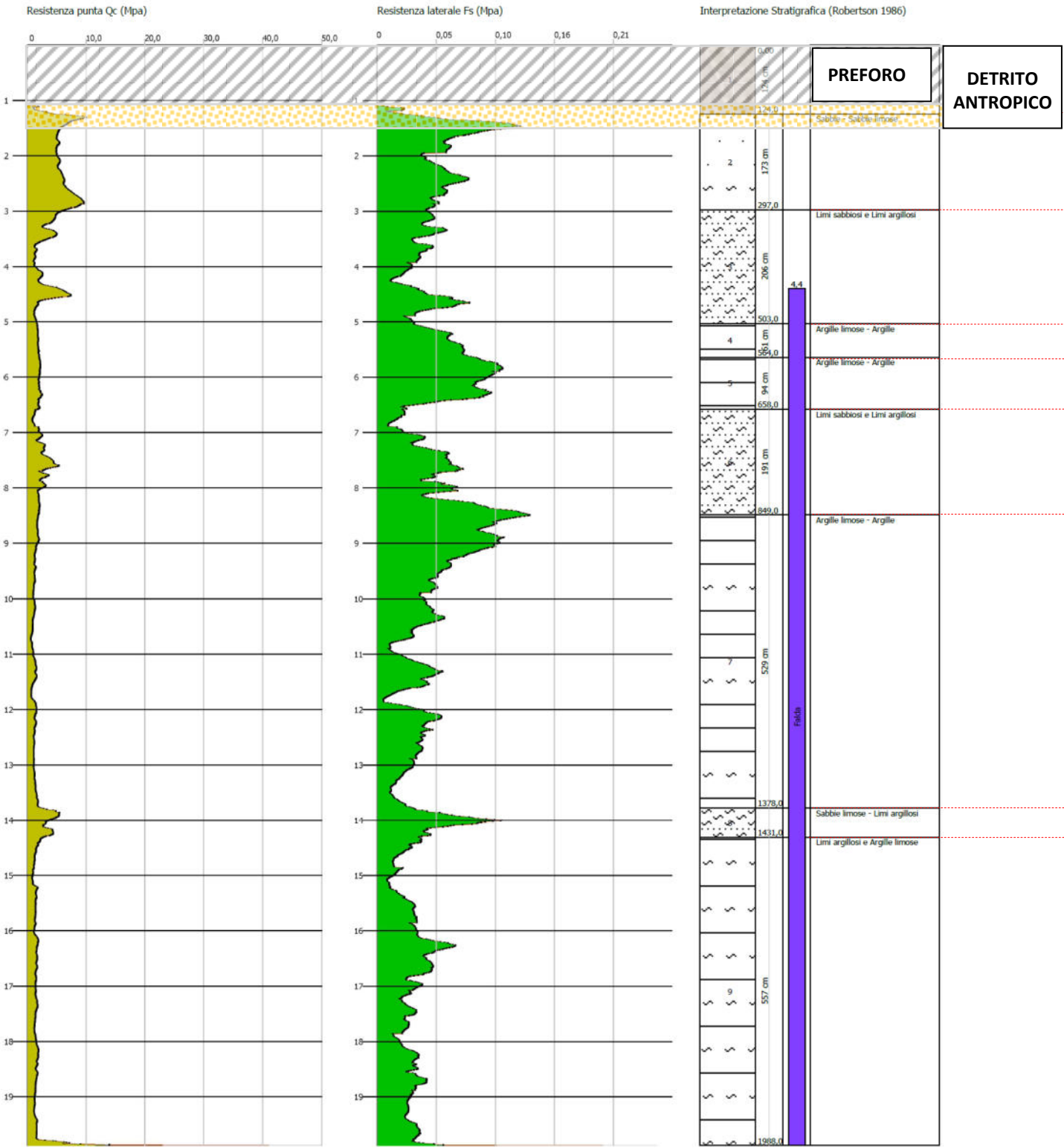
Probe CPTe - Cone Penetration Test Tip Electric Nr.3
Strumento utilizzato PAGANI 200 kN (CPTe)

Committente: ACER FC
Cantiere: VIA AUTOPARCO
Località: FORLÌ

Data: 12/01/2022

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI
Nr: Numero progressivo strato
Prof: Profondità strato (m)
Tipo: C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente
Cu: Coesione non drenata (KPa)
Eu: Modulo di defomazione non drenato (Mpa)
Mo: Modulo Edometrico (Mpa)

G: Modulo di deformazione a taglio (Mpa)
OCR: Grado di sovraconsolidazione
Puv: Peso unità di volume (KN/m³)
PuvS: Peso unità di volume saturo (KN/m³)
Dr: Densità relativa (%)
Fi: Angolo di resistenza al taglio (°)
Ey: Modulo di Young (Mpa)



Nr.	Prof.	Tipo	Cu	Eu	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Ey
1	1,24	CI	12,7	9,5	1,5	4,9	1,8	16	16,8	37,8	41,4	0,5
2	2,97	I	--	--	51,9	35,3	0,6	18,6	21,6	92,4	45	12,8
3	5,03	CI	144,2	106,1	5,8	21,7	<0.5	20	20,7	41,2	36,5	5,8
4	5,64	C	93,2	67,2	4,3	16,6	<0.5	19,2	20	--	--	--
5	6,58	C	105,9	76	4,2	17,9	<0.5	19,4	20,2	--	--	--
6	8,49	CI	119,6	86,1	4,8	19,3	<0.5	19,6	20,4	23,1	32,3	4,8
7	13,78	C	64,7	43,7	4,7	13,3	<0.5	18,5	19,3	--	--	--
8	14,31	CI	201	144,8	8	26,6	<0.5	20,5	21,2	29,6	32,6	8
9	19,88	C	83,4	55,5	4,6	15,5	<0.5	18,9	19,7	--	--	--

5.3 Coefficiente di reazione del terreno.

Il coefficiente di reazione del terreno, o coefficiente di Winkler, è normalmente indicato come K o KS [kgf/cm²]. Nel modello di Winkler, il sottosuolo è caratterizzato da una relazione fra il cedimento di un punto (s) e la pressione di contatto (p) nello stesso punto, di tipo lineare:

$$p = K s.$$

In un terreno reale il cedimento dipende, oltre che dal carico applicato e dalle proprietà del terreno, dalla forma e dimensioni della fondazione e dalla stratigrafia del terreno. Il coefficiente di reazione non è quindi una proprietà del terreno e non può essere definito con solo riferimento al terreno, ma deve anche essere riferito alla dimensione e forma della fondazione.

Il metodo più affidabile di valutazione di k sarebbe quello di calcolare, a partire dai risultati di indagini geotecniche, il cedimento s della specifica fondazione in esame e quindi dividere il carico unitario medio p per il cedimento calcolato s.

La bibliografia fornisce tabelle orientative che propongono i valori tipici in relazione alla litologia presente; a queste si può fare riferimento, in via preliminare, quando ancora non sono note le caratteristiche costruttive dell'edificio in progetto.

MODULO DI REAZIONE "VERTICALE" DEL TERRENO [WINKLER]		MODULO DI REAZIONE "ORIZZONTALE" DEL TERRENO [per paratie]	
Tabella dei Moduli di Winkler secondo POZZATI		Rif.: FONDAZIONI Joseph E. BOWLES	
Natura del terreno	K [Kg/cm ²]	Natura del terreno	Ks [Kg/cm ²]
torba leggera	0.6 ~ 1.2	Terreno Sabbioso :	
torba pesante	1.2 ~ 1.8	Sciolto	0.49 ~ 1.63
terra vegetale	1.0 ~ 1.5	Mediamente compatto	0.98 ~ 8.16
depositi recenti	1.0 ~ 2.0	Compatto	6.53 ~ 13.50
sabbia di mare, fina	1.5 ~ 2.0	Terreno Argilloso:	
sabbia poco coerente	2.0 ~ 4.0	qu < 2 daN/cm ²	1.22 ~ 2.45
Caratteri litologici coerenti con i terreni interessati dall'indagine	terra molto umida	qu < 4 daN/cm ²	2.45 ~ 4.89
	terra poco umida	qu > 4 daN/cm ²	4.98 ~ 48.95
	terra secca	Sabbia argillosa mediamente compatta	3.26 ~ 8.16
	argilla con sabbia	Sabbia limosa mediamente compatta	2.45 ~ 4.89
	argilla grassa		
	sabbia compatta		
	ghiaia con sabbia		
	ghiaia compatta		

5.4 Altezza critica degli scavi.

In considerazione della brevità dei tempi di esecuzione degli scavi e dei successivi reinterri, la verifica della stabilità viene condotta in condizioni non drenate. Si trascura quindi il tempo ed il fenomeno del lento rigonfiamento delle pareti dello scavo che nell'ipotesi di tempi molto lunghi sono causa di franamenti. Secondo la teoria di Rankine o degli stati limite in condizioni non drenate, ponendosi in termine di tensioni totali, per una scarpata a pareti verticali risulta l'altezza critica: $h_{crit} = 2 c_u / \gamma$.



La coesione non drenata media, negli strati superficiali fino alla profondità di m. 4,00 (ipotetica profondità di imposta delle fondazioni), può essere stimata, prudenzialmente, in circa 7 t/mq; dalla relazione di cui più sopra si avrebbe: $h_{crit} \approx 7,0$ m.

Tra gli Autori che, in vario modo, si sono occupati del problema dell'altezza critica degli **scavi verticali**, Tomlinson, sulla base di più esperienze, suggerisce che a terreni mediamente coesivi, con una c_u tra 2 e 4 t/mq, corrisponde generalmente una H_{crit} tra 1,5 e 3 m., ad una c_u tra 4 e 8 t/mq corrisponde generalmente una H_{crit} tra 3 e 5 m., per una coesione molto elevata ≈ 10 t/mq l'altezza critica sale approssimativamente a 8 metri.

Nel caso in questione, si avrebbe: $h_{crit} / h = 7,00/4,00 = 1,75$ (coefficiente di sicurezza).

Pertanto si deve tenere conto che l'altezza critica dipende dalla coesione non drenata c_u , parametro quest'ultimo molto influenzabile da varie grandezze come: disturbi, fessurazioni, infiltrazioni, contenuto in acqua, ecc.; la scelta del coefficiente di sicurezza η , al fine di ricavare l'altezza ammissibile del fronte di scavo, va effettuata di volta in volta tenendo conto, nel corso dei lavori, di tutti i fattori interessati.

La stima della altezza critica dello scavo può essere condotta anche tramite l'applicazione dei diagrammi di Taylor, secondo cui il coefficiente di sicurezza si esprime come:

$F = N c_u / \gamma H$ dove N si legge nell'abaco.

Per uno scavo verticale risulta:

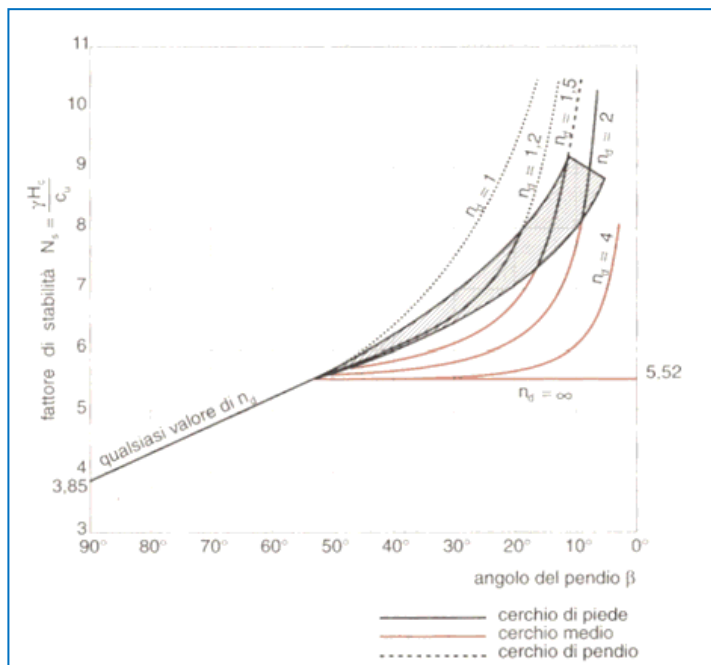
$$H_c = 3,85 \cdot c_u / \gamma = 13,5 \text{ m.}$$

Ipotizzando uno scavo di altezza pari a 4,00 metri, il coefficiente di sicurezza diventerebbe $F = H_c / H \approx 3,4$.

I dati suggeriti sono comunque da ritenere **teorici** per uno scavo verticale non armato; **si rimanda, comunque, al responsabile della sicurezza sul cantiere la verifica dell'applicabilità di tale dato, teorico, sulla base delle osservazioni degli scavi e delle reali condizioni in cui si sviluppano i lavori ed eventualmente dell'uso di appropriati mezzi di sostegno.**

Particolare attenzione deve essere posta alla eventuale comparsa di fessurazioni, fratture o rigonfiamenti sulle pareti esposte, dopo lo scavo; questi sintomi indicano la decompressione dei terreni e l'abbattimento dei parametri meccanici; in questo caso il valore della C_u deve essere ritenuto molto più basso di quanto indicato e l'altezza critica deve essere assunta rigorosamente pari alla metà di quanto suggerito.

Uguale prudenza deve essere posta nel caso di scavi in presenza di acqua; nel caso è senz'altro indispensabile operare con la massima prudenza e adottare tutte le opportune precauzioni per assicurare la stabilità degli scavi e la sicurezza degli operatori. Nel corso dell'escavazione si dovrà avere cura di depositare il terreno scavato alla massima distanza possibile dal ciglio dello scavo; un eventuale appesantimento localizzato in vicinanza dello scavo avrebbe come risultato una proporzionale riduzione dell'altezza ammissibile.



5.5 Spinta delle terre

Il calcolo viene sviluppato secondo Rankine, che definisce la spinta attiva esercitata ad 1/3 dell'altezza dello sbanco calcolato dalla base, secondo la nota legge: $P_a = (\gamma \times H_1^2 / 2 \times K_a) + (\gamma_a \times H_2^2 / 2) + (q \times K_a)$, dove:

γ = Densità naturale:	1,9 t/mc
γ_a = peso del terreno in acqua:	0,9 t/mc
\emptyset = angolo di attrito interno (stimato prudenziale):	20°
H_1^2 = altezza dello sbanco sopra il livello dell'acqua:	4,00 mt.
H_2^2 = altezza dello sbanco sotto il livello dell'acqua:	0,0 mt.
q = sovraccarico:	0 t/mq
K_a = coefficiente di spinta attiva = $\tan^2(45 - \emptyset / 2)$.	0,49

Sulla base dei parametri precedenti, assumendo uno sbanco di altezza uguale a 4,00 metri e con falda assente risulta una spinta pari a circa 7,45 t/m.l.

5.6 Liquefazione per effetto sismico

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio in seguito o durante un evento sismico di una certa entità, poiché per effetto dell'istaurarsi di condizioni non drenate, si ha un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali che possono eguagliare le tensioni totale con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi e quindi perdita di capacità portante.

Perché si verifichi il fenomeno della liquefazione occorre la compresenza di:

fattori predisponenti:	fattori scatenanti:
strato liquefacibile entro 20 metri dal piano campagna	magnitudo $M > 5.5$
diametro medio D_{50} compreso fra 0.02 e 2 mm	$PGA > 0.15 \text{ g}$
densità relativa $Dr < 60\%$	Durata evento sismico $> 15+20 \text{ sec}$
frazione dei fini (diametro minore di 5 μm) $< 15\%$	
profondità della falda < 5 metri dal piano campagna	

Nel D.M. 17 gennaio 2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni) l'approccio metodologico delle verifiche alla liquefacibilità viene descritto all'interno del paragrafo 7.11 (Opere e Sistemi Geotecnici). In dettaglio, al paragrafo 7.11.3.4.2, la norma prevede che si possa omettere la verifica nel caso si realizzino le seguenti condizioni:

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 $q_{c1N} > 180$ 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 q_{c1N} 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 $U_c < 3,5$ ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

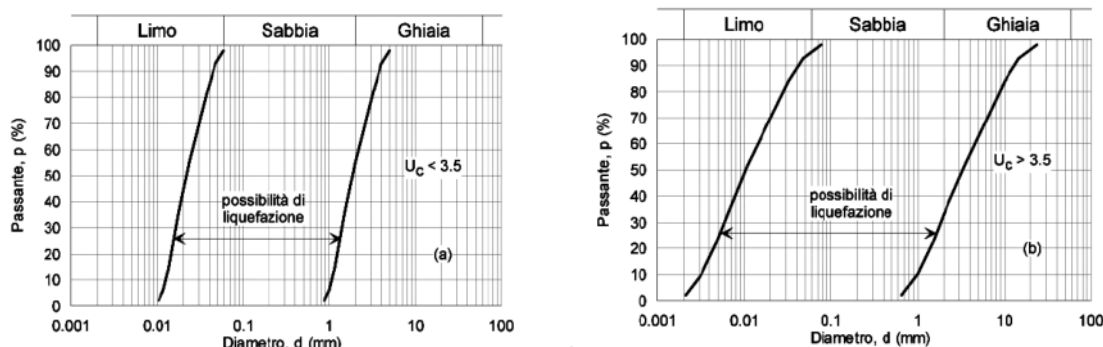


Fig. 7.11.1 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

b)



In base a quanto emerso dalle indagini geognostiche eseguite, dal punto di vista litologico i terreni che caratterizzano l'area, sono di natura prevalentemente coesiva, argillosi o argilloso limosi fino alla profondità di 20,00 metri dal piano di campagna e quindi non suscettibili di liquefazione con evento sismico.

Si deve evidenziare comunque la presenza a varie profondità livelli caratterizzati da una litologia in cui alla componente fine - coesiva si aggiungono frazioni limoso sabbiose o sabbiose molto variabili ma comunque significative; in questo caso si passa ad un carattere misto coesivo/incoerente mentre non sono mai stati rilevati livelli sabbiosi puliti.

Quindi tenendo conto che:

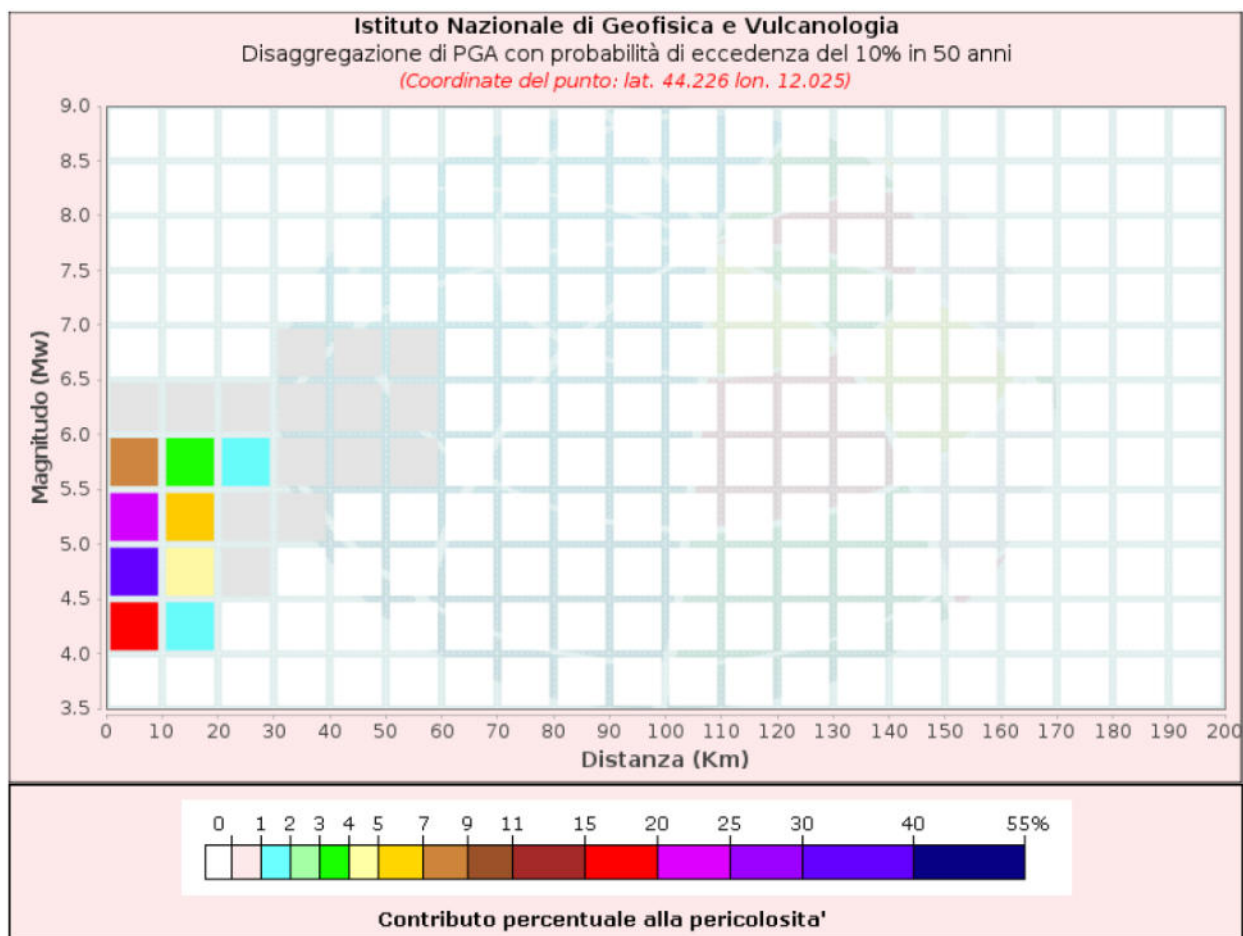
- è stato individuato un livello di falda superficiale alla profondità di metri 4,40 ;
- all'interno del deposito, sono presenti, fino alla profondità di 20,00 metri dal piano di campagna, alcuni livelli, a granulometria assortita, con frazione sabbiosa, che essendo immersi in acqua, potrebbero risultare potenzialmente liquefacibili;

si è ritenuto opportuno eseguire una verifica mediante l'utilizzo del software "Liquiter" della società GEOSTRU e utilizzando la correlazione di Robertson & Wride 1998.

Allo scopo, tenendo conto della sostanziale uniformità dei risultati delle prove penetrometriche eseguite, si è preso a riferimento la prova CPTe 2, baricentrica rispetto all'area di indagine; l'elaborazione ha fornito i fattori di sicurezza nei confronti della liquefazione indicati nella tabella di seguito allegata.

L'analisi è stata condotta tenendo conto dei seguenti parametri sismici:

- Accelerazione al sito $a_g = 0,204g = 2,081 \text{ m/sec}^2$ (da Spettri-NTC vers. 1.03);
- PGA o $a_{\max} = a_g * S = 0,286g = 2,919 \text{ m/sec}^2$
- Magnitudo $M_w = 6,0$ (da INGV – Modello di pericolosità sismica – Nodo ID 18072 - Grafici di disaggregazione).
- Distanza epicentrale = 10 km.





ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni											
Distanza in Km	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.0000	18.6000	35.2000	20.4000	7.8100	0.0211	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	1.2400	4.7900	5.6000	3.7500	0.1660	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0000	0.0946	0.7320	1.0300	0.1270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0283	0.2480	0.0877	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0214	0.0357	0.0045	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0043	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi: magnitudo = 4.93 ; distanza = 6.58 ; epsilon = 1.0

Il metodo di Robertson e Wride' è basato sui risultati di prove CPT (*Cone Penetration Test*) ed utilizza l'indice di comportamento per il tipo di suolo I_c che viene calcolato mediante l'utilizzo della seguente relazione:

$$I_c = \left[(3.47 - \log_{10} Q)^2 + (\log_{10} R_f + 1.22)^2 \right]^{0.5} \quad (5.0a)$$

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a} \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (5.0b)$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} 100 \quad (5.0c)$$

dove:

q_c è la resistenza alla punta misurata

P_a è la tensione di riferimento (1 atmosfera) nelle stesse unità di σ'_{vo}

f_s è l'attrito del manicotto

n è un'esponente che dipende dal tipo di suolo.



Inizialmente si assume $n = 1$, come per un suolo argilloso e si procede al calcolo di I_C con la (5.0a).

Se $I_C > 2,6$ il suolo è probabilmente di tipo argilloso e l'analisi si ferma. Il terreno non si considera a rischio di liquefazione.

Se $I_C \leq 2,6$, vuol dire che l'ipotesi assunta è errata, il suolo è di natura granulare, Q verrà ricalcolato utilizzando la (5.0a) usando come esponente $n = 0,5$.

Se è ancora $I_C \leq 2,6$, significa che l'ipotesi è giusta e il suolo è probabilmente non plastico e granulare.

Se invece $I_C > 2,6$, vuol dire che l'ipotesi è di nuovo errata e il suolo è probabilmente limoso. Q deve essere nuovamente ricalcolato dalla (5.0a) ponendo $n = 0,75$.

Calcolato I_C , si procede con la correzione della resistenza alla punta misurata q_{c1N} mediante la seguente espressione:

$$(q_{c1N})_{cs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$\Delta q_{c1N} = \frac{K_c}{1 - K_c} q_{c1N}$$

dove K_c dipende dal contenuto di fine, FC (%):

$$K_c = 0 \quad \text{per } FC \leq 5$$

$$K_c = 0,0267(FC - 5) \quad \text{per } 5 < FC \leq 35$$

$$K_c = 0,8 \quad \text{per } FC > 35$$

FC (%) viene calcolato mediante l'espressione seguente:

$$FC(\%) = 1,75(I_C)^{3,25} - 3,7$$

La resistenza alla liquefazione per una magnitudo pari a 7,5 ($CRR_{7,5}$) si calcola nel modo seguente:

se $(q_{c1N})_{cs} < 50$

$$CRR = 0,833 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0,05$$

se $50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160$

$$CRR = 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0,08$$

Il Rapporto di Tensione Ciclica per eventi sismici di magnitudo 7,5 (**CSR_{7,5}**) si determina dalla seguente espressione:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = CSR_{7,5} = 0,65 \frac{a_g}{g} \frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}} r_d$$

Per magnitudo diverse occorre introdurre il fattore correttivo **MSF** (*Magnitude Scaling Factor*) come raccomandato dal **NCEER** (vedi Tabella 1)

$$CSR = \frac{CSR_{7,5}}{MSF}$$

Tabella 1- Fattore di scala della magnitudo derivato da diversi ricercatori

Magnitudo	Seed H.B. & Idriss I.M. (1982)	Ambraseys N.N (1988).	NCEER (Seed R. B. et alii) (1997; 2003)
5,5	1,43	2,86	2,21
6,0	1,32	2,20	1,77
6,5	1,19	1,69	1,44
7,0	1,08	1,30	1,19
7,5	1,00	1,00	1,00
8,0	0,94	0,67	0,84
8,5	0,89	0,44	0,73



Per determinare il valore del coefficiente riduttivo r_d vengono utilizzate le formule raccomandate da un gruppo di esperti del **NCEER** (*National Center for Earthquake Engineering Research*):
per $z < 9,15$ m

$$r_d = 1,0 - 0,00765 z$$

per $9,15 \leq z < 23$ m

$$r_d = 1,174 - 0,00267 z$$

Il fattore di sicurezza alla liquefazione **FS** viene determinato dalla relazione: $FS = \frac{CRR}{CSR}$

mentre l'indice del potenziale di liquefazione P_L viene calcolato con il metodo di **Iwasaki et alii** (1978; 1984).

Questo metodo è stato sviluppato basandosi sull'osservazione che severità e danni prodotti dalla liquefazione sui manufatti è legata al volume di terreno liquefatto all'interno del deposito. Il metodo si basa sulla stima di due quantità: il fattore di resistenza (FSL) e l'indice del potenziale di liquefazione (P_L). L'indice del Potenziale di liquefazione, indicativo dell'estensione che il fenomeno può avere all'interno del deposito, si ricava dall'espressione:

Indice del potenziale di liquefazione P_L (Iwasaki, 1978) :

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

dove :

$F(z)=0$ per $FSL > 1$; $F(z)= 1- FSL$ per $FSL < 1$

$w(z) = 10 \cdot 10^{-(z/z_{crit})}$;

z_{crit} = profondità oltre la quale possono escludersi fenomeni di liquefazione (15-20m)

Indice del potenziale di liquefazione e livello di rischio associato

Valore di P_L	Rischio di liquefazione
$P_L = 0$	molto basso
$0 < P_L \leq 5$	basso
$5 < P_L \leq 15$	alto
$15 < P_L$	molto alto

DATI GENERALI

PROGETTO E LOCALIZZAZIONE

Cliente: ACER FC

Indirizzo: via Autoparco - Forlì

Data: 13/01/2022

Normativa: Norme Tecniche Costruzioni 2018, Decreto 17 Gen. 2018

Fattore sicurezza normativa: 1.25

FALDA

Profondità falda idrica: 4.4 m



DATI SISMICI

Accelerazione Bedrock: 0.204
 Fattore amplificazione: 2.461

Tipo Suolo: C-Sabbie, ghiaie mediamente addensate, argille di media consistenza Vs30=180-360
 Morfologia: T1-Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$

Coefficiente amplificazione stratigrafica (SS): 1.5
 Coefficiente amplificazione topografica (ST): 1
 Magnitudo momento sismico (Mw): 6,0
 Distanza epicentro: 10 Km
 Peak ground acceleration (PGA): 0.286

Verifica secondo: **Robertson Wride, 1998 Modificato** - Correzione per la magnitudo (MSF): 1.77

Nr.	Profondità dal p.c. (m)	Pressione litostatica totale (kPa)	Pressione verticale effettiva (kPa)	Resistenza alla punta normalizzata Q	Attrito laterale normalizzato F(%)	Indice di comportamento I_c	Correzione per la pressione litostatica efficace CQ	Resistenza alla punta corretta qc1 (kPa)	Coefficiente riduttivo (rd)	Resistenza alla liquefazione (CRR)	Sforzo di taglio normalizzato (CSR)	Coefficiente di sicurezza F_s	Suscettibilità di liquefazione	Indice di liquefazione	Rischio
1	4.60	91.821	89.860	14.769	5.269	lc1=3.01 lc=3.01	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
2	4.80	95.721	91.798	14.415	5.285	lc1=3.02 lc=3.02	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
3	5.00	99.621	93.737	14.075	5.300	lc1=3.03 lc=3.03	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
4	5.20	103.521	95.676	13.749	5.316	lc1=3.04 lc=3.04	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
5	5.40	107.421	97.614	13.436	5.332	lc1=3.05 lc=3.05	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
6	5.60	111.321	99.553	13.135	5.348	lc1=3.05 lc=3.05	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
7	5.80	115.221	101.492	12.846	5.364	lc1=3.06 lc=3.06	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
8	6.00	119.121	103.430	12.568	5.380	lc1=3.07 lc=3.07	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
9	6.20	123.021	105.369	12.299	5.396	lc1=3.08 lc=3.08	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
10	6.40	126.921	107.308	12.041	5.412	lc1=3.09 lc=3.09	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
11	6.60	130.821	109.246	11.791	5.429	lc1=3.09 lc=3.09	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
12	6.80	134.721	111.185	11.551	5.445	lc1=3.10 lc=3.10	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
13	7.00	138.621	113.124	11.318	5.462	lc1=3.11 lc=3.11	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
14	7.20	142.521	115.062	11.094	5.478	lc1=3.12 lc=3.12	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
15	7.40	146.390	116.970	8.609	1.649	lc1=2.91 lc=2.91	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
16	7.60	150.212	118.830	8.442	1.656	lc1=2.92 lc=2.92	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
17	7.80	154.034	120.691	8.280	1.662	lc1=2.93 lc=2.93	0.4155976	0.000	0.000	0.000	0.000	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
18	8.00	157.961	122.657	28.441	1.941	lc1=2.57 lc=2.52	0.9029303	97.057	0.939	0.165	0.127	1.300	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	MOLTOBASSO _RES
19	8.20	162.133	124.867	28.188	1.944	lc1=2.58 lc=2.52	0.8949018	97.597	0.937	0.166	0.128	1.302	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	MOLTOBASSO _RES
20	8.40	166.305	127.078	27.942	1.946	lc1=2.59 lc=2.52	0.8870838	98.159	0.936	0.168	0.129	1.306	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	MOLTOBASSO _RES
21	8.60	170.477	129.289	27.702	1.949	lc1=2.59 lc=2.53	0.8794671	98.743	0.934	0.170	0.129	1.310	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	MOLTOBASSO _RES
22	8.80	174.445	131.295	8.649	5.294	lc1=3.19 lc=3.19	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
23	9.00	178.303	133.192	8.497	5.312	lc1=3.20 lc=3.20	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
24	9.20	182.161	135.089	8.349	5.330	lc1=3.21 lc=3.21	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	



25	9.40	186.019	136.985	8.206	5.349	lc1=3.21 lc=3.21	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
26	9.60	189.877	138.882	8.066	5.367	lc1=3.22 lc=3.22	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
27	9.80	193.735	140.779	7.930	5.385	lc1=3.23 lc=3.23	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
28	10.00	197.593	142.675	7.797	5.404	lc1=3.23 lc=3.23	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
29	10.20	201.451	144.572	7.668	5.423	lc1=3.24 lc=3.24	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
30	10.40	205.309	146.469	7.543	5.442	lc1=3.25 lc=3.25	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
31	10.60	209.167	148.365	7.420	5.461	lc1=3.25 lc=3.25	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
32	10.80	213.025	150.262	7.301	5.480	lc1=3.26 lc=3.26	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
33	11.00	216.883	152.159	7.185	5.500	lc1=3.27 lc=3.27	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
34	11.20	220.741	154.055	7.071	5.519	lc1=3.27 lc=3.27	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
35	11.40	224.599	155.952	6.960	5.539	lc1=3.28 lc=3.28	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
36	11.60	228.457	157.849	6.852	5.558	lc1=3.29 lc=3.29	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
37	11.80	232.315	159.745	6.747	5.578	lc1=3.29 lc=3.29	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
38	12.00	236.173	161.642	6.644	5.598	lc1=3.30 lc=3.30	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
39	12.20	240.031	163.539	6.543	5.618	lc1=3.31 lc=3.31	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
40	12.40	243.889	165.435	6.445	5.639	lc1=3.31 lc=3.31	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
41	12.60	247.747	167.332	6.349	5.659	lc1=3.32 lc=3.32	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
42	12.80	251.605	169.229	6.255	5.680	lc1=3.32 lc=3.32	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
43	13.00	255.463	171.125	6.163	5.701	lc1=3.33 lc=3.33	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
44	13.20	259.321	173.022	6.073	5.722	lc1=3.34 lc=3.34	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
45	13.40	263.179	174.919	5.985	5.743	lc1=3.34 lc=3.34	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
46	13.60	267.037	176.815	5.899	5.764	lc1=3.35 lc=3.35	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
47	13.80	270.895	178.712	5.815	5.785	lc1=3.35 lc=3.35	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
48	14.00	274.753	180.609	5.732	5.807	lc1=3.36 lc=3.36	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
49	14.20	278.747	182.641	5.648	5.828	lc1=2.75 lc=2.75	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
50	14.40	282.877	184.810	5.564	5.849	lc1=2.76 lc=2.76	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
51	14.60	287.007	186.979	5.480	5.870	lc1=2.76 lc=2.76	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
52	14.80	291.137	189.147	5.396	5.891	lc1=2.77 lc=2.77	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
53	15.00	295.267	191.316	5.312	5.912	lc1=2.77 lc=2.77	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
54	15.20	299.397	193.485	5.228	5.933	lc1=2.78 lc=2.78	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
55	15.40	303.527	195.653	5.144	5.954	lc1=2.78 lc=2.78	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
56	15.60	307.657	197.822	5.060	5.975	lc1=2.79 lc=2.79	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
57	15.80	311.617	199.821	4.976	5.996	lc1=3.16 lc=3.16	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
58	16.00	315.521	201.764	4.892	6.017	lc1=3.16 lc=3.16	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
59	16.20	319.425	203.707	4.808	6.038	lc1=3.17 lc=3.17	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
60	16.40	323.329	205.649	4.724	6.059	lc1=3.17 lc=3.17	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
61	16.60	327.233	207.592	4.640	6.080	lc1=3.18 lc=3.18	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
62	16.80	331.137	209.535	4.556	6.101	lc1=3.19 lc=3.19	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
63	17.00	335.041	211.477	4.472	6.122	lc1=3.19 lc=3.19	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
64	17.20	338.945	213.420	4.388	6.143	lc1=3.20	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB	--	



						lc=3.20							ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES		
65	17.40	342.849	215.363	5.614	2.931	lc1=3.20 lc=3.20	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
66	17.60	346.753	217.305	5.546	2.941	lc1=3.21 lc=3.21	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
67	17.80	350.657	219.248	5.479	2.950	lc1=3.21 lc=3.21	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
68	18.00	354.561	221.191	5.414	2.960	lc1=3.22 lc=3.22	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
69	18.20	358.465	223.133	5.349	2.969	lc1=3.22 lc=3.22	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
70	18.40	362.369	225.076	5.285	2.979	lc1=3.23 lc=3.23	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
71	18.60	366.273	227.019	5.223	2.989	lc1=3.23 lc=3.23	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
72	18.80	370.177	228.961	5.162	2.999	lc1=3.24 lc=3.24	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
73	19.00	374.081	230.904	5.101	3.009	lc1=3.24 lc=3.24	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
74	19.20	377.985	232.847	5.042	3.019	lc1=3.25 lc=3.25	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
75	19.40	381.889	234.789	4.984	3.029	lc1=3.25 lc=3.25	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
76	19.60	385.793	236.732	4.926	3.039	lc1=3.26 lc=3.26	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	
77	19.80	389.697	238.675	4.870	3.049	lc1=3.26 lc=3.26	0.8794671	0.000	0.000	0.170	0.129	--	TERRENO_NON_SUSCETTIB ILE_DI_LIQUEFAZIONE_RES	--	

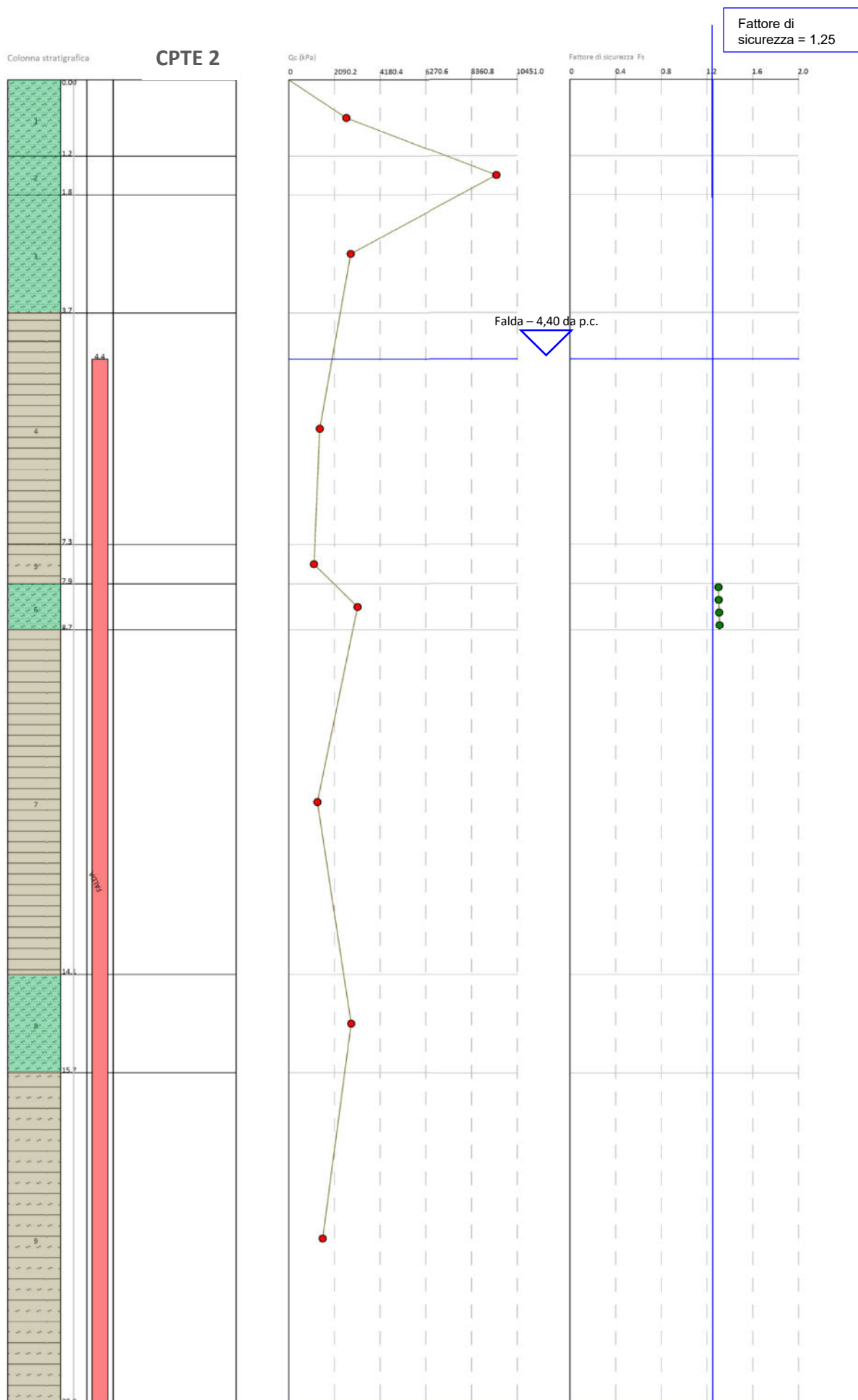
**Il valore dell'Indice del Potenziale di liquefazione PL (metodo di Iwasaki) risulta =0,0 con Zcrit=15 m.
 Rischio = MOLTO BASSO**

Nel grafico successivo viene riportato, da sinistra:

- La colonna stratigrafica risultante dalla elaborazione della prova penetrometrica esaminata ed anche il medesimo schema stratigrafico semplificato, a colori, già visto in precedenza al capitolo 3.2;
- Il tracciato di Qc (in kPa);
- Il livello della prima falda alla profondità di metri 4,40 dal p.c.; è stata eseguita la verifica di liquefazione su tutti gli strati di 20 cm. di spessore, posti sotto la superficie freatica, indipendentemente dal contenuto di frazione sabbiosa.
- A destra viene indicato il Fattore di Sicurezza di Norma = 1,25 e i valori del Fattore di sicurezza F0 per ogni strato valutato. Si può osservare:
 - o Tutti i livelli esaminati evidenziano la **NON SUSCETTIBILITA' DI LIQUEFAZIONE**;
 - o La verifica dello strato limoso sabbioso, posto tra m. 8,00 e 8,60, evidenzia un fattore di sicurezza superiore a 1,25, con rischio **MOLTO BASSO**.

In base ai risultati emersi dalla verifica si può affermare che il rischio della potenziale liquefazione dei terreni con effetto sismico, considerando una Magnitudo di riferimento pari a 6,0, risulta MOLTO BASSO.





5.7 Stima della Q_{lim} .

La *capacità portante* (o *carico limite*, q_{lim}) rappresenta la pressione massima che una fondazione può trasmettere al terreno prima che questo raggiunga la rottura.

Il carico limite dipende, quindi, dalla larghezza della fondazione, B e dall'angolo di resistenza al taglio del terreno, φ ; dipende inoltre da:

- coesione, c ;
- peso proprio del terreno, γ , interno alla superficie di scorrimento;
- sovraccarico presente ai lati della fondazione (pari a $q = \gamma \cdot D$ in assenza di carichi esterni sul piano campagna).

L'elaborazione è stata effettuata, prendendo come riferimento rappresentativo per l'area di intervento la prova CPT 1/2020, utilizzando il programma Static Probing (GEOSTRU).

Nell'ambito del presente documento viene attuata una prima stima indicativa della pressione ammissibile massima, esclusivamente sulla base dei dati geologici conosciuti e tenendo conto di indicative caratteristiche di fondazioni superficiali rettangolari (platea).

Si sottolinea e si rimarca che si tratta di una pura e semplice indicazione; per l'edificio in questione, sarà necessario l'adeguato approfondimento, in funzione delle reali caratteristiche costruttive, da eseguirsi nella sede opportuna.

DATI GENERALI FONDAZIONE SUPERFICIALE

Tipo: Rettangolare
Larghezza: 22,3 m
Lunghezza: 52,0 m
Immorsamento: 4,00 m

Peso di volume sopra piano posa: 1,99 t/m³ (19.5 kN/m³)

Peso di volume sotto piano posa: 2,04 t/m³ (20 kN/m³)

Carico agente sulla fondazione: 1.2 Kg/cm² (117,68 kPa)

Valore di q_c minimo: 11,7 Kg/cm² (1150 kPa)

Fattore di sicurezza: 2

Terreno prevalentemente: Coesivo

Il calcolo della portanza limite e ammissibile di fondazioni superficiali è stato eseguito secondo le teorie degli autori sotto riportati:

- Terzaghi & Peck
- Meyerhof
- Schmertmann
- Herminier

CARICO LIMITE

TERZAGHI 1,76 Kg/cm² (172,60 kPa)

SCHMERTMANN 5,28 Kg/cm² (517,79 kPa)

MEYERHOF 3,96 Kg/cm² (388,34 kPa)

CARICO AMMISSIBILE

TERZAGHI 0,88 Kg/cm² (86,30 kPa) **NO**

SCHMERTMANN 2,64 Kg/cm² (258,90 kPa) **OK**

MEYERHOF 1,98 Kg/cm² (194,17 kPa) **OK**

HERMINIER 1,17 Kg/cm² (115,00 kPa) **NO**

Dalle valutazioni e sulla base delle ipotesi assunte, risulta che il carico agente sulle fondazioni pari a 1,2 kg/cm², adottando un fattore di sicurezza 2, è verificato secondo le relazioni indicate.



I cedimenti, calcolati con la teoria del modulo edometrico secondo SCHMERTMANN, in relazione al carico agente sulle fondazioni pari a 1,2 kg/cm², hanno restituito i seguenti valori:

CEDIMENTI

z: Profondità di calcolo (m)
q: Sovraccarico a metà strato (Kg/cm²)
qc: Resistenza punta (Kg/cm²)
Mo: Modulo Edometrico (Kg/cm²)
w: Cedimento (cm)

Strato	z	q	qc	Mo	w
1	0,6	0,038621	2,635583	5,271082	0
2	1,51	0,037127	9,500329	19,00036	0
3	2,74	0,035265	2,835107	5,670124	0
4	5,5	0,031716	1,418986	4,748323	2,438
5	7,63	0,029422	1,153387	4,564122	0,4
6	8,31	0,028764	3,149863	6,299626	0,333
7	11,39	0,026101	1,310073	4,712038	3,008
8	14,88	0,023623	2,856645	5,713199	0,641
9	18,26	0,021631	1,551992	4,71863	2,393

Totale cedimento (teorico): 9,213 cm.
Totale cedimento (reale): 6,909 cm.
Totale cedimento (reale per fondazione rigida): 5,438 cm.

In sede di relazione geotecnica dovranno essere eseguite le verifiche allo SLU di tipo geotecnico (GEO) nei confronti del collasso per carico limite dell'insieme fondazione – terreno, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II, 6.4.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC-18), di seguito riportate.

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Q8}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G4}

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

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.4.I – Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali

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



6. CONCLUSIONI.

Lo scopo della presente relazione era quello di caratterizzare dal punto di vista geologico l'area ubicata nel Comune di Forlì, Via Autoparco, in cui si prevede la costruzione di un nuovo edificio ad uso residenziale, di edilizia pubblica, con 28 alloggi, di forma rettangolare, dimensione di metri 52,0 x 22,30 con quattro piani fuori terra e piano interrato per ricovero autoveicoli.

Per l'area in oggetto, sono stati esaminati:

- i caratteri geologici, morfologici, idrogeologici e sismici;
- la categoria sismica del suolo, le azioni sismiche e la propensione alla liquefazione;
- i principali parametri fisico meccanici dei terreni;
- in via preliminare, la pressione ammissibile sul terreni e i correlati cedimenti.

Da quanto fin qui relazionato e sulla base dei dati conosciuti, si può affermare la fattibilità geologica del progetto.

Forlì, 13/01/2022

il geologo
Dott. Piero Feralli



ALLEGATO 1 - "ELABORATI CARTOGRAFICI"

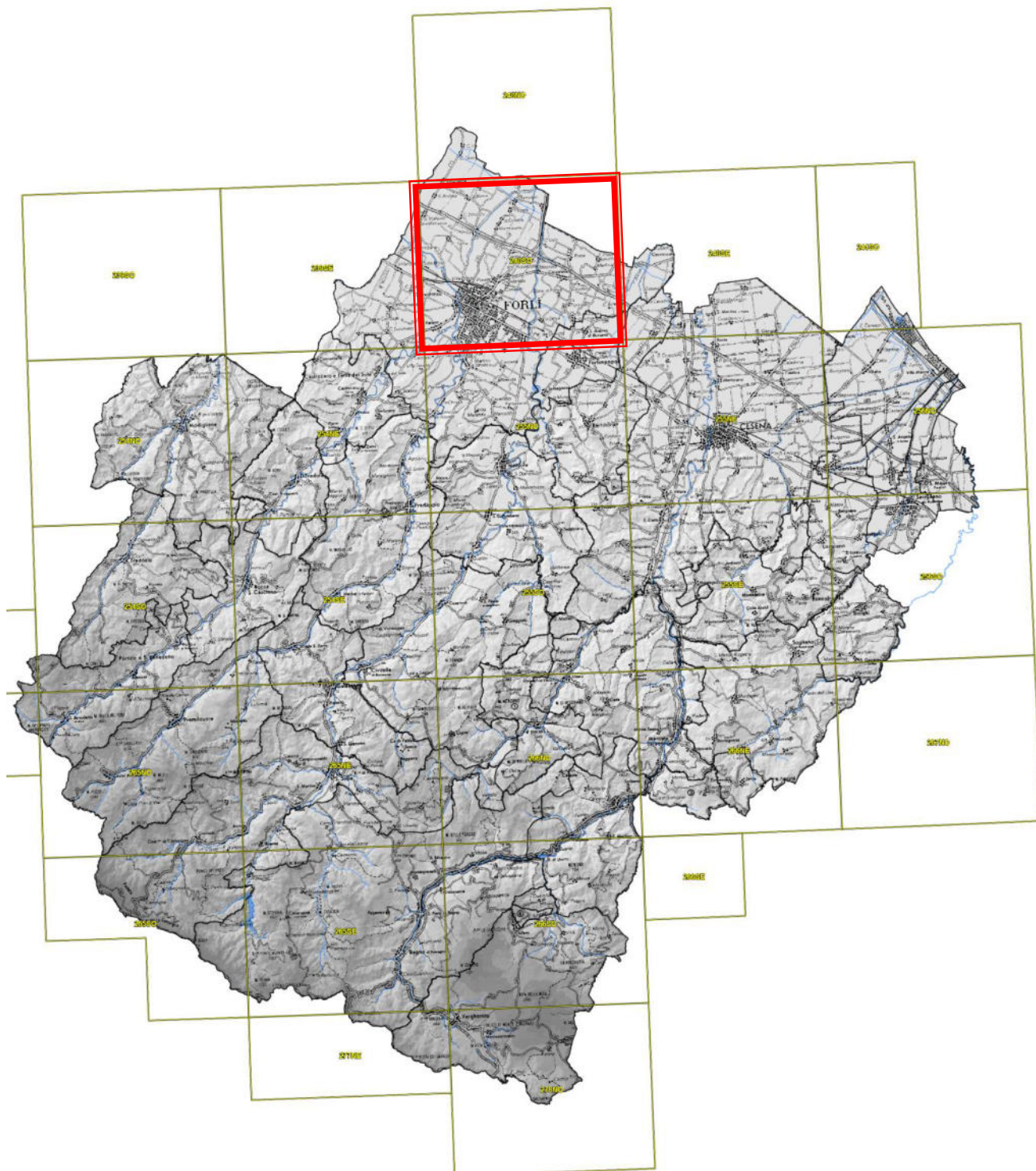
stralcio dalla Carta Topografica Regionale, in scala 1:25.000 (TAVOLA 1);

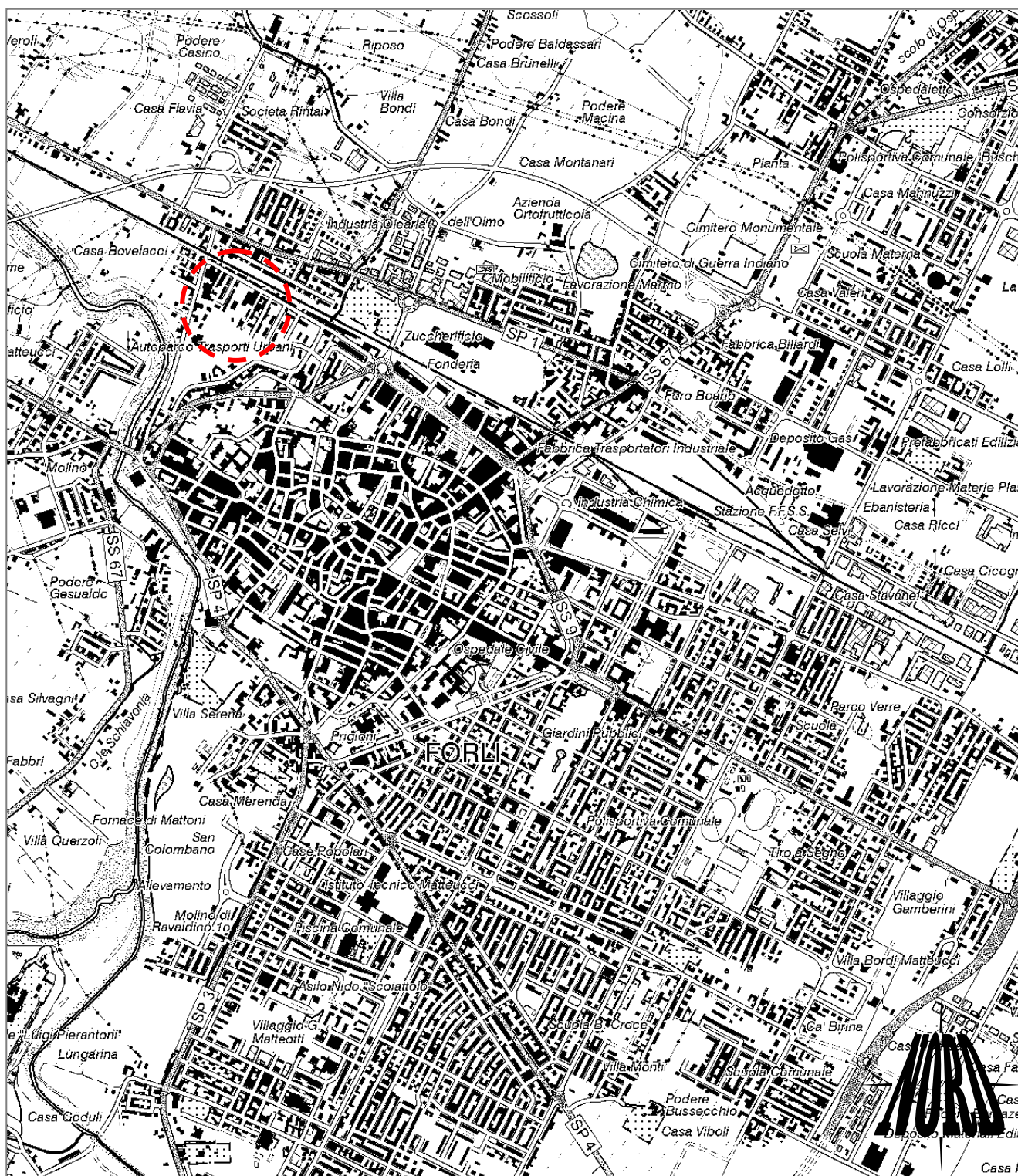
stralcio dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 (TAVOLA 2);.

stralcio della planimetria catastale in scala 1: 2.000 (TAVOLA 3);

carta geologica di inquadramento in scala 1:5.000 (TAVOLA 4);

planimetria con ubicazione delle prove prese a riferimento (TAVOLA 5).





COROGRAFIA DI INQUADRAMENTO – scala 1:25.000

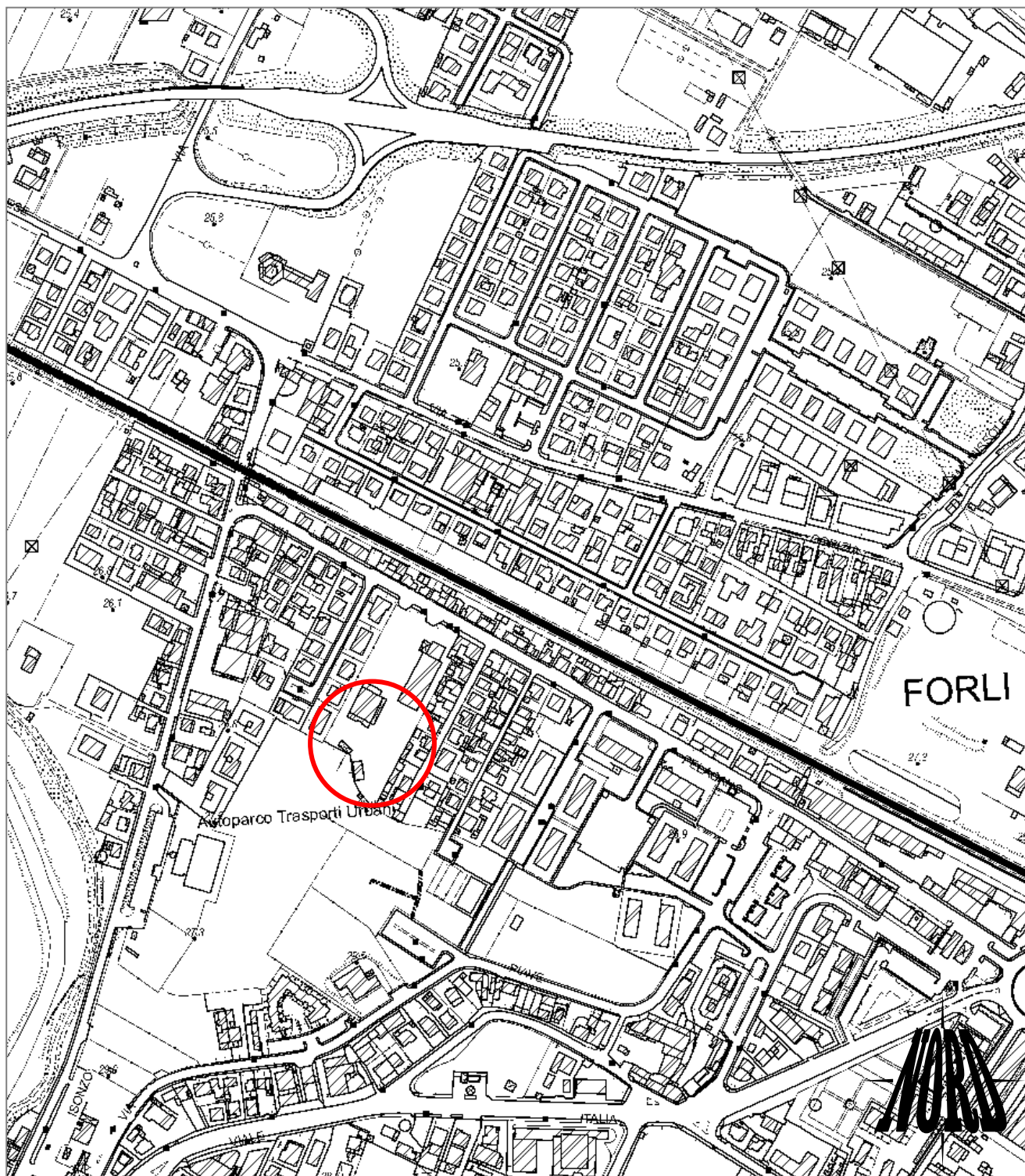
TAV.1

dalla Carta Topografica Regionale - Tav. 240 S.O. "FORLÌ" "

Legenda:

Area oggetto di indagine





INQUADRAMENTO PLANIMETRICO - scala 1:5.000

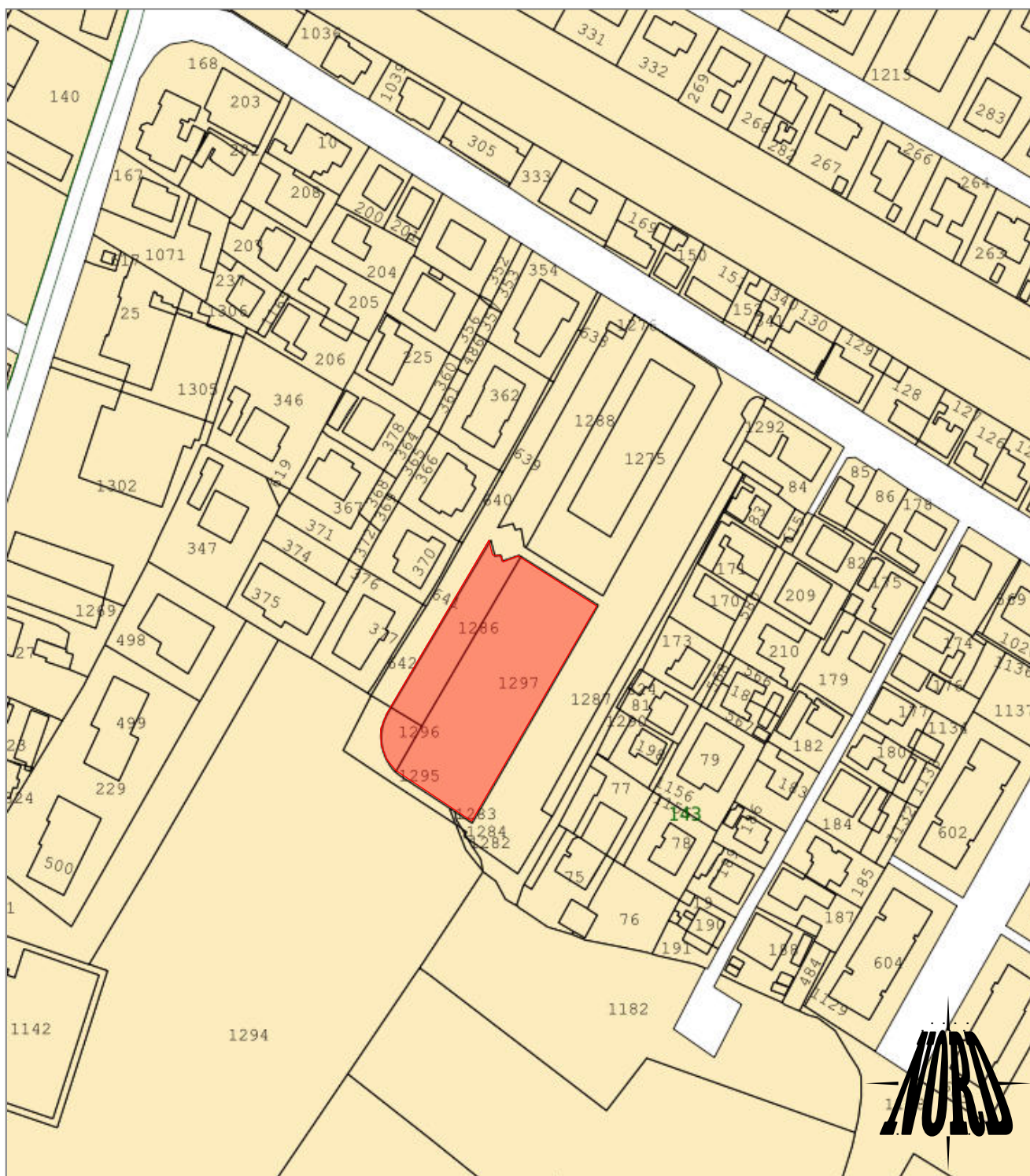
TAV.2

dalla Carta Tecnica Regionale - Elemento 240134 "Forlì nord ovest"

Legenda:

Edificio interessato dal progetto





PLANIMETRIA CATASTALE - scala 1:2.000

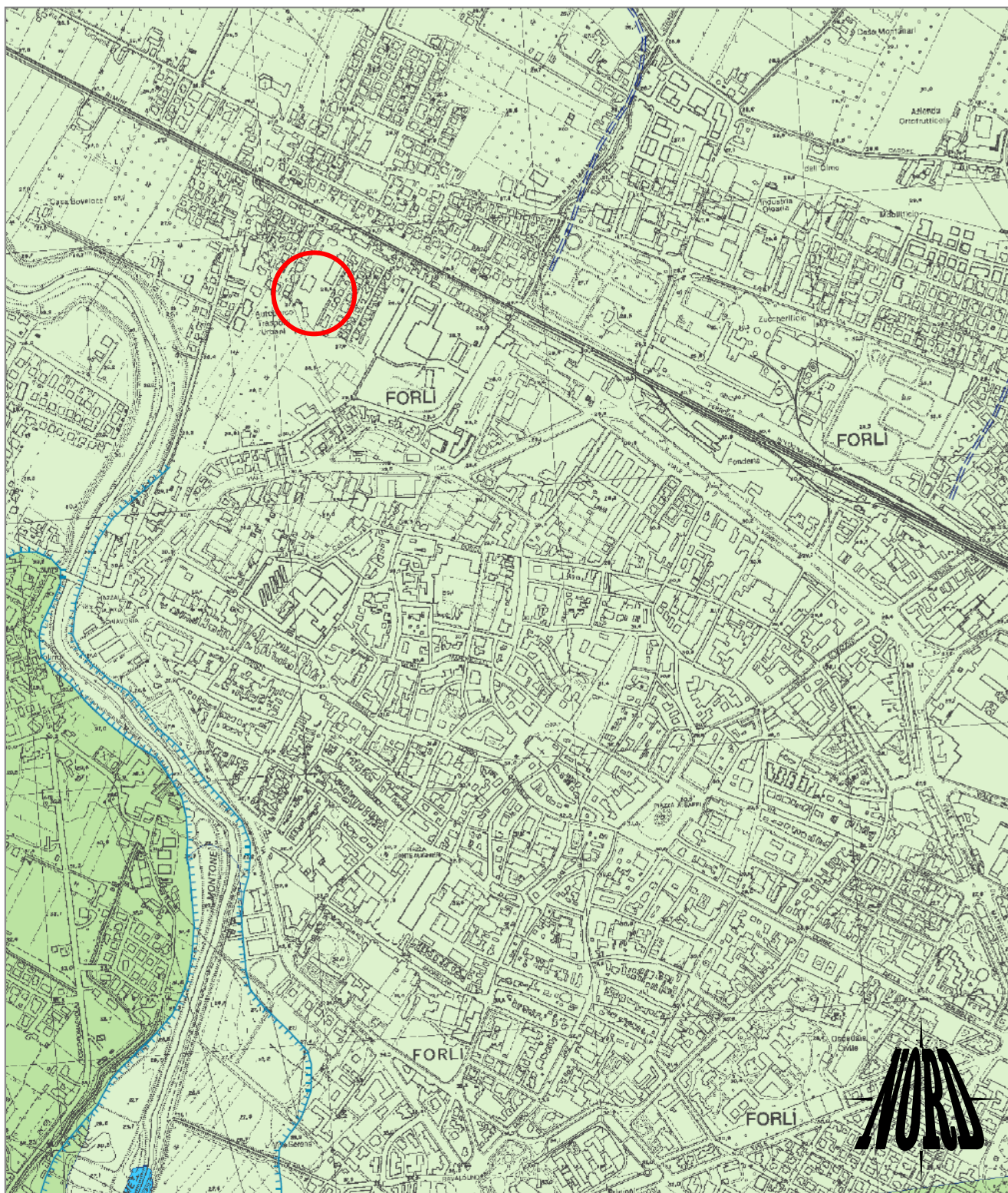
TAV.3

dalla Mappa del Comune di Forlì - Foglio 143

Legenda:

Area interessata dal progetto





CARTA GEOLOGICA - scala 1:10.000

TAV.4a

dalla sezione 240130 "Forlì" della Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo

Legenda:



Area oggetto di indagine




SEZIONE 240130 - FORLÌ

DESCRIZIONE DELLE UNITÀ GEOLOGICHE PRESENTI IN CARTA (solo quelle rappresentate in forma poligonale)

Depositi quaternari continentali

-  b1 - Deposito alluvionale in evoluzione
-  h3 - Cava

Successione neogenica - quaternaria del margine appenninico padano

-  AES8 - Subintesa di Ravenna
-  AES8a - Unità di Modena
-  FAA - Argille Azzurre

In Provincia di Forlì-Cesena

Depositi quaternari continentali

b1 - Deposito alluvionale in evoluzione

Ghiaie, talora embricate, sabbie e limi argillosi di origine fluviale, attualmente soggetti a variazioni dovute alla dinamica fluviale; detrito generalmente incoerente e caotico, costituito da clasti eterometrici ed eterogenei, talora arrotondati, in matrice sabbiosa, allo sbocco di impluvi e valli secondarie. Sono talora fissati da vegetazione (b1a).

h3 - Cava

Successione neogenica - quaternaria del margine appenninico padano

AES8 - Subintesa di Ravenna

Ghiaie da molto grossolane a fini con matrice sabbiosa, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi, limi e limi sabbiosi, rispettivamente depositi di conoidi ghiaiosi, intravallivi terrazzati e di interconoidi. Argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di traccimazione fluviale (piana inondabile, argine, e traccimazioni indifferenziate). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte rettilinea, corrispondente al piano topografico. A tetto suoli, variabili da non calcarei a calcarei, a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente meno di 150 cm, e a luoghi parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallo-bruno. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a, nel sottosuolo della pianura: depositi argillosi e limosi grigi e grigio scuri, arricchiti in sostanza organica, di piana inondabile non drenata, palude e laguna passanti, verso l'alto, a limi-sabbiosi, limi ed argille bruni e giallastri di piana alluvion. Il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsistemi e sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità circa 28 metri.

Pleistocene sup. - Olocene

AES8a - Unità di Modena

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoidi e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (meno di 100 cm). Può ricoprire resti archeologici di età romana del VI secolo d.C. Limite inferiore incoerente, marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonato a parzialmente carbonatato contenente resti archeologici di età dal Neolitico al Romano. Lo spessore massimo dell'unità è generica.

Olocene

FAA - Argille Azzurre

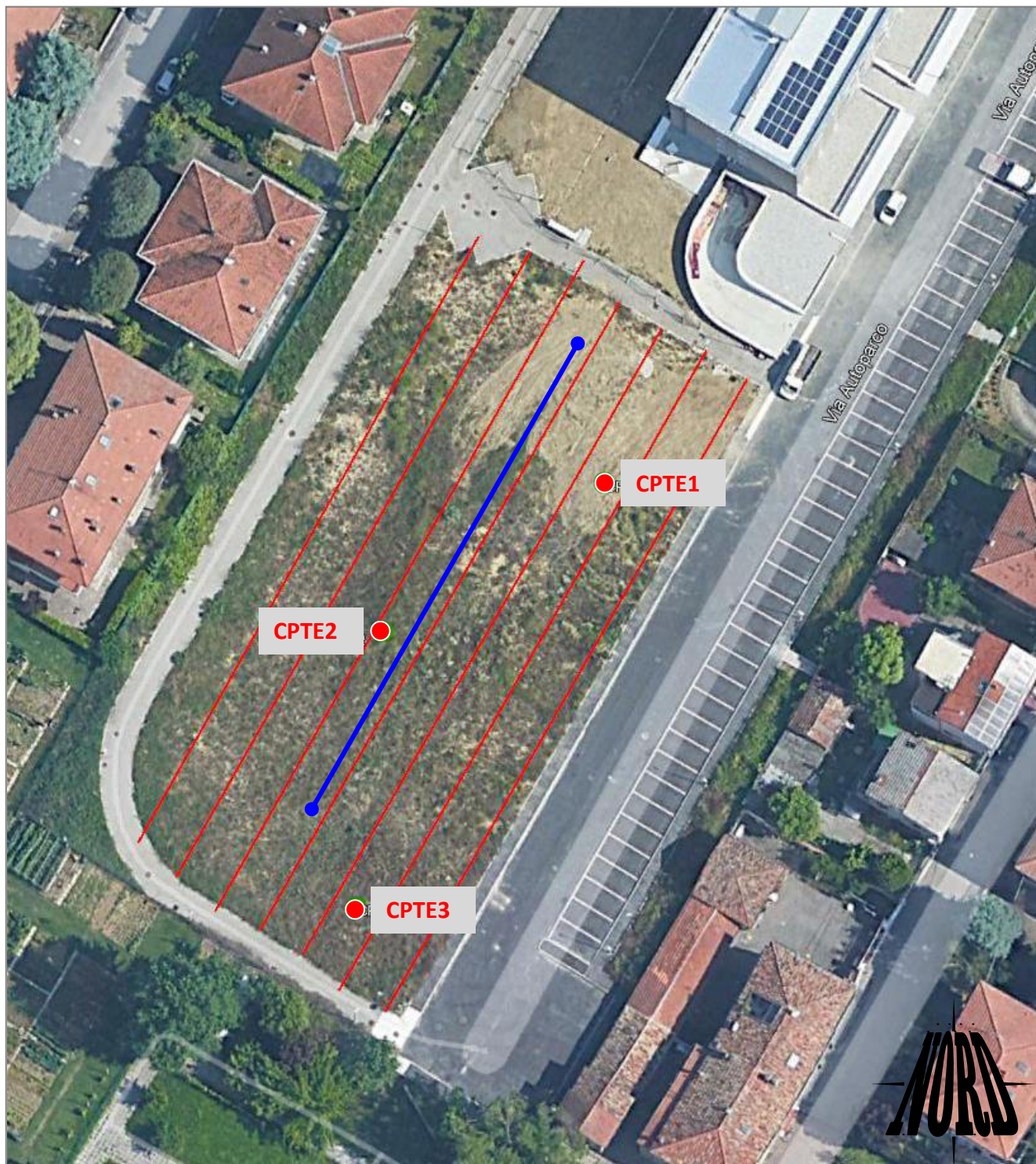
Argille, argille marnose, localmente siltose, marni argillose e siltose, grigie e grigio-azzurre, talora grigio plumbeo, a stratificazione mai distinguibile per bioturbazione; locali intercalazioni di sabbie fini in strati sottili o medi. Talora livelli a slump. Nella parte inferiore della formazione localmente sono presenti sottili livelli discontinui di biocalcarenti fini e siltiti gialli, o ocra se alterate, sottilmente laminati. Frequenti microfossili; variabile la concentrazione di malacofauna a Gasteropodi e Lamellibranchi, sia come biosomi che come bioclasti. Presenti anche blocchi di aq (AQV-Formazione di Acquaviva), costituita da torbiditi arenaceo-marnoso-pellicole con marni a forte componente carbonatica. L'ambiente di sedimentazione varia da piattaforma, localmente litorale, a scarpata. Foraminiferi planctonici appartenenti nei vari livelli alle zone a Globorotalia margaritae, G. punctulata, G. bononiensis, G. crassaformis, G. inflata e Hyaline baltica. Contatto inferiore graduale rapido su CEA, paraconcordante o marcato da una lieve discordanza angolare su FCO, discordante su unità più antiche. Potenza fino a 1000 m circa.

Pliocene inf. - Pleistocene inf.

LEGENDA DELLA CARTA GEOLOGICA - scala 1:10.000

TAV.4b





UBICAZIONE PUNTI PROVA (immagine da Google Earth)

TAV.5

Legenda: Ubicazione delle indagini eseguite nell'ambito del presente studio.

Prova penetrometrica CPTE ●

Rilievo geofisico MASW —●—

Rilievo geoelettrico —



ALLEGATO 2 - "PROVE GEOGNOSTICHE"

PROVE PENETROMETRICHE STATICHE

Caratteristiche strumentali Penetrometro statico Pagani TG 63-200:

- *cingolato gommato*,
- *potenza = 23 HP*,
- *max pressione operativa = 240 bar*,
- *forza di infissione = 200 kN*
- *coppia di ancoraggio = 160 kgm*,

Caratteristica della batteria

- *lunghezza delle aste = 1,00 m.*,
- *diametro = 20 mm.*
- *punta = tipo elettrico*,
- *angolo della punta = 60°*,
- *superficie della punta = 10 cmq*
- *superficie del manicotto = 150 cmq.*

CPTE 1 – Prova penetrometrica statica n. 1: 4/11/2021
Profondità di prova: metri 20,33 dal p. c.
Livello prima falda: - 4,40 da p. c.



CPTE 2 – Prova penetrometrica statica n. 2: 4/11/2021
Profondità di prova: metri 20,87 dal p. c.
Livello prima falda: - 4,40 da p. c.



CPTE 3 – Prova penetrometrica statica n. 3: 4/11/2021
Profondità di prova: metri 19,88 dal p. c.
Livello prima falda: - 4,40 da p. c.





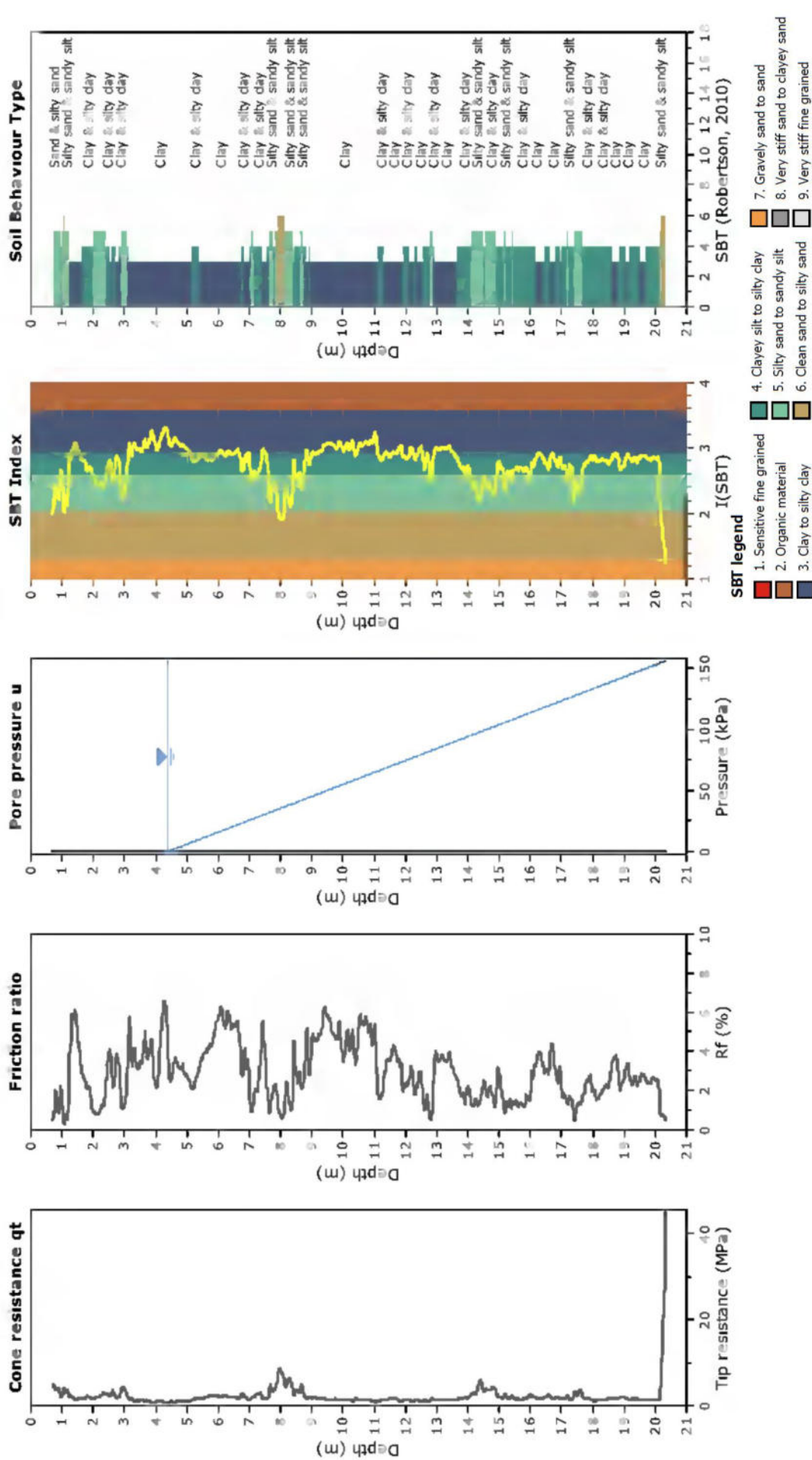
Lab.Geo
 di Scaparrotti dott. Roberto
 47922 Rimini via Coletti 82a
 tel 3200 555 670 scaparrotti.roberto@libero.it



GEOLOGISMIKI
 Geotechnical Software

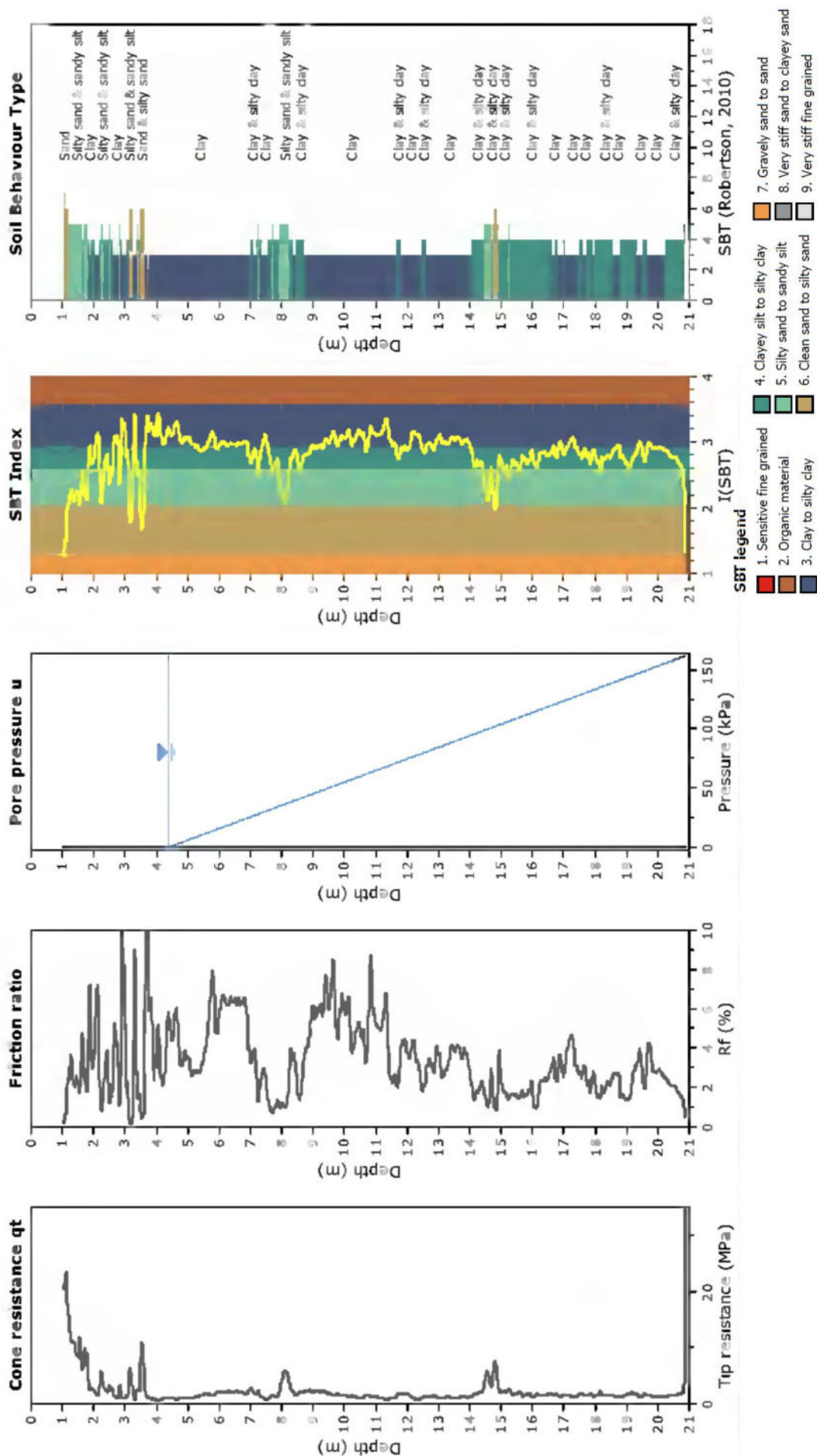
Project: CPTE
Location: Forlì, via Autoparco

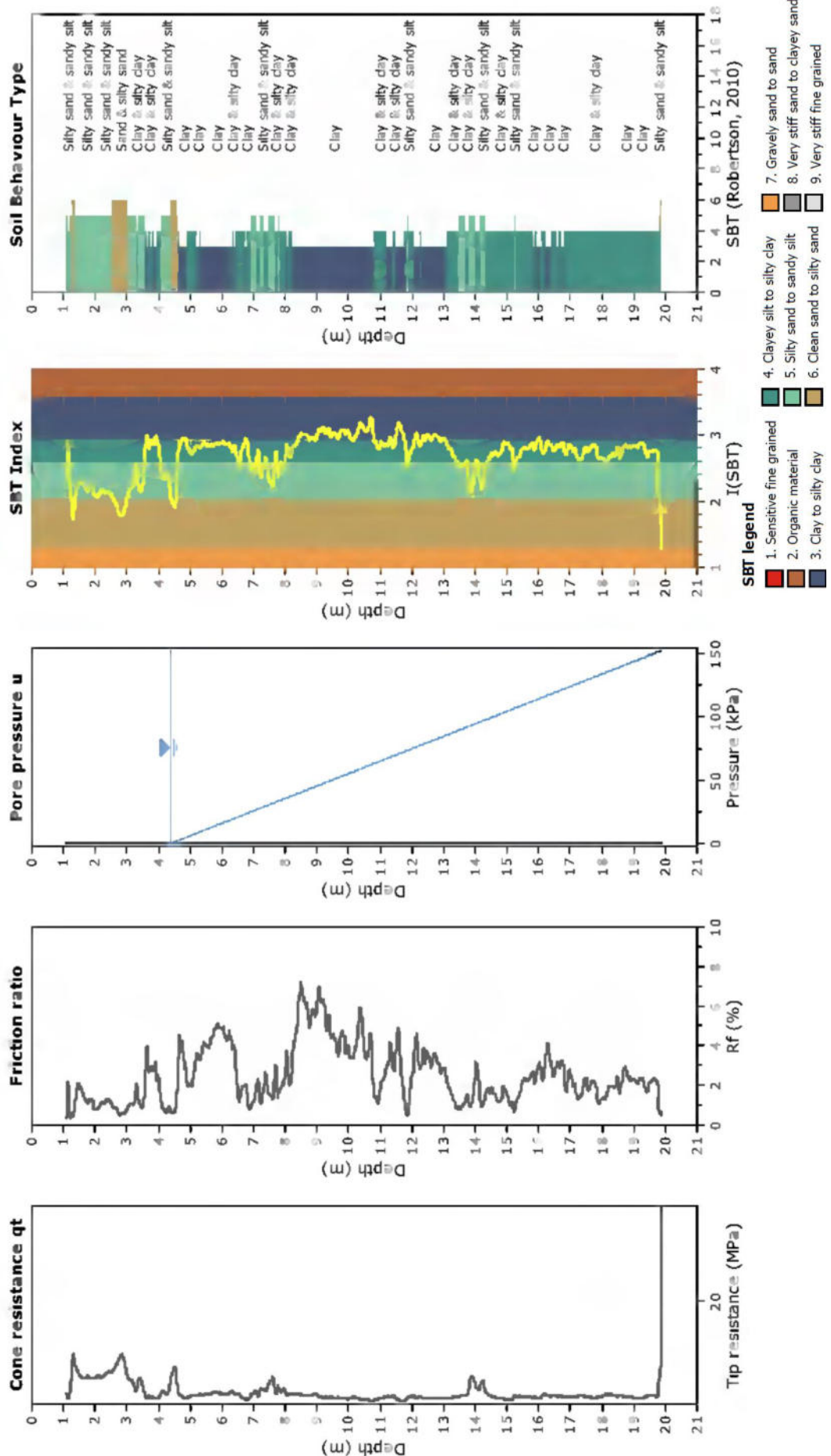
CPT: 1
 Total depth: 20,33 m



CPT: 2
 Total depth: 20.87 m

Project: CPTE
Location: Forlì, via Autoparco





COMMITTENTE:

FERALLI E MENDOLA ASSOCIATI
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale
di Piero Feralli e Elena Mendola - Geologi
Via Bella n. 6 -47121 Forlì (FC)

COMMESSA:

Esecuzione di indagini di tomografia elettrica ERT
Valutazione V_{s_n} con metodologia MASW

TITOLO:

INDAGINI GEOFISICHE
VIA AUTOPARCO

LOCALITA':

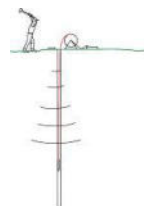
via Autoparco
FORLÌ (FC)

DATA:

Dicembre 2021

Via S. Cattania, 1/a
41012 Carpi (MO)

info@tecnogeofisica.com
www.tecnogeofisica.com



Committente:
 FERALLI E MENDOLA ASSOCIATI
 Studio di Geologia Tecnica e Ambientale
 di Piero Feralli e Elena Mendola - Geologi
 Via Bella n. 6 -47121 Forlì (FC)

Intervento:
 Tomografia elettrica ERT
 Indagine MASW

Località:
 via Autoparco
 Forlì (FC)

INDICE

PREMESSA	2
Electrical Resistivity Tomography (ERT)	5
Strumentazione utilizzata	6
Calcolo della resistività del terreno	7
Il Metodo Geoelettrico Tomografico (ERT) 3D	7
Restituzioni tomografiche Piano X-Y	12
Restituzioni tomografiche Piano X-Z	16
Restituzioni tomografiche Piano Y-Z	19
Osservazioni sulle restituzioni tomografiche elettriche ERT	25
Documentazione fotografica	26
Indagine MASW	28
Caratteristiche attrezzatura	29
Cenni sulla tecnica MASW	30
Interpretazione dati acquisiti	33
Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{s30})	36
Allegati Intervento	37
Ubicazione indagine	37
Scheda MASW	38

PREMESSA

Nel mese di dicembre 2021, su commissione di:

FERALLI E MENDOLA ASSOCIATI
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale
di Piero Feralli e Elena Mendola - Geologi
Via Bella n. 6 -47121 Forlì (FC)

Sono state effettuate:

- **7 linee di tomografia elettrica 2D**
- **1 indagine sismica tipo MASW (*Multichannel Spectral Analysis of Waves*)**

in via Autoparco a Forlì (FC), in merito alla Relazione geologica per la costruzione di nuovo fabbricato da 28 alloggi, area ex Autoparco, in via Autoparco a Forlì (FC).

Lo scopo delle linee di tomografia elettrica è di ottenere informazioni rispetto all'eventuale presenza di materiale antropico e/o di riporto nei primi metri di terreno, mentre l'indagine MASW è indirizzata a misurare le velocità delle onde sismiche (V_s) del sottosuolo e la valutazione del parametro $V_{s,eq}$.

Il centro del lotto in studio è identificato circa alle coordinate: Lat. 44,231496 – Long. 12,033198.

Le indagini sono state ubicate come indicato dalla committenza e riportato nelle schede allegate a fine testo.



Figura 1 Ubicazione area di indagine



Figura 2 Lotto in studio



Caratteristiche delle indagini eseguite:

Tomografia elettrica ERT 2D

Nome	Num elettrodi	Spaziatura elettrodi m	Lunghezza linea m	Array utilizzato
L1	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L2	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L3	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L4	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L5	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L6	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo
L7	48	1,5	70,5	Dipolo - Dipolo

Sismica MASW

Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza stendimento m	Offset m	Lunghezza complessiva m	Ubicazione centro indagine
MASW	24	2,0	46	10	56	Lat. N 44,231496 Long. E 12,033203

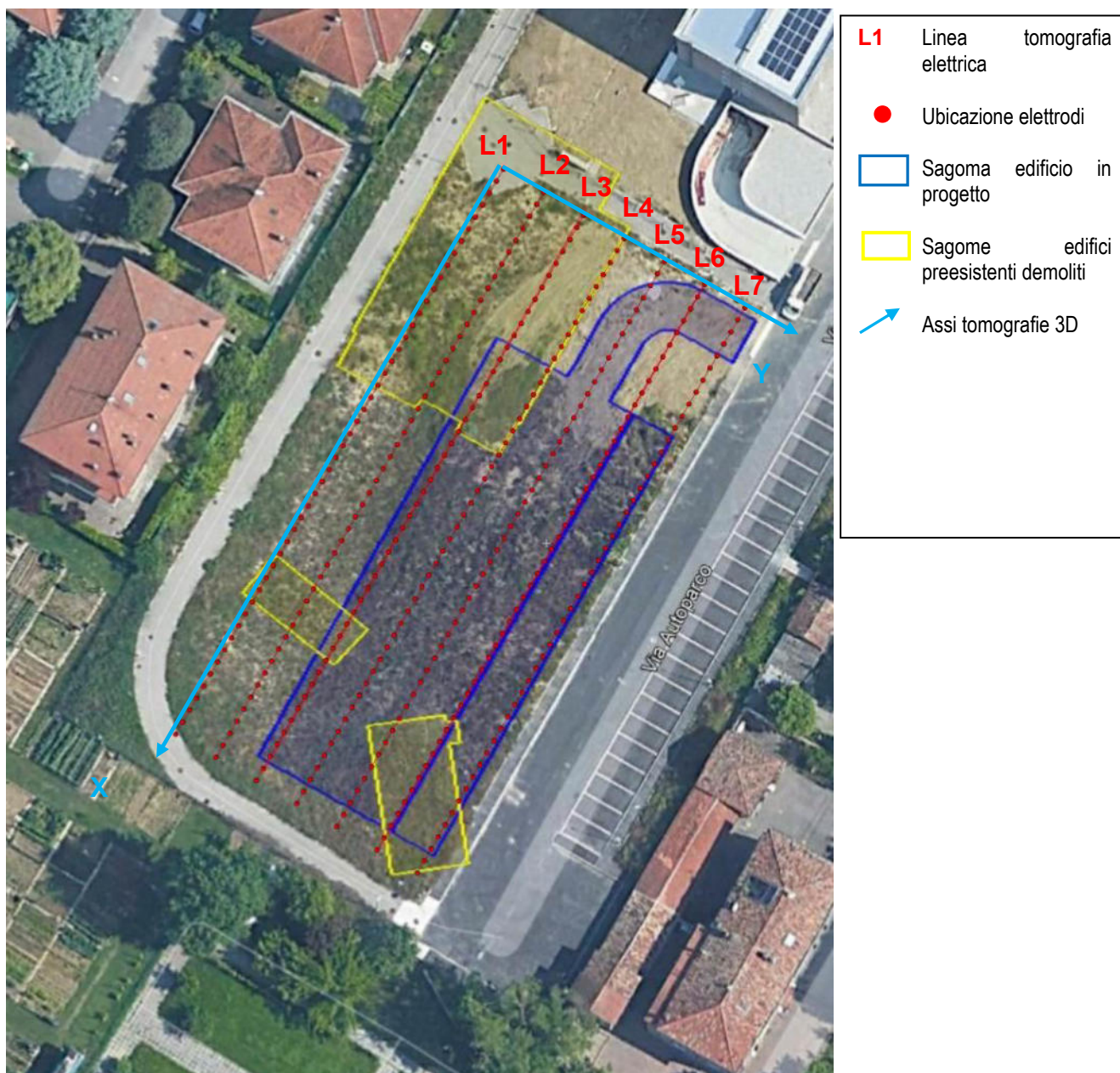


Figura 3 Ubicazione elettrodi

Dal punto di vista operativo l'area si presenta pianeggiante.

Per l'acquisizione dei dati sono state eseguite sette linee di tomografia elettrica in 2D parallele, con spaziatura tra gli elettrodi di 1,5 m, e 5 metri tra le linee, in modo da ottenere un discreto dettaglio in base alle possibilità operative e alle indicazioni del committente.

Le linee sono numerate dalla L1 alla L7, ogni linea acquisisce 1272 data points per complessivi 8904 data points totali nell'area.

Le linee sono sviluppate parallelamente a via Autoparco e linea L7 è distante 2,20 metri dal bordo del marciapiede che si trova a est dell'area, in via Autoparco. Tutte le linee iniziano a nord in corrispondenza del limite del lotto al bordo della pista pedonale e ogni linea dista 5 metri dalla precedente. Successivamente alla acquisizione in 2D di ogni linea, si è proceduto tramite apposito software *ErtLab64* ad una elaborazione 3D dei dati, in modo da ottenere un volume di restituzione a forma di rettangolo di 70,5 m x 30 m.

Electrical Resistivity Tomography (ERT)

Tra i metodi geofisici utilizzati con maggior efficacia in campo geologico - ambientale, grazie alla loro sensibilità alle variazioni di porosità e di contenuto e di composizione chimica dell'acqua sotterranea, all'interno dei terreni indagati, figurano quelli elettrici, magnetici ed elettromagnetici.

Nell'ambito delle prospezioni geofisiche gli elementi che caratterizzano i terreni sono la resistività o resistenza specifica, che dipende dalla loro composizione litologica, stato di aggregazione, grado di saturazione in acqua e resistività di quest'ultima.

Dette proprietà sono utilizzate nella prospezione geoelettrica per determinare, mediante misure di superficie, la successione degli strati elettricamente differenziati presenti nel sottosuolo.

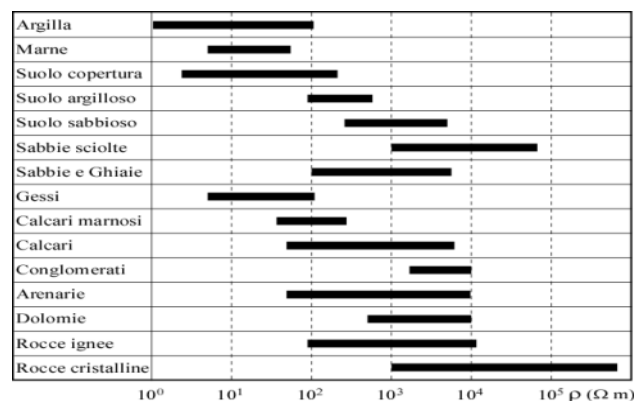


Figura 4: valori indicativi della resistività di alcuni litotipi (Ohm*m)

Per distinguere un determinato livello, all'interno di una successione litologica che lo include, è necessario che i rapporti di resistività siano relativamente elevati e che il rapporto spessore - profondità del tetto sia $\geq 0,35$. Lo studio geoelettrico dell'area da indagare è realizzato mediante Tomografia Elettrica Automatizzata di Superficie (Electrical Resistivity Tomography). La tomografia elettrica di superficie (E.R.T.) si basa sull'acquisizione di un elevato numero di misure elettriche, realizzate con elevato numero di elettrodi posizionati sul terreno, disposti lungo un profilo.

La ricostruzione della sezione tomografica verticale e quindi del profilo di terreno investigato, è effettuata tramite appositi software di elaborazione che utilizzano il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

Il terreno al di sotto degli elettrodi, è così suddiviso idealmente in un numero finito di maglie o celle (i cosiddetti "elementi finiti"), con ciascuna "cella" a resistività omogenea ed incognita.

La forma degli elementi è generalmente trapezoidale o rettangolare e le loro dimensioni sono determinate in base alla distanza tra gli elettrodi (metà della spaziatura tra due elettrodi adiacenti).

La tomografia elettrica di superficie si basa quindi, sull'acquisizione di elevato numero di misure elettriche, effettuate con numerosi elettrodi infissi solidalmente nel terreno, lungo un profilo in genere rettilineo. La determinazione della resistività di ciascuna cella non è lineare, l'errore da minimizzare può presentare molti minimi locali, questo comporta, una volta definita la soglia di errore nei dati sperimentali, la possibilità di ottenere più di una soluzione che soddisfa l'equazione. Allo scopo di ottenere l'errore minimo assoluto (quindi quello che si avvicina maggiormente alla soluzione teorica dell'equazione) si utilizzano metodologie di calcolo in grado di fissare il campo di variazione della resistività degli elementi finiti.

Strumentazione utilizzata

Per l'indagine è stato utilizzato il georesistivimetro SYSCAL JUNIOR **Switch-72** della IRIS Instruments

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono:

OUTPUT CURRENT SPECIFICATIONS

- Automatic ranging (microprocessor controlled)
- Intensity: up to 1250 mA
- Voltage: up to 400 V (800 V peak to peak)
- Power: up to 100 W
- Selectable cycle time of 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0,5 % typical

INPUT VOLTAGE SPECIFICATIONS

- 2 simultaneous reception channels
- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance : 100 MO
- Input voltage protection up to 1000V, range from -15 V to +15 V
- Power line rejection
- Voltage measurement precision: 0.5 % typical
- Noise reduction: continuous stacking selectable from 1 to 255 stacks
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Resistivity accuracy: 0,5 % typical
- Induced polarization (chargeability) measured JUNIOR **Switch-72** over 20 predefined windows
- Chargeability accuracy: 1 % of measured value for input voltage higher than 10 mV

GENERAL SPECIFICATIONS

- Weight: 13.8 kg
- Dimensions: 31 x 23 x 38 cm
- Weather proof
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- LCD display with 4 lines of 20 characters
- Data flash memory : more than 44 800 readings
- USB and serial link RS-232 for data download
- Possibility of data storage on external SD card with a capacity of 7 000 000 readings (option)
- Power supply: two internal rechargeable 12V 7.2 Ah batteries ; optional external 12V backup car battery for transmitter power
- Autonomy with internal battery: several thousands of readings
- Weight of a 18 takeout multi-core cable on a reel: about 15 kg (for 5m spacing)
- Emergency push button for security

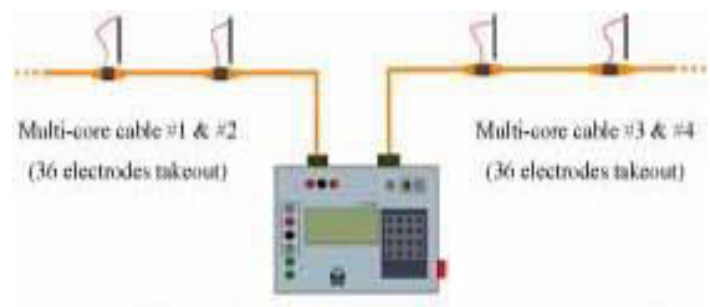
La strumentazione utilizzata per le indagini ERT è dotata di:

- Cavi di connessione multipolari da 24 stack ognuno
- Picchetti in acciaio lunghi 50 cm

Nel cantiere in oggetto sono state utilizzate due "catene" da 24 elettrodi ciascuna, per un totale di 48 elettrodi.



SYSCAL



FIELD LAY-OUT di esempio che utilizza 2 catene (cavi) da 36 elettrodi



Esempio generico di disposizione strumentazione in campagna

Calcolo della resistività del terreno

Il calcolo della resistività è apparentemente semplice e può essere risolto con la conoscenza dei seguenti elementi:

- 1) posizione degli elettrodi (2 elettrodi di corrente [c1 e c2 o indicati anche come elettrodi A e B] e 2 di potenziale [p1 e p2 o M / N] in genere interni agli altri 2 o in posizioni differenti a secondo della geometria adottata)
- 2) valore della corrente (I) introdotta e la differenza di potenziale ΔV misurata tra gli elettrodi di potenziale.

Quindi la RESISTENZA elettrica (R) che si misura è:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Da questo valore “strumentale” è possibile conoscere la resistività apparente (ρ_a) di un determinato strato del sottosuolo, a seconda della disposizione del quadripolo che si è scelto di utilizzare,

$$\rho_a = K \times R = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

ove K = dipende dalla disposizione elettroica.

Nei sondaggi elettrici 2D o 3D in generale, una particolare attenzione inoltre è da riporre nella ricerca di una buona intensità del segnale, che è in genere inversamente proporzionale a K.

Il Metodo Geoelettrico Tomografico (ERT) 3D

La tomografia in resistività elettrica (ERT), è una tecnica diagnostica che consente di determinare la distribuzione di resistività elettrica nel sottosuolo, a partire da un gran numero di misure di potenziale elettrico, compiute mediante elettrodi posti sulla superficie del terreno.

L'utilizzo di elettrodi in configurazione anulare o a maglia libera rappresenta uno sviluppo di ultimissima generazione della tecnica (*Fischanger et al., 2007*).

Ciò consente di analizzare con buon dettaglio le caratteristiche locali del terreno (tipologie litologiche, zone umide o accumuli di acqua, “anomalie” resistive attribuibili a cavità o a disomogeneità del terreno). Questa metodologia consente di acquisire una informazione non puntuale, ma sulle caratteristiche volumetriche del terreno investigato.

La misura delle resistività del terreno viene effettuata, nella maggior parte dei casi, utilizzando dispositivi riconducibili ad uno schema di configurazione a quadripolo. Il georesistivimetro immette nel sottosuolo mediante due elettrodi - in genere indicati con A e B - una corrente nota **I** e misura, tramite due altri elettrodi - M e N - la differenza di potenziale ΔV , che tale corrente produce nei punti del terreno nel quale sono stati posti gli elettrodi stessi.

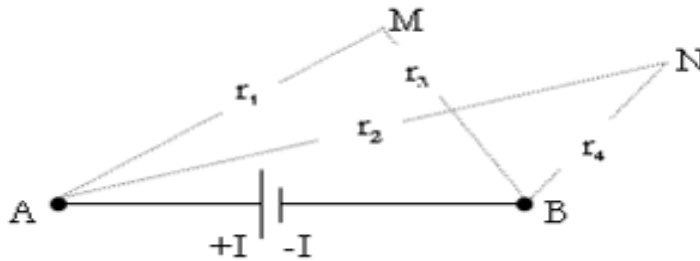


Figura 5. Configurazione elettrodica generica per la misura delle resistività del sottosuolo.

Se il sottosuolo fosse omogeneo e isotropo, la sua resistività ρ sarebbe calcolata attraverso la seguente relazione:

$$\rho = K \cdot \Delta V / I,$$

dove K , fattore geometrico, funzione solo della posizione reciproca degli elettrodi, è dato da:

$$K = 2\pi / (1/r_1 - 1/r_3 - 1/r_2 + 1/r_4).$$

Se il terreno è disomogeneo, la differenza di potenziale ΔV è funzione, oltre che della distanza tra gli elettrodi, anche della distribuzione di resistività nel sottosuolo: di conseguenza il valore ρ calcolato mediante le espressioni sopra scritte non coincide con il valore di resistività di uno dei mezzi presenti, ma è una funzione della resistività e della posizione dei mezzi stessi nel sottosuolo.

Tale valore viene chiamato appunto resistività apparente e può essere pensato come la resistività di un mezzo omogeneo e isotropo che, energizzato con la stessa corrente, dia luogo alla stessa differenza di potenziale tra gli elettrodi. Al variare della posizione degli elettrodi rispetto ai mezzi presenti, la resistività apparente varia, indicando la presenza di tali mezzi: obiettivo della tomografia di resistività elettrica è dunque quello di ricostruire al meglio forma, posizione e resistività dei mezzi a partire da più misure di resistività apparente.

Per illustrare le ragioni che rendono percorribile nell'indagine geoelettrica 3D l'utilizzo di geometrie "non convenzionali", come quella anulare, sono riprodotte in figura 6 le mappe ricavate dall'analisi di *sensitività* per un modello resistivo omogeneo, sottoposto a indagine con stendimento di elettrodi superficiali a forma di L. Tali mappe indicano le regioni dello spazio che influenzano ciascuna misura di potenziale, dando dunque un'idea circa la risoluzione spaziale del metodo.

Nella sezione **a)** (vedi sotto) è rappresentata la mappa di *sensitività* per un piano orizzontale - profondità del piano campagna pari a 1,5 metri; mentre nella sezione **b)** della figura è presente una sezione verticale che interessa gli elettrodi del quadripolo in esame (misura polo-dipolo *cross cable*, cioè con trasmettitore su un ramo della L e dipolo di ricezione sull'altro ramo).

Le immagini mettono bene in evidenza come per un tale quadripolo ci sia un ottimo grado copertura e di risoluzione della misura, anche in quelle zone che non sono direttamente occupate da elettrodi.

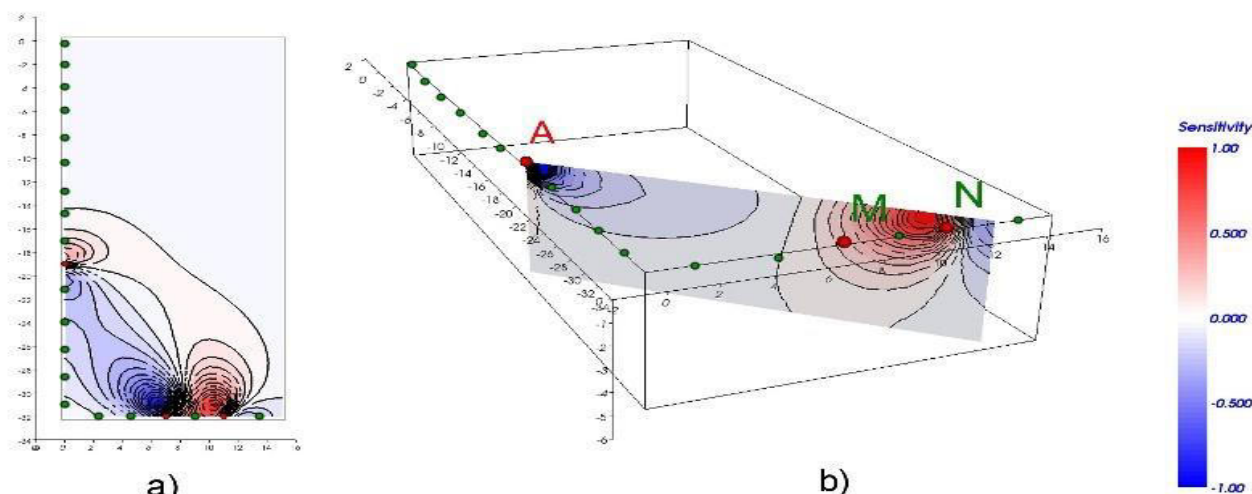


Figura 6. Esempio di mappe di sensitività per un quadripolo di geometria a L.

Ovviamente, l'acquisizione può essere condotta anche secondo criteri e disposizioni elettroniche più tradizionali quali ad esempio:

- esecuzione di una serie di stendimenti tra loro paralleli acquisiti singolarmente e successivamente elaborati in 3D tramite apposito processo di *kriging*: in tal caso si parla di acquisizione 2D (quadripoli allineati) ed elaborazione 3D (caso in esame).
- esecuzione di misure mediante una griglia di elettrodi a copertura totale o parziale dell'area in esame: in tal caso si parla di acquisizione 3D vera e propria (quadripoli allineati ed incrociati) ed elaborazione 3D

La restituzione dei dati avviene mediante sezioni o blocchi tridimensionali di resistività (espressa in $\text{ohm}\cdot\text{m}$) con rappresentazione a colori: le tonalità blu-viola in genere rappresentano le porzioni meno resistive (quindi elettricamente più conduttive), quelle rosso-arancio quelle più resistive infine le giallo-verdi quelle intermedie in relazione ai valori massimo e minimo di resistività riportati in legenda.

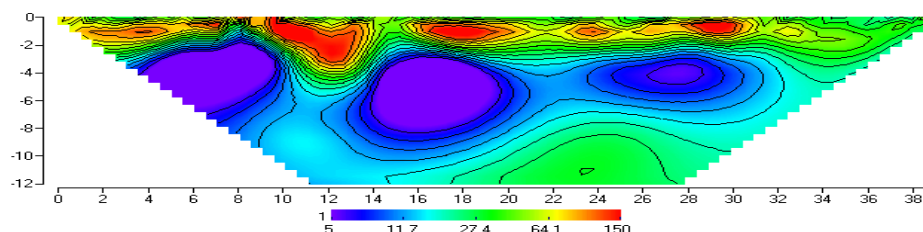
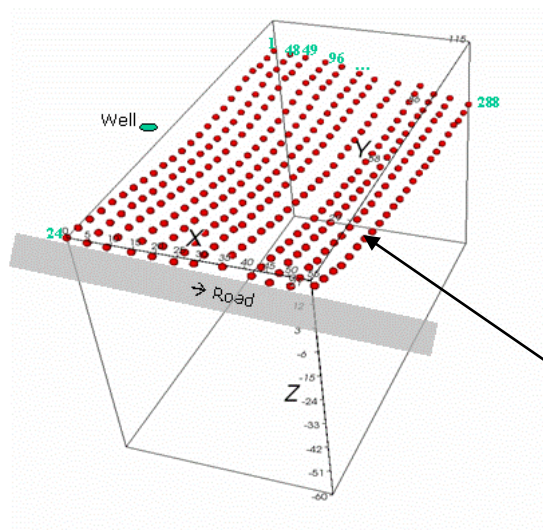


Figura 7 esempio di un elaborato geoelettrico 2D che evidenzia le zone conduttive (colorazione blu-viola) da quelle resistive (colorazione rosso-arancio).

Per quanto riguarda l'interpretazione delle sezioni geoelettriche, in relazione alle litologie e/o saturazione dei terreni presenti nelle aree indagate, è possibile schematicamente ed in generale assumere questa suddivisione:

Alta resistività (colorazione rosso-arancio)	Bassa resistività (colorazione blu-viola)
Terreni di riporto asciutti, sabbie e ghiaie, materiali elettricamente isolanti, guaine, condutture o solette in cemento , trovanti, <u>frammenti litoidi</u> , massicciate stradali e ferroviarie, <u>cavità</u> , fluidi resistivi	Terreni limo-argillosi, argille, strutture elettricamente conduttive, masse metalliche, griglie elettrosaldate, cisterne metalliche, serbatoi, binari ferroviari, zone umide , fluidi conduttivi

Schema interpretativo di massima delle sezioni di resistività elettrica.



Esempio di griglia 3D superficiale di elettrodi utilizzata per condurre la Tomografia elettrica 3D

Tutte le attività riguardanti le misure geoelettriche tomografiche sono state gestite mediante apposito software dedicato *ERTLab 64*.

In particolare, il modulo *Sequencer* del software consente di generare una sequenza di misure, ottimizzandola tenendo conto della particolare disposizione elettrodica richiesta/utilizzata.

Per l'area di studio è stata programmata, una sequenza con 48 elettrodi in linea con interdistanza tra gli elettrodi di 1,5 m.

Le acquisizioni sono state effettuate con array *dipolo-dipolo* con tale configurazione l'indagine raggiunge una profondità massima di -12 m dal p.c. al momento dell'esecuzione delle prove.

La falda è stata misurata in un piezometro adiacente all'area in studio e si trova a -4,40 m da p.c. al momento di esecuzione delle indagini (dicembre 2021).

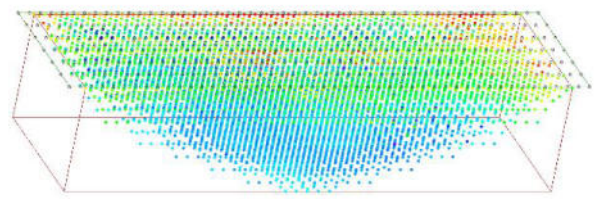
Una volta terminata l'acquisizione delle misure elettriche è possibile scaricare i dati su PC ed effettuare un controllo di qualità degli stessi oltre ad inserire le coordinate elettrodiche esatte come da schema sopra esposto.

Il processo di creazione delle *mesh* agli elementi finiti e di inversione è gestito dal modulo *Solver* di *ERTLab 64*; l'output finale sotto forma di immagini (sezioni e volumi) è ottenuto dal modulo *Viewer*.

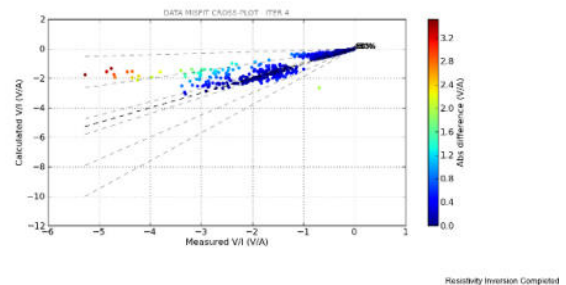
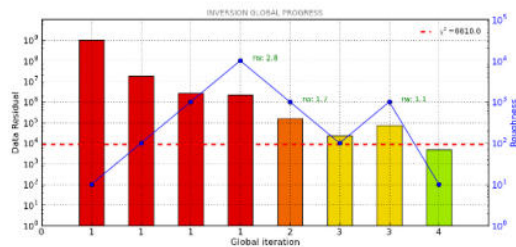
Volume di terreno considerato



Vista 3D delle pseudo-misure eseguite



Visualizzazione grafica dello stato di progresso dell'inversione



Il grafico esposto a sinistra (inerente lo stato di progressione dell'inversione) riporta l'avanzamento dell'inversione: le barre verticali indicano il procedere della statistica *chi-quadro*, il grafico blu l'andamento della *roughness*, le *labels* verdi i parametri di *reweight* alle diverse iterate, con la comparsa della barra verticale verde (ultima a dx della figura Global iteration) si può considerare l'inversione corretta.

Infine, il cross-plot a destra riporta dati modellati rapportati ai dati misurati. La scala colori è costruita sulla base delle differenze in valore assoluto "dati modellati-dati misurati", le linee tratteggiate rappresentano le soglie di differenze percentuali tra i dati modellati e quelli misurati, il grafico punteggiato blu, ben sovrapposto alle nuvole dei dati colorati misurati, indica anche in questo caso un buon modello teorico.

Il risultato dell'elaborazione del volume 3D è stato visualizzato secondo sezioni 2D rispetto ai piani X-Y, X-Z e Y-Z a distanza via via progressiva rispetto allo 0,0 degli assi di rilievo. La scala dei valori di resistività ottimizzata con un range di valori che vanno da 10 a 80 Ohm*m, è visualizzata tramite una scala cromatica che identifica i valori minori di resistività caratterizzati da toni del blu, fino ai valori massimi di resistività caratteristici dei toni rossi.

In particolare, per l'indagine ERT 3D, i risultati del volume di terreno investigato, in senso elettro stratigrafico è stato riassunto mediante:

- Piano di riferimento X-Y secondo 7 sezioni, di cui la prima indica l'ubicazione degli elettrodi e gli assi di riferimento e le successive 6 rispettivamente a coordinata $z = -0,5/-1/-2/-3/-4$ e -5 m rispetto alla quota del p.c., cui è attribuita coordinata $z=0.0$ [vedi Fig. 8÷14 a seguire].
- Piano di riferimento X-Z secondo 7 sezioni, realizzate a coordinate $Y=1/5/9/15/19/25$ e 29 m, cioè a spaziature progressive procedendo verso est [vedi Fig. 15÷21 a seguire]
- Piano di riferimento Y-Z secondo 9 sezioni, alle coordinate $X= 5/15/20/25/30/40/50/60$ e 70 m cioè a distanze progressive procedendo verso sud [vedi Fig. 22÷30 a seguire].

Restituzioni tomografiche Piano X-Y

Vista dall'alto asse X Y

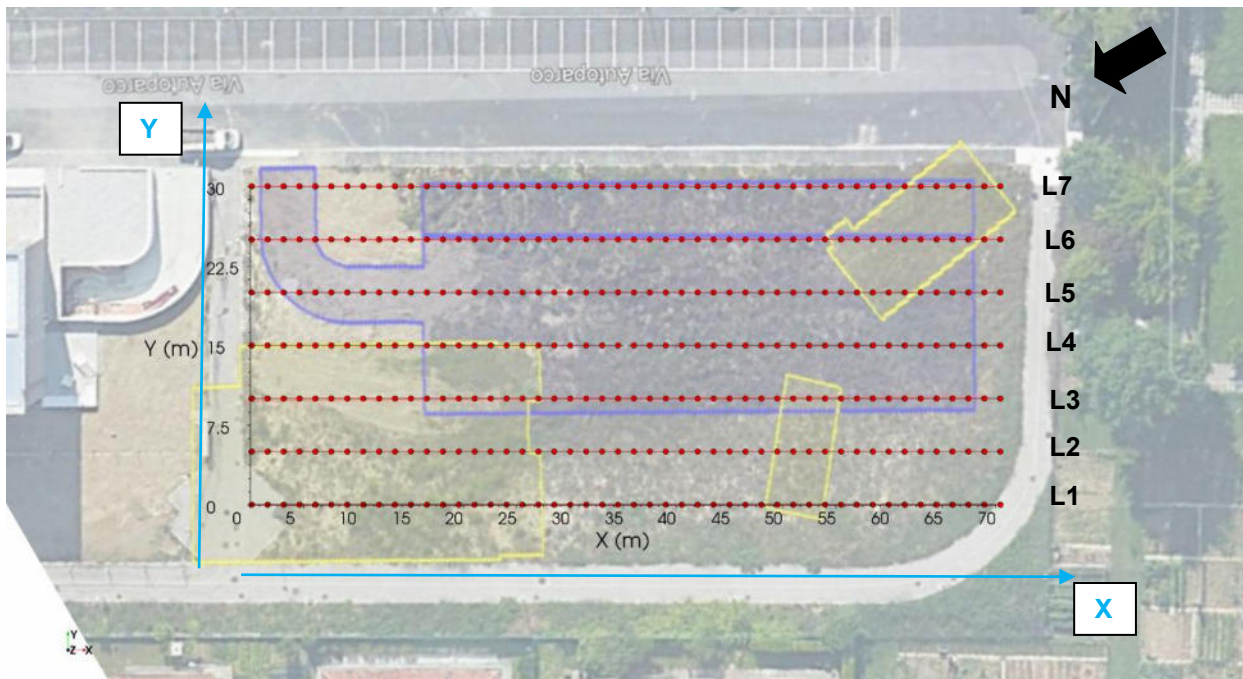


Fig.8: Sez. x-y ubicazione elettrodi e assi di riferimento

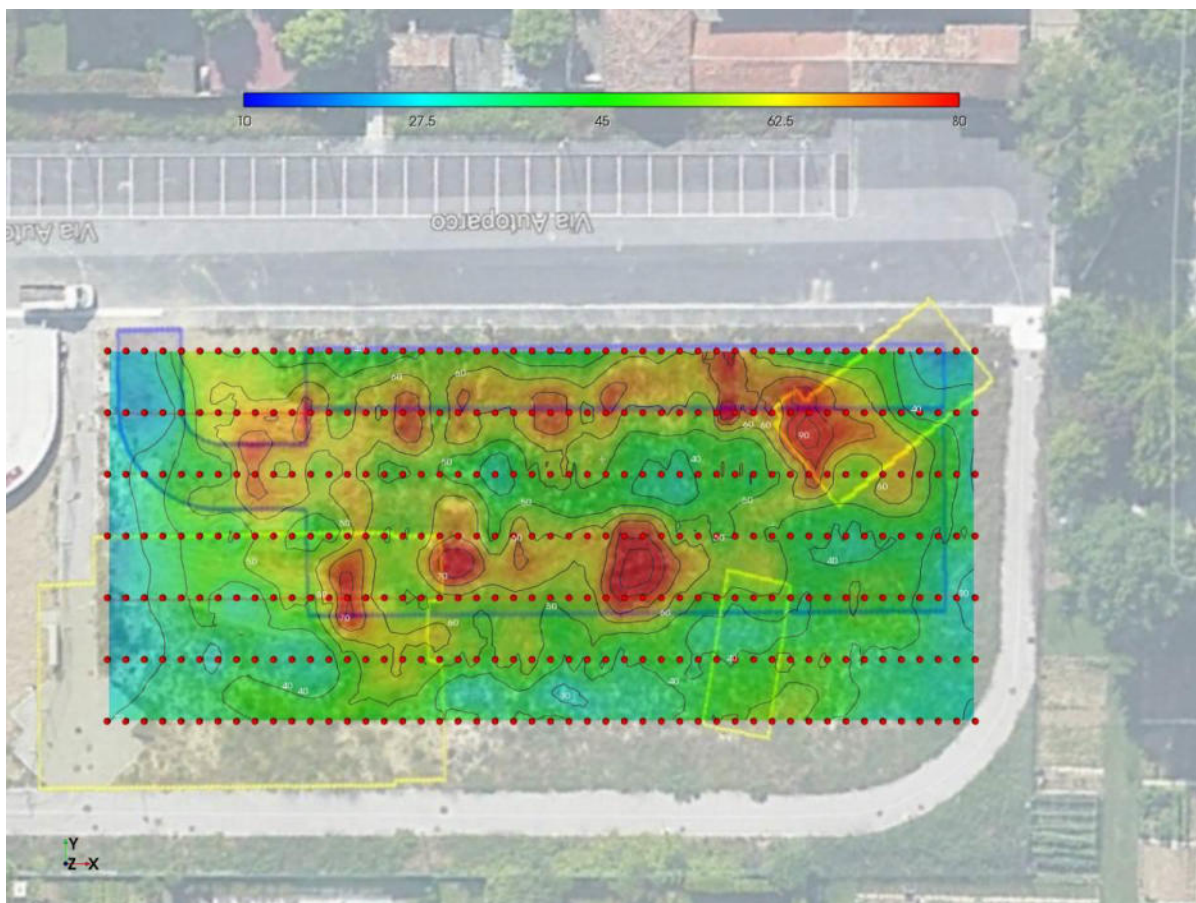
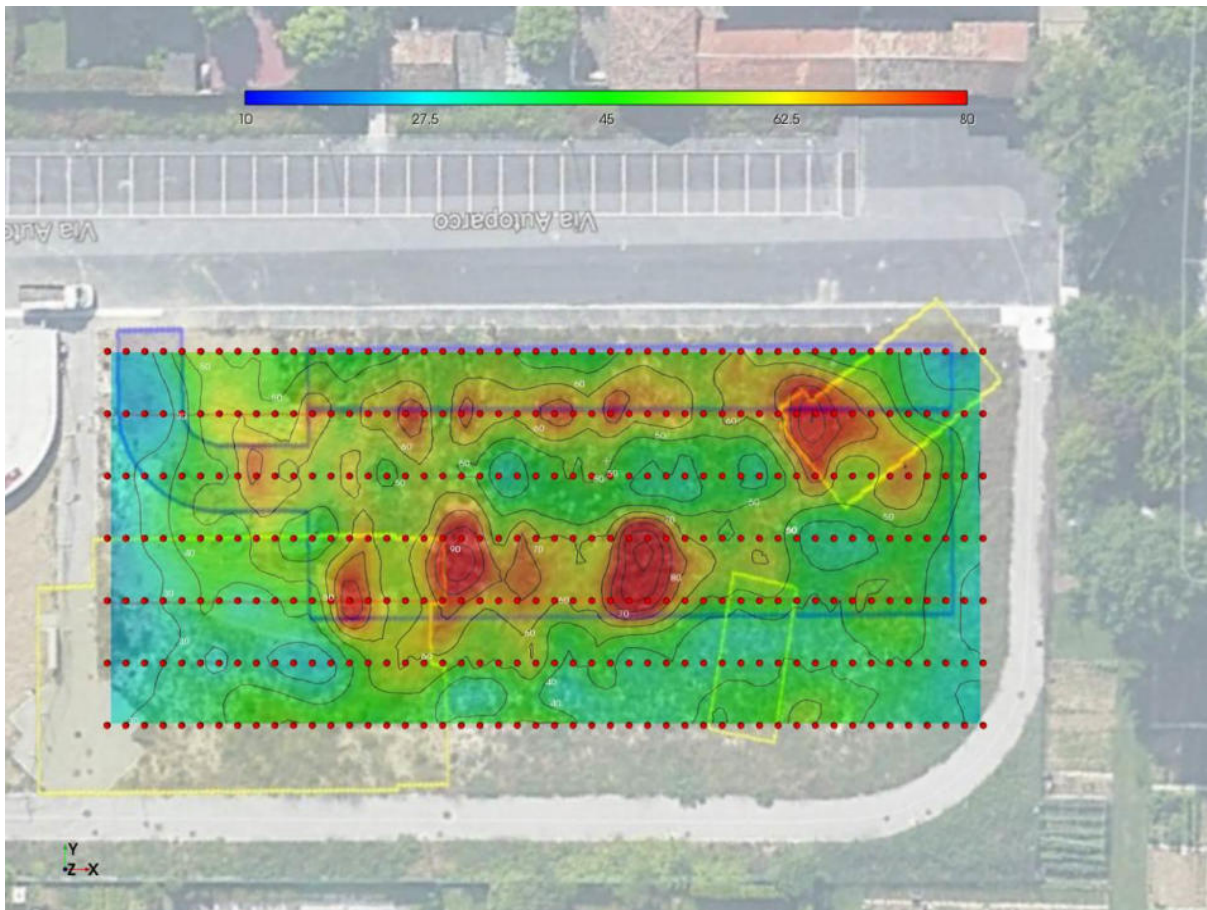
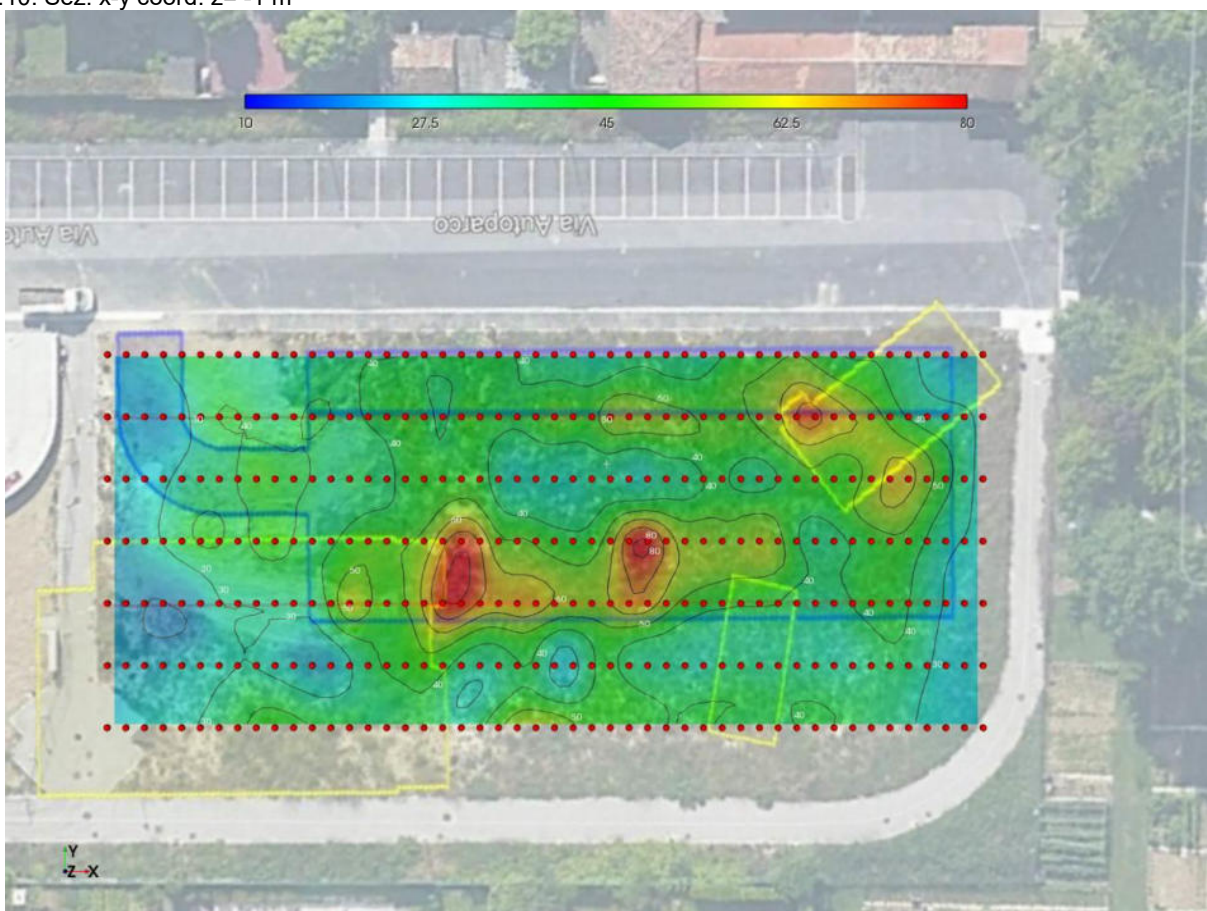
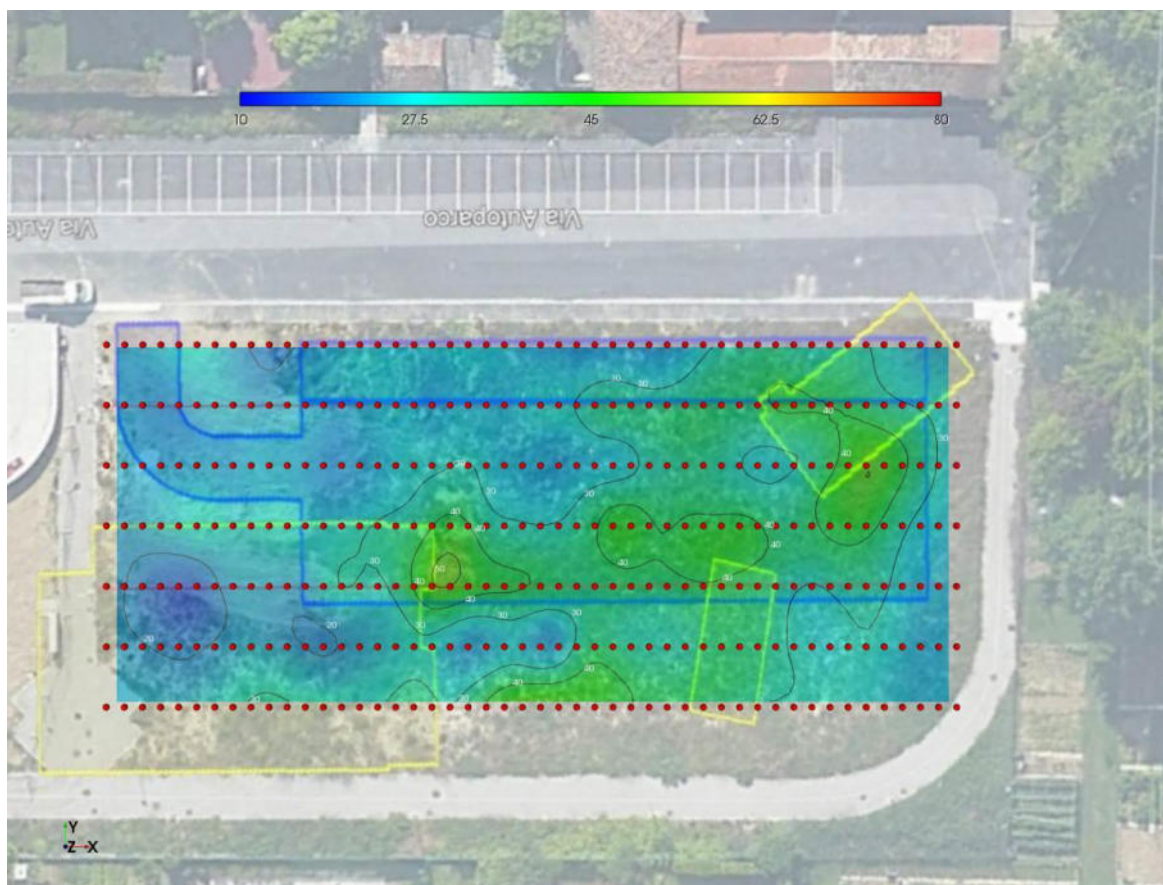
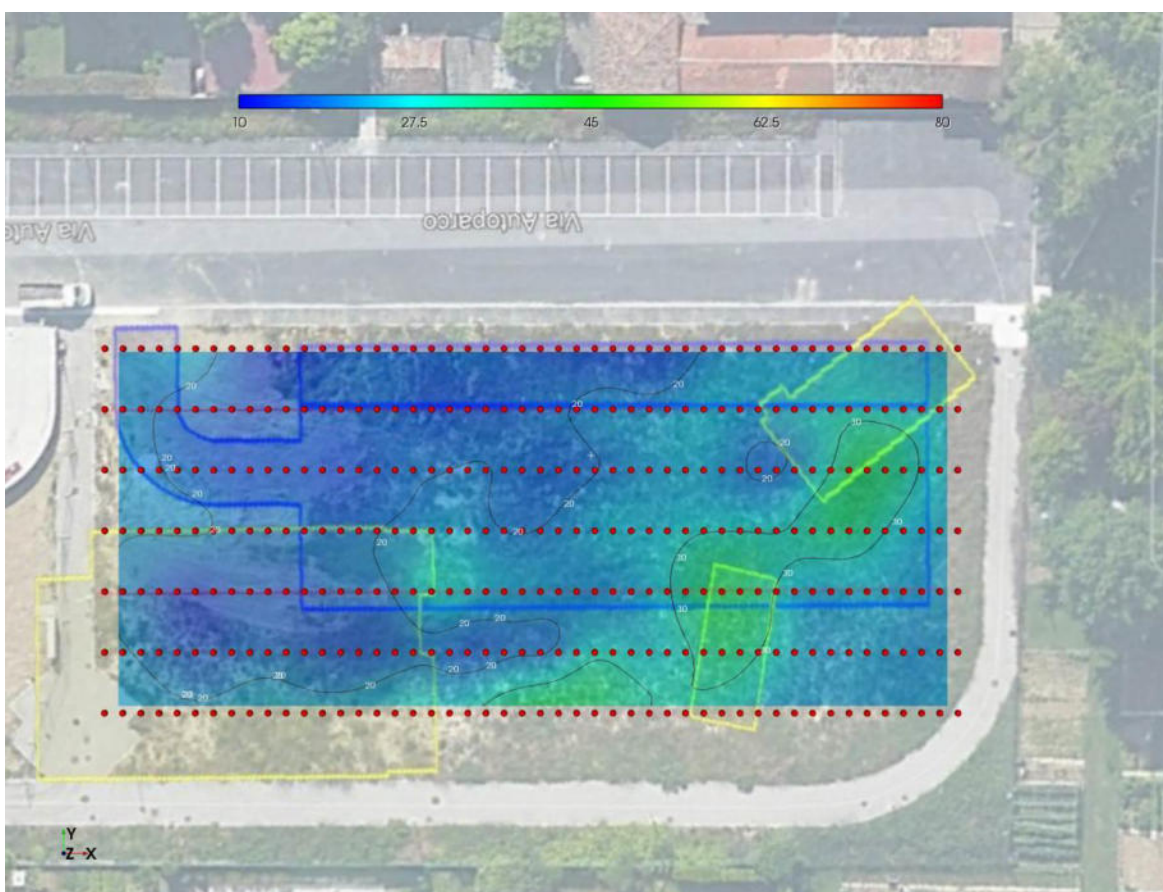


Fig.9: Sez. x-y coord. $z = -0,5$ m

Fig.10: Sez. x-y coord. $z = -1$ mFig.11: Sez. x-y coord. $z = -2$ m

Fig.12: Sez. x-y coord. $z = -3$ mFig.13: Sez. x-y coord. $z = -4$ m

15 di 38

Restituzioni tomografiche Piano X-Z

Vista secondo sezioni // asse X

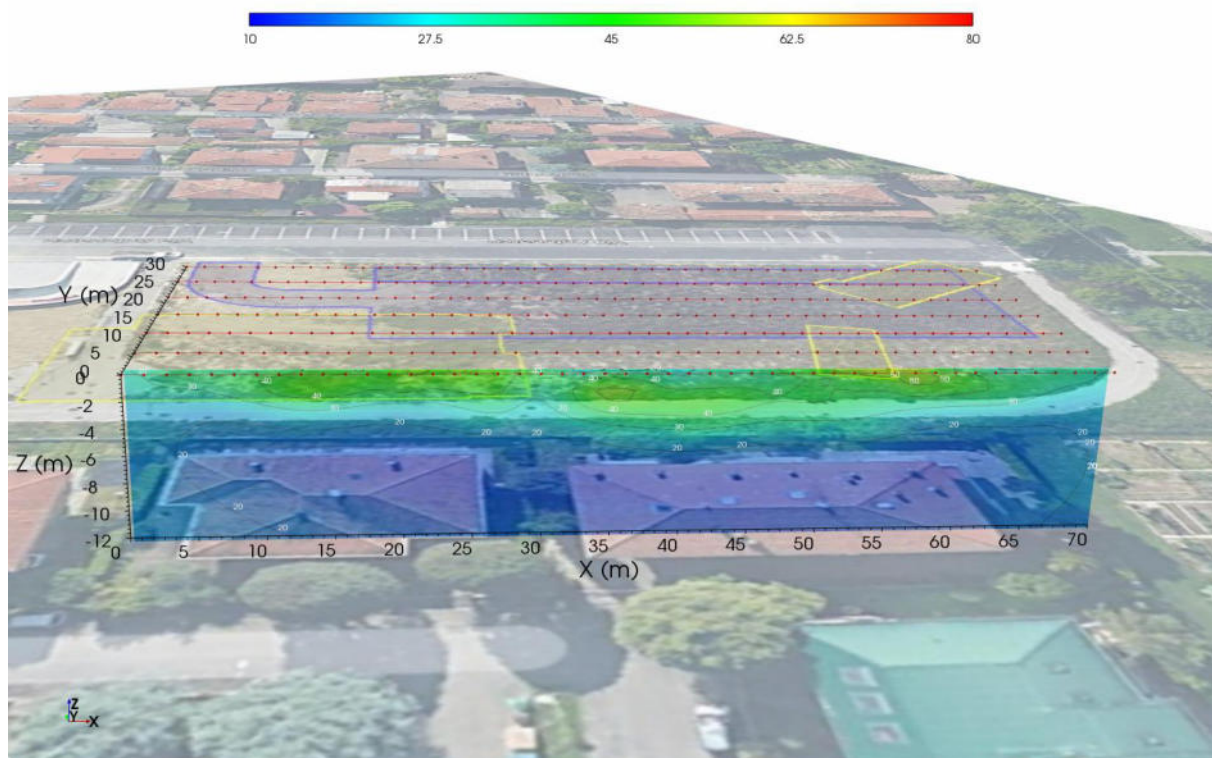


Fig.15: Sez. x-z progressiva $y=1\text{m}$

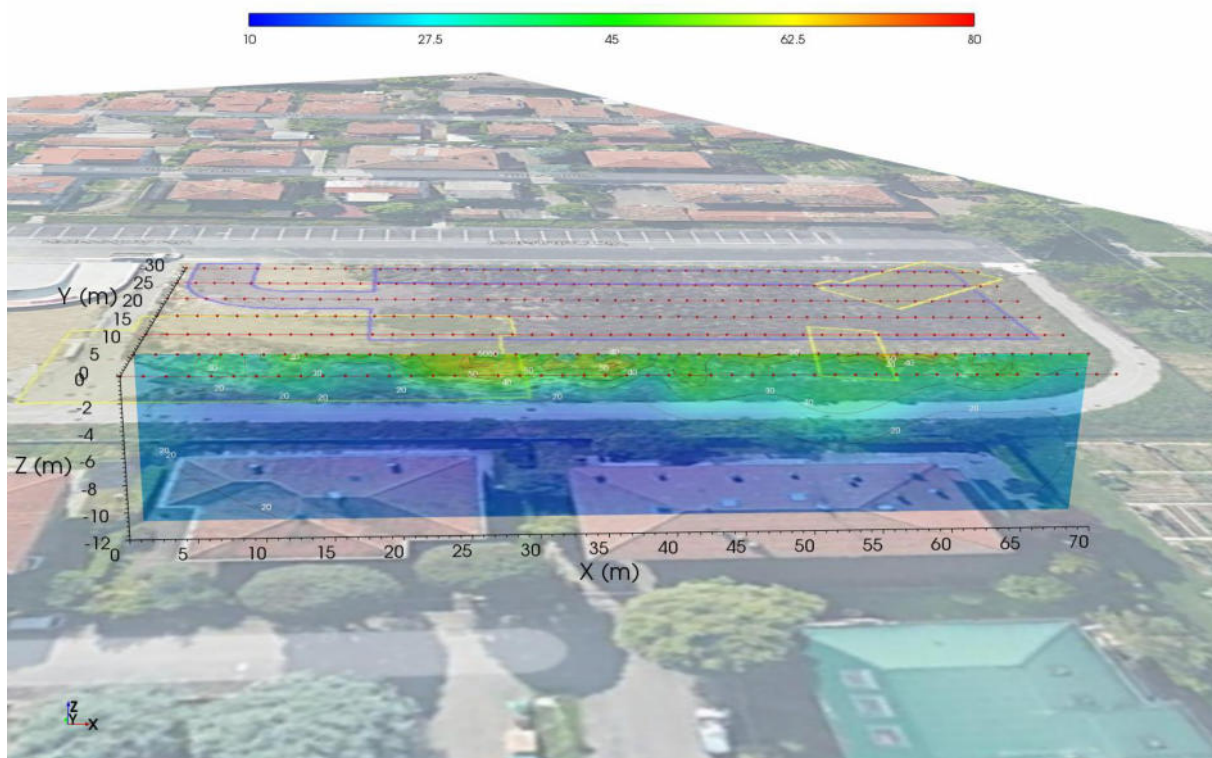
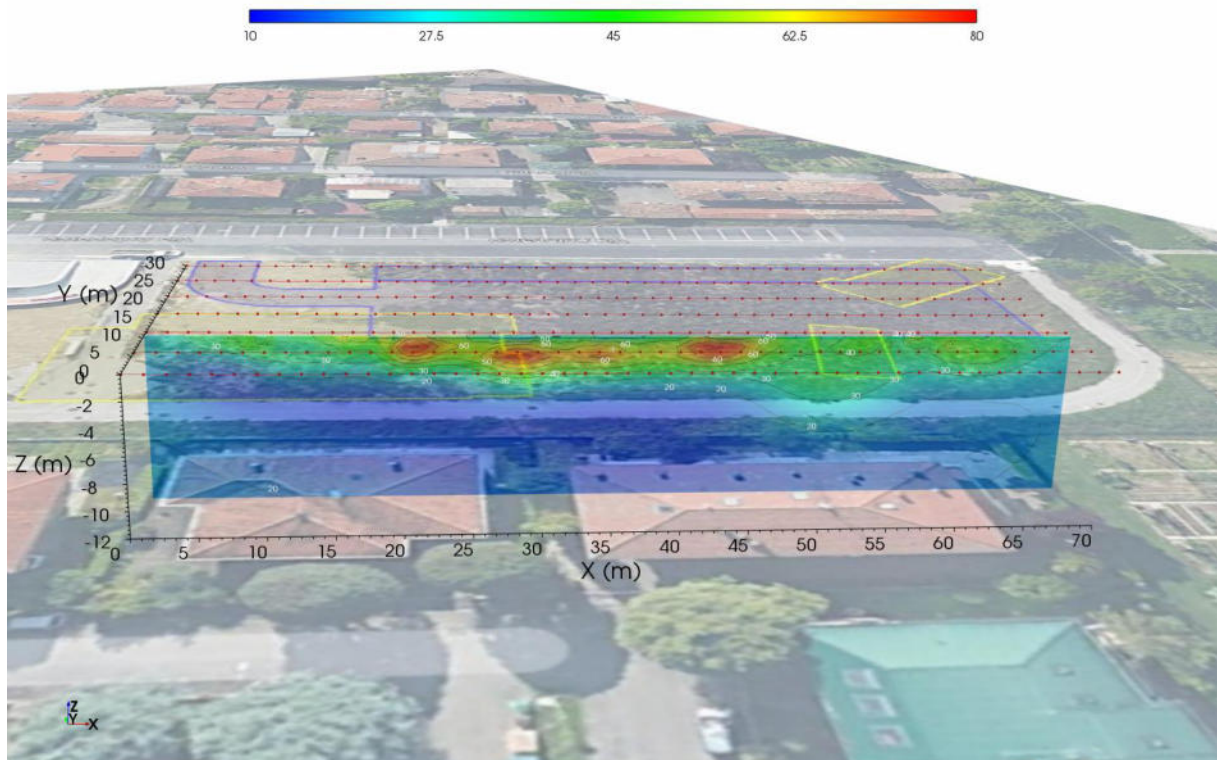
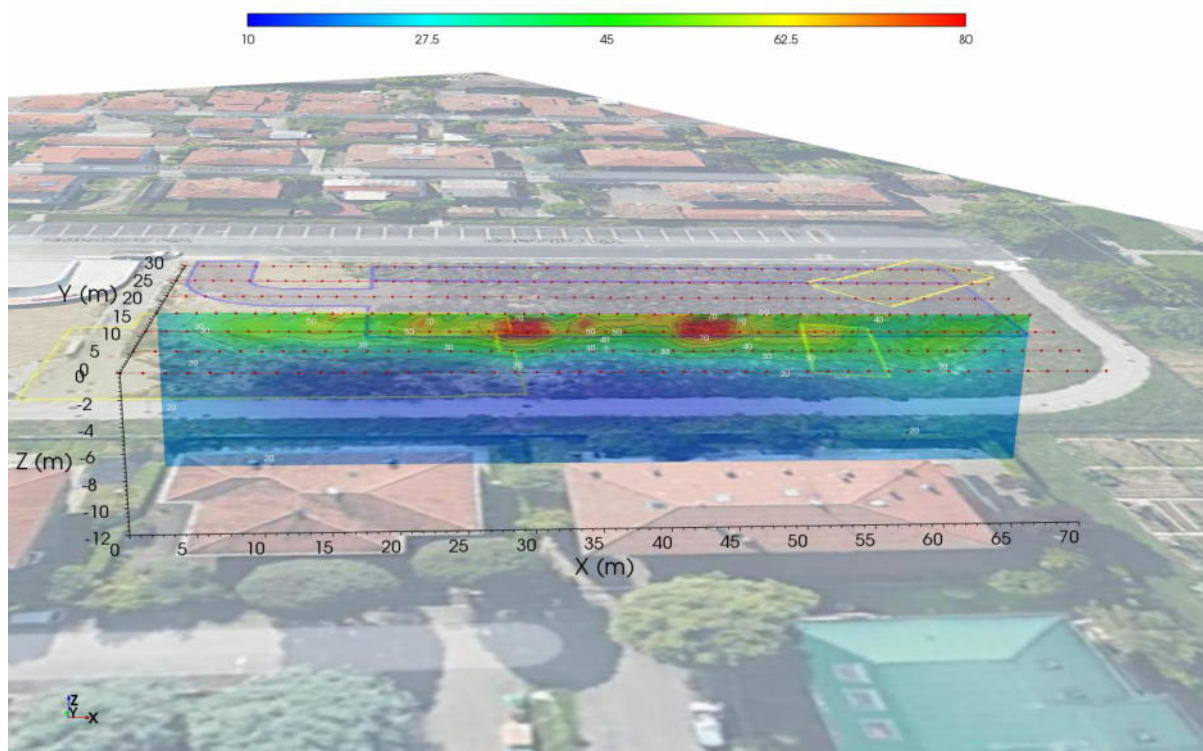
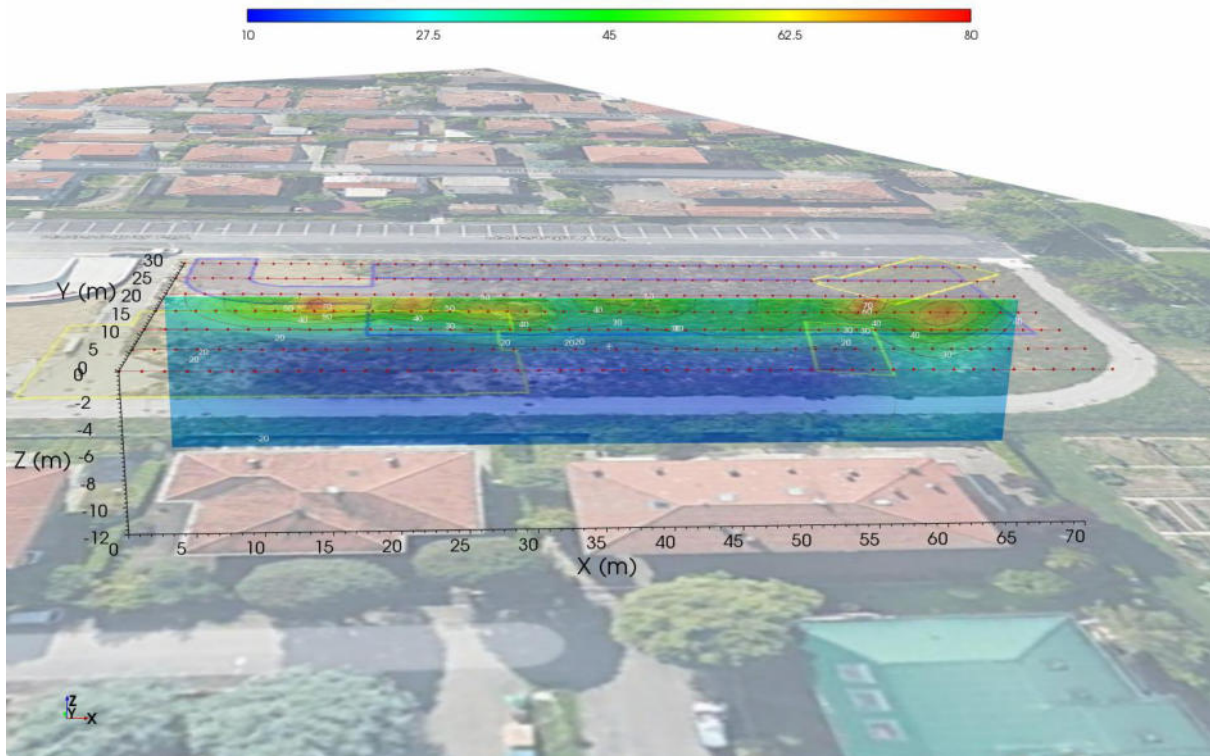
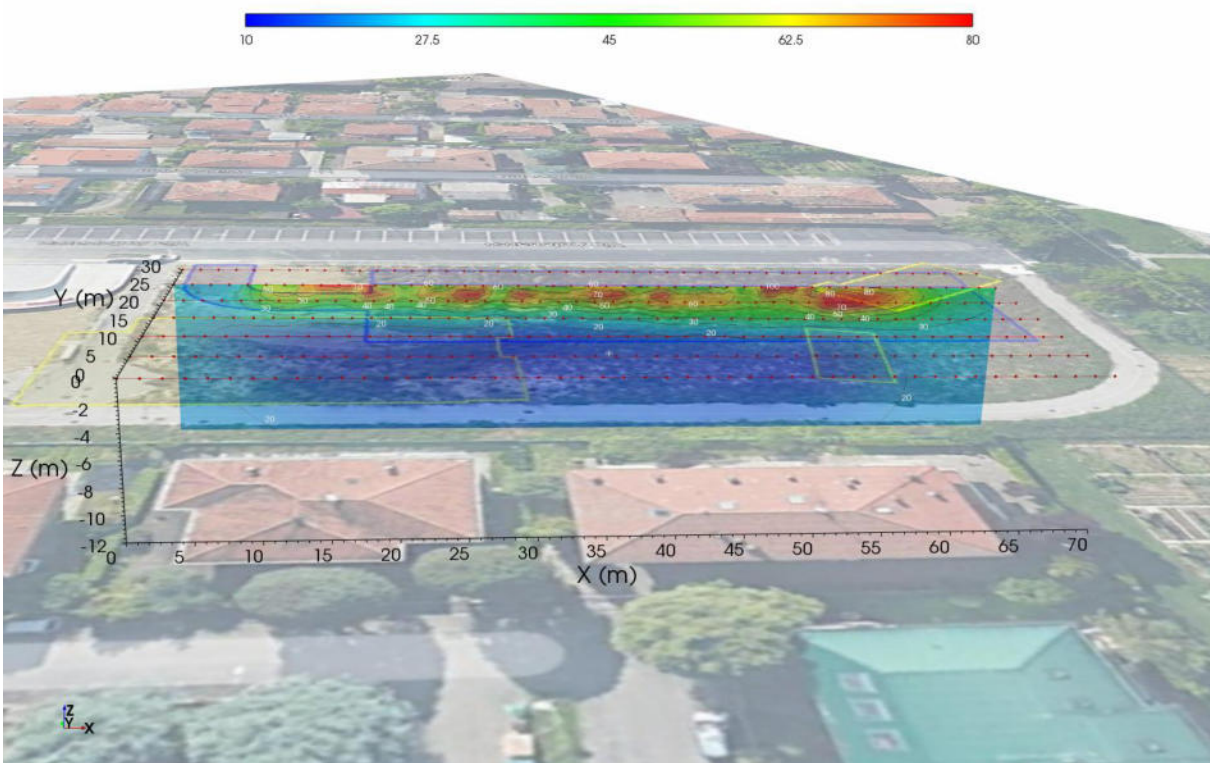
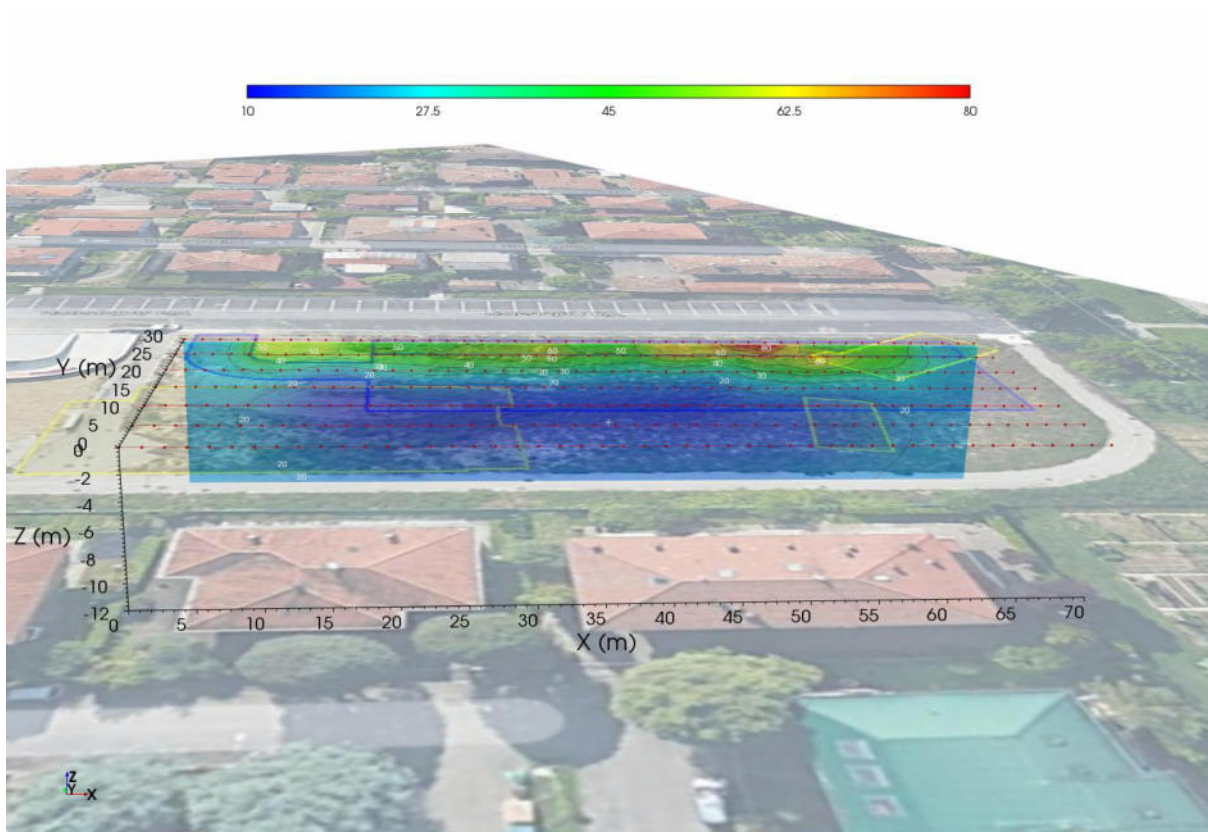


Fig. 16: Sez. x-z progressiva $y=5\text{m}$

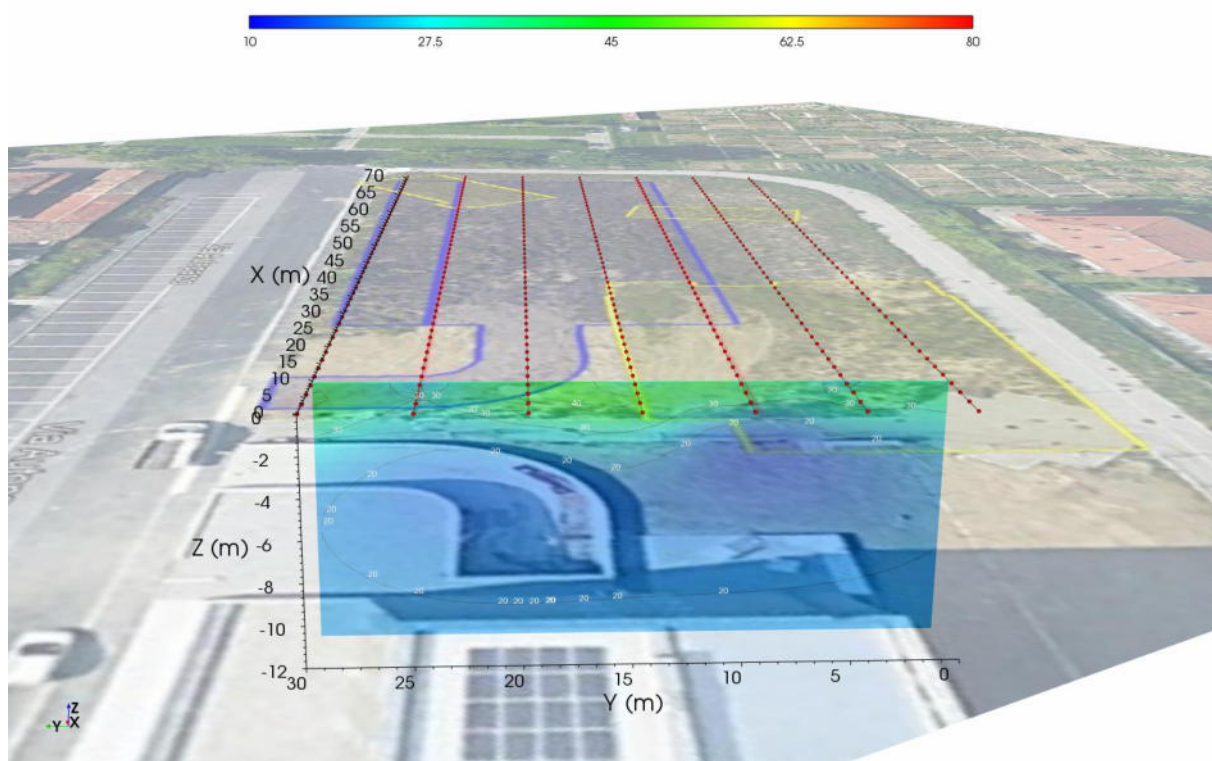
Fig. 17: Sez. x-z progressiva $y=9$ mFig. 18: Sez. x-z progressiva $y=15$ m

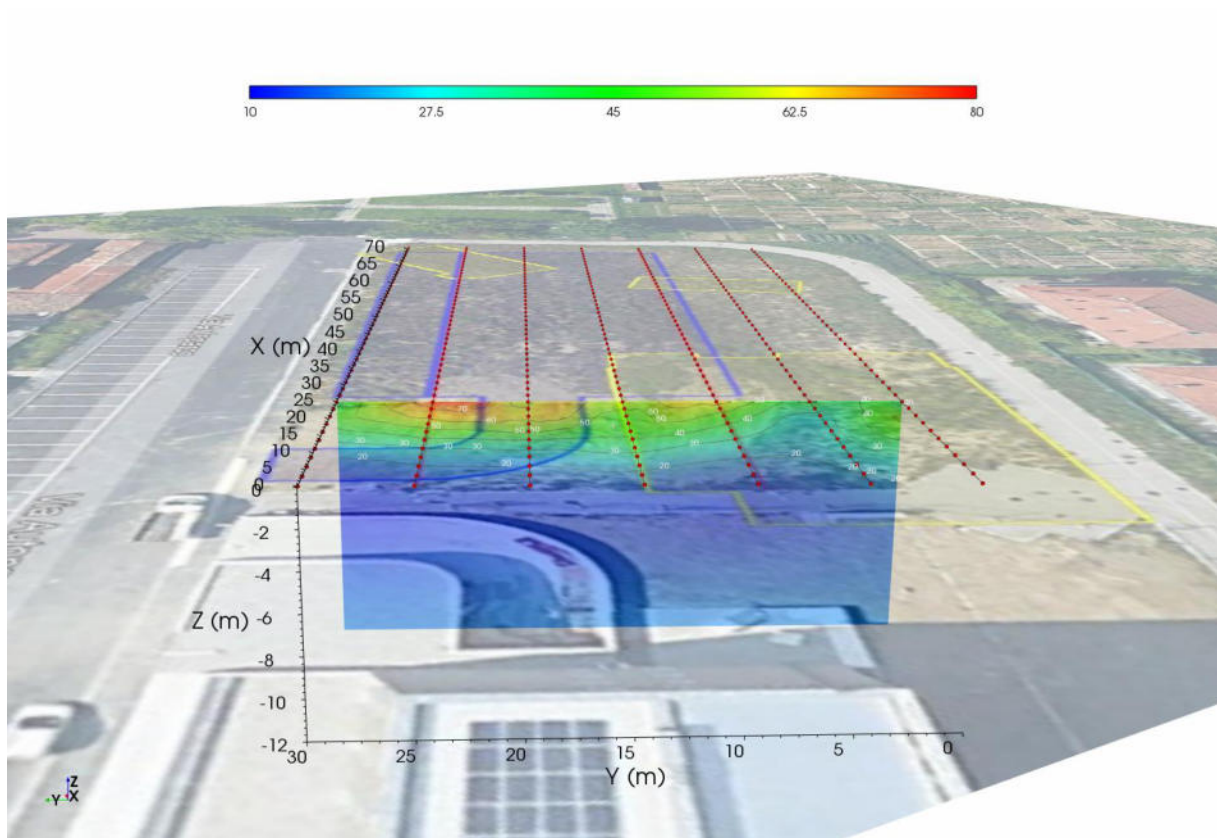
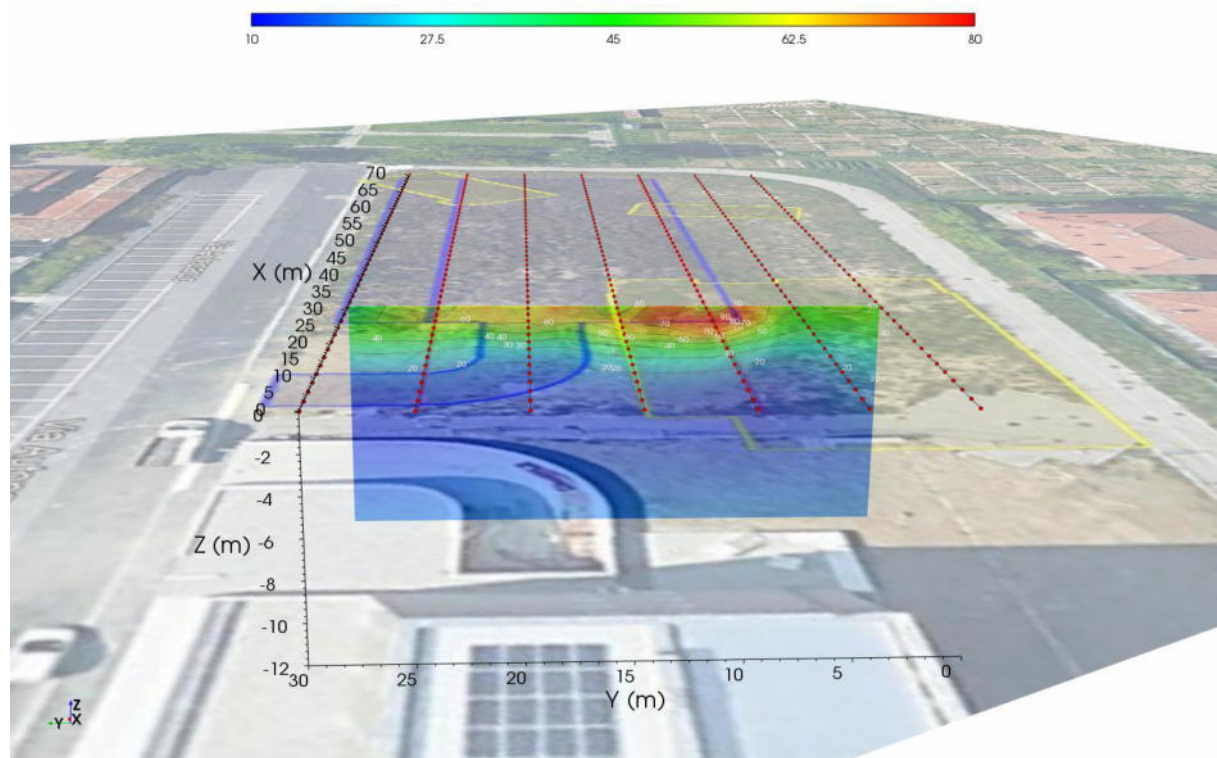
Fig. 19: Sez. x-z progressiva $y=19$ mFig. 20: Sez. x-z progressiva $y=25$ m

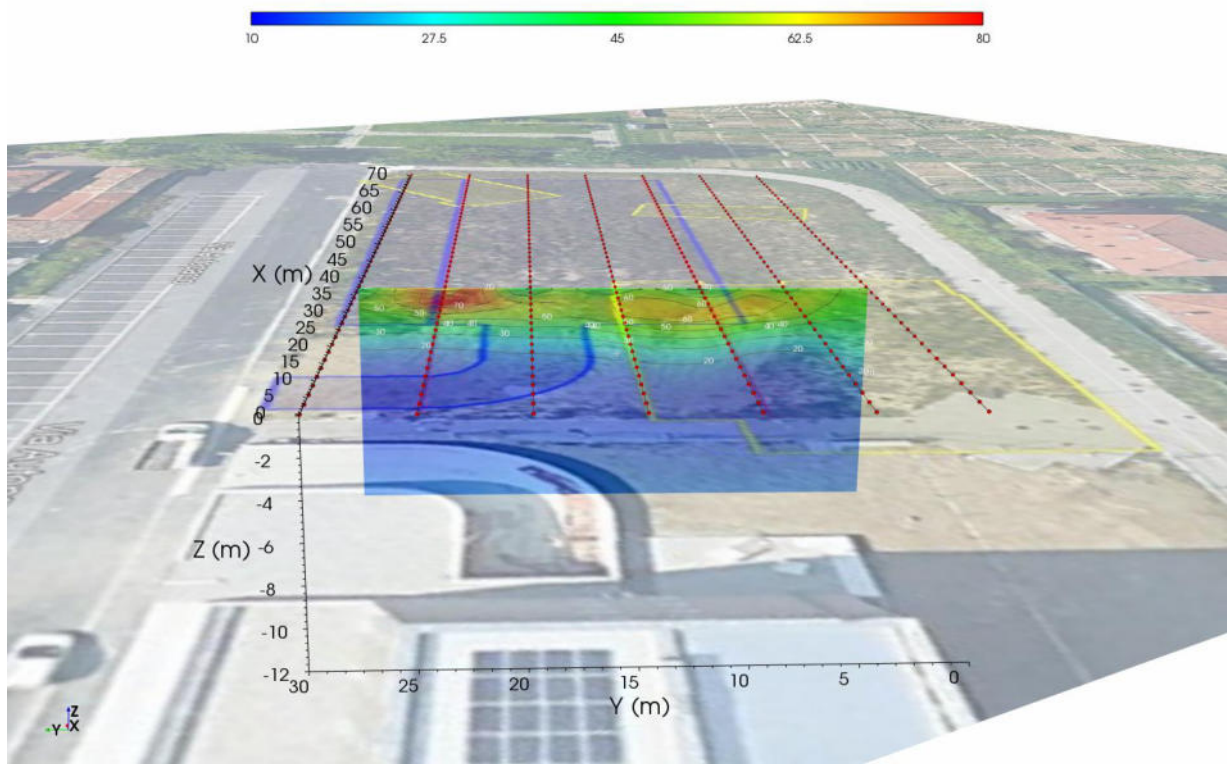
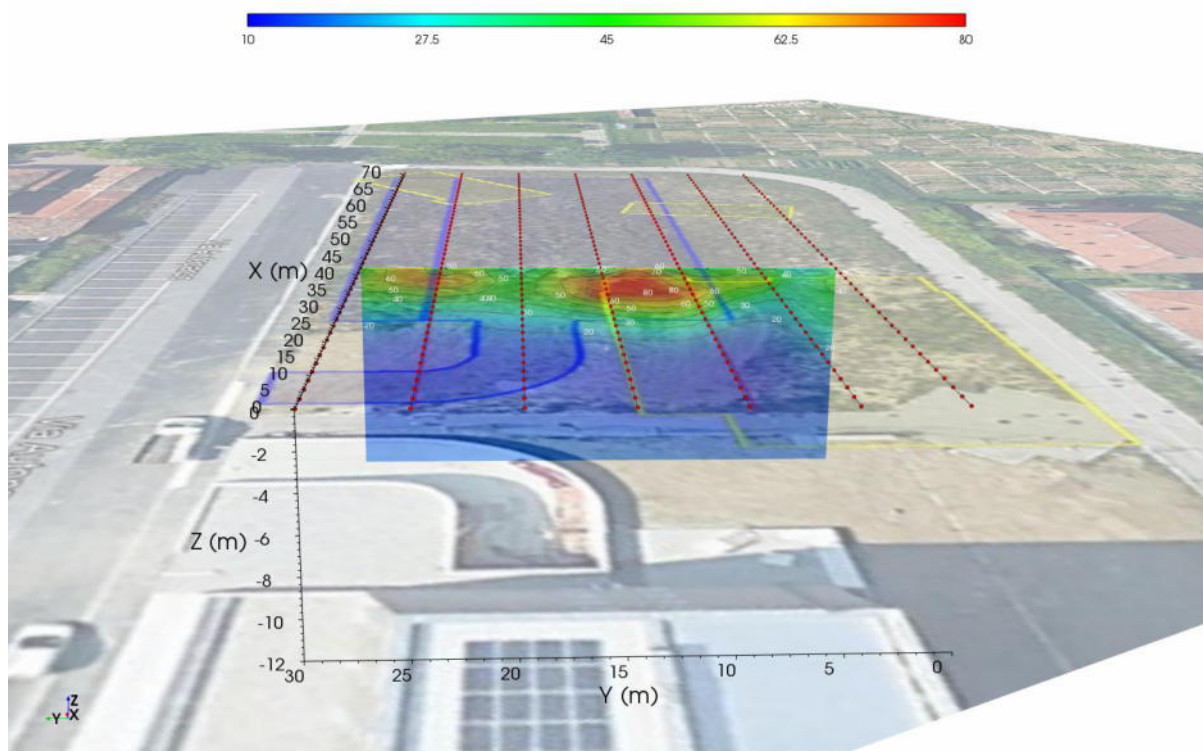
Fig. 21: Sez. x-z progressiva $y=29$ m

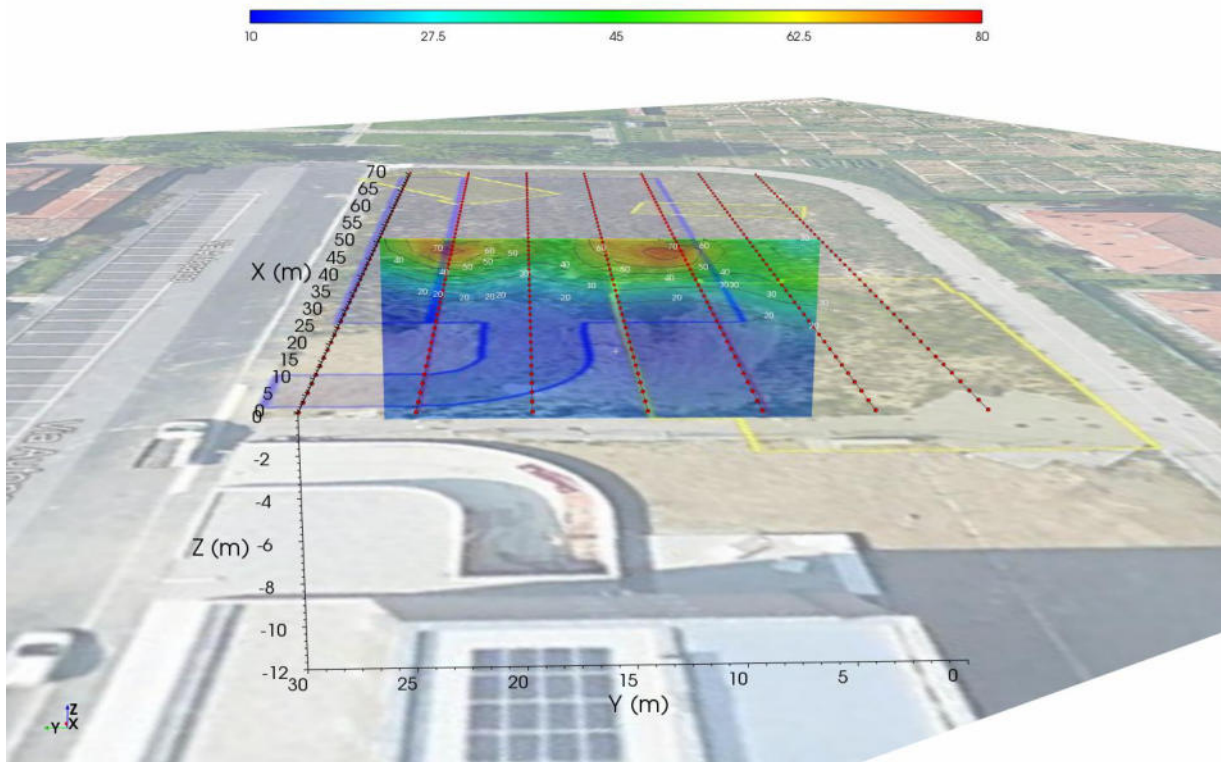
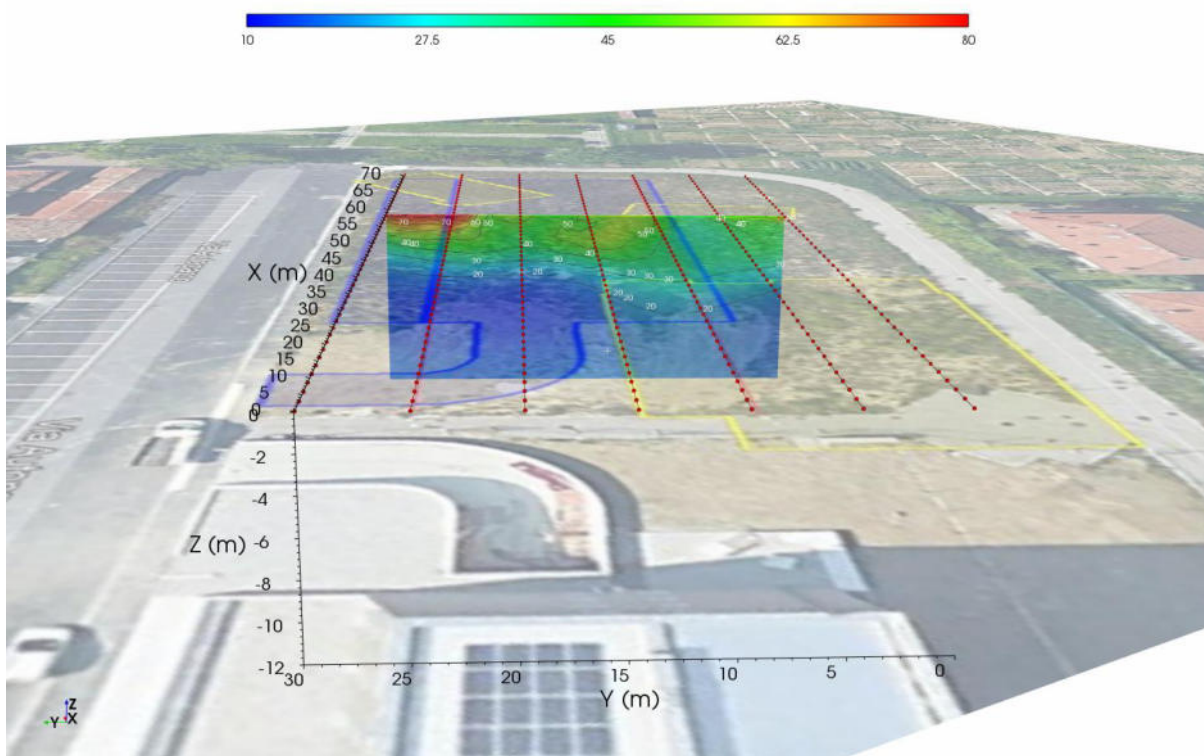
Restituzioni tomografiche Piano Y-Z

Vista secondo sezioni // asse Y

Fig. 22: Sez. y-z progressiva $x=5$ m (da limite percorso pedonale a nord dell'area)

Fig. 23: Sez. y-z progressiva $x = 15$ mFig. 24: Sez. y-z progressiva $x = 20$ m

Fig. 25: Sez. y-z progressiva $x = 25$ mFig. 26: Sez. y-z progressiva $x = 30$ m

Fig. 27: Sez. y-z progressiva $x = 40$ mFig. 28: Sez. y-z progressiva $x = 50$ m

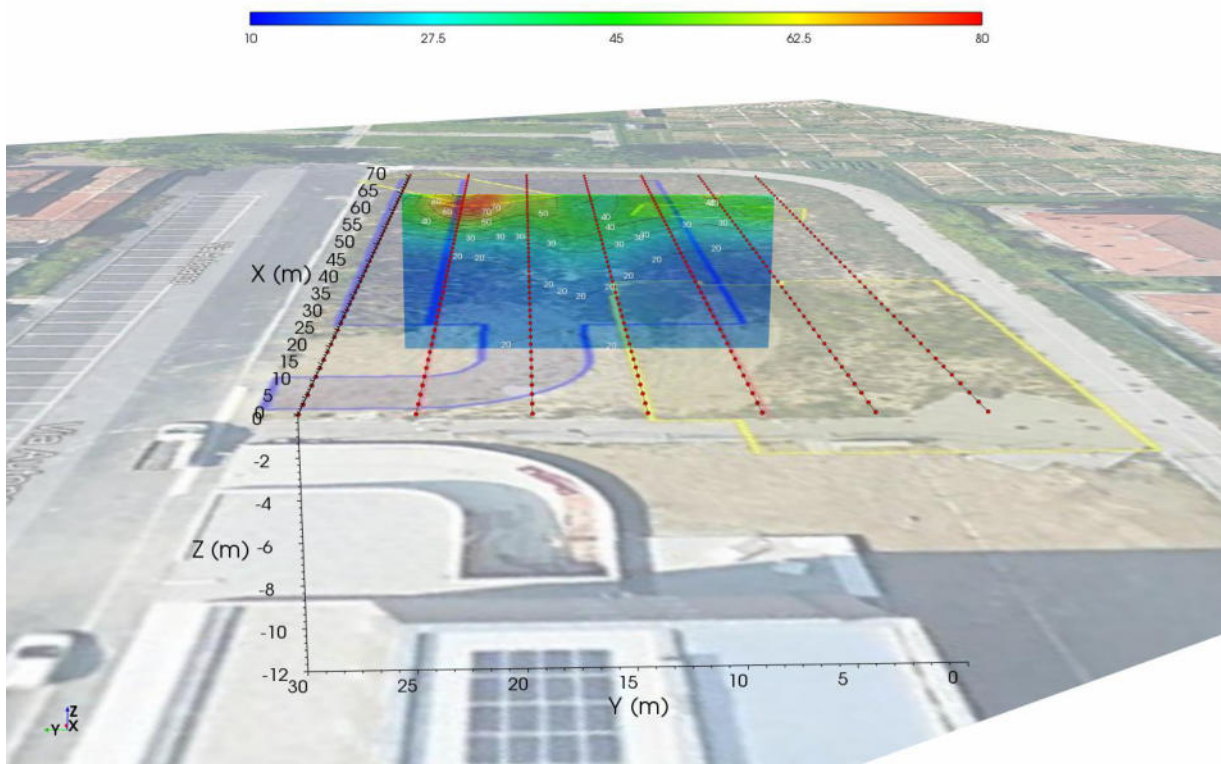


Fig. 29: Sez. y-z progressiva x= 60 m

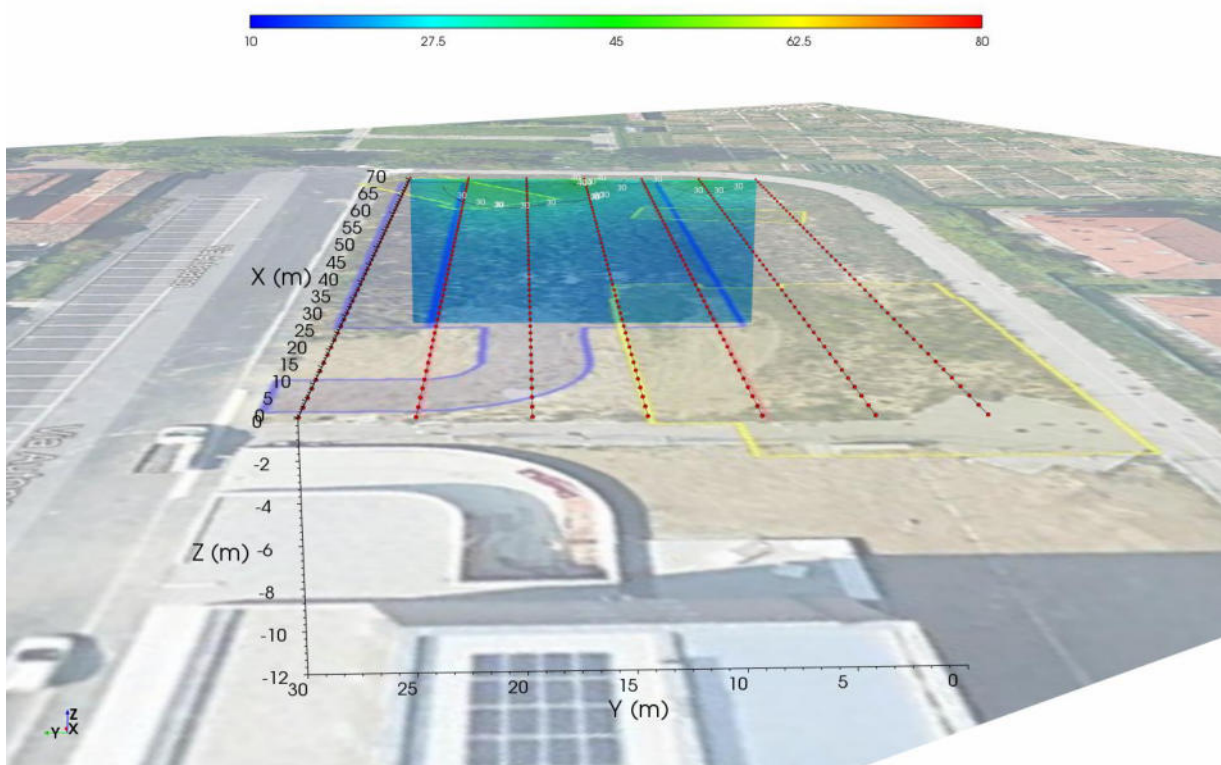


Fig. 30: Sez. y-z progressiva x= 70 m

Esempi di visualizzazione a isosuperfici variabili

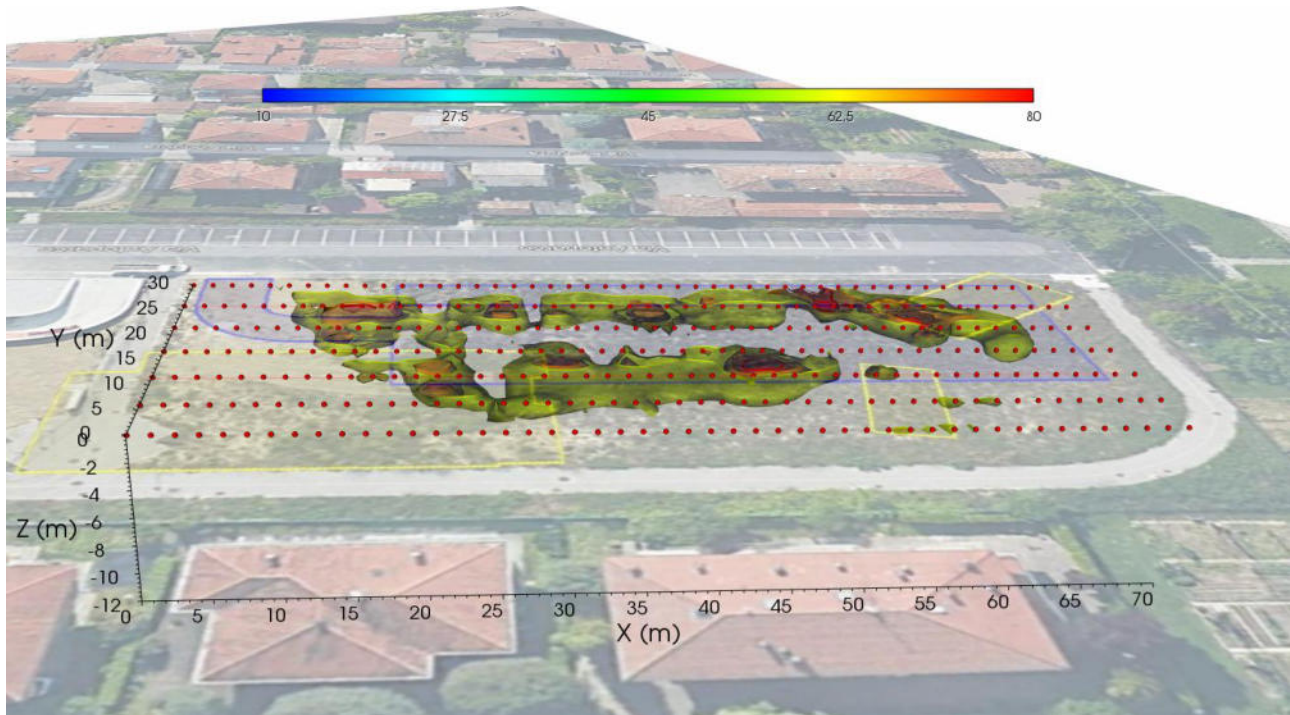


Fig. 31: Piano X-Z con isosuperfici maggiori di 60 Ohm*m

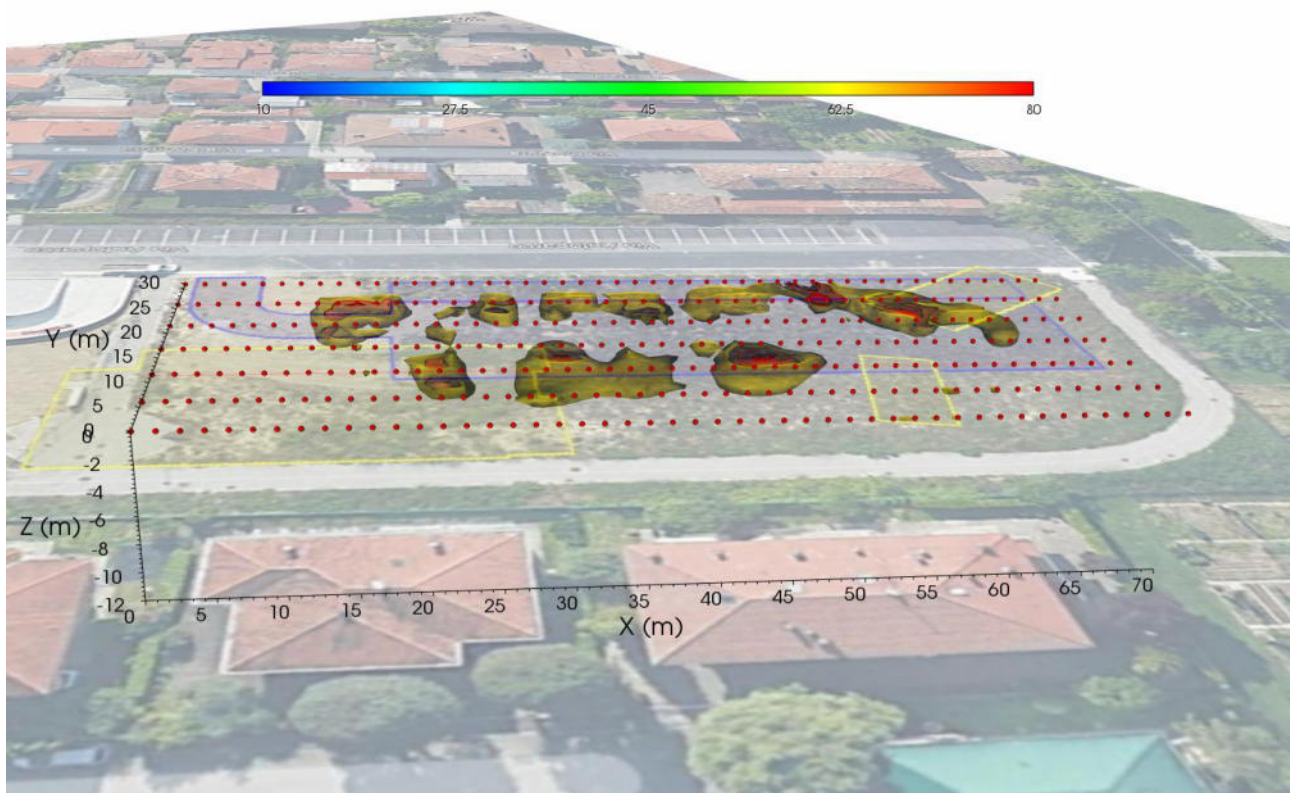


Fig. 32: Piano X-Z con isosuperfici maggiori di 65 Ohm*m

Osservazioni sulle restituzioni tomografiche elettriche ERT

Dall'esame delle immagini sopra esposte, che riportano la restituzione della indagine tomografica secondo piani paralleli rispettivamente a coordinate progressive secondo l'asse Z (fig. 8-14), Y (fig. 15-21) e Z (Fig. 22-30), si evidenzia una situazione stratigrafica che può così essere descritta:

- un orizzonte superficiale non saturo, identificabile da p.c. fino a circa 4/4,4 m da p.c. con presenza di anomalie resistive, variamente distribuite arealmente, concentrate essenzialmente fra le linee ERT L3-L4 e L5/6-L7 (l'orizzonte ha valori mediamente $>30/40 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ e con toni dal verde fino al rosso nelle mappe).
- un livello sottostante con tutta probabilità saturo, discretamente omogeneo e continuo (valori di resistività $< 30 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ con toni dall'azzurro al blu).

Scopo primario dell'indagine è quello di identificare “anomalie elettriche” riconducibili a possibili riempimenti di materiale antropico. In relazione alla litologia dei terreni naturali, di tipo essenzialmente argilloso-limoso (come evidenziato dalle cpt eseguite in sito), quindi a comportamento elettrico conduttivo, la presenza di “anomalie a comportamento elettrico resistivo” potrebbe indicare presenza di terreno rimaneggiato e/o frammisto a materiali antropici.

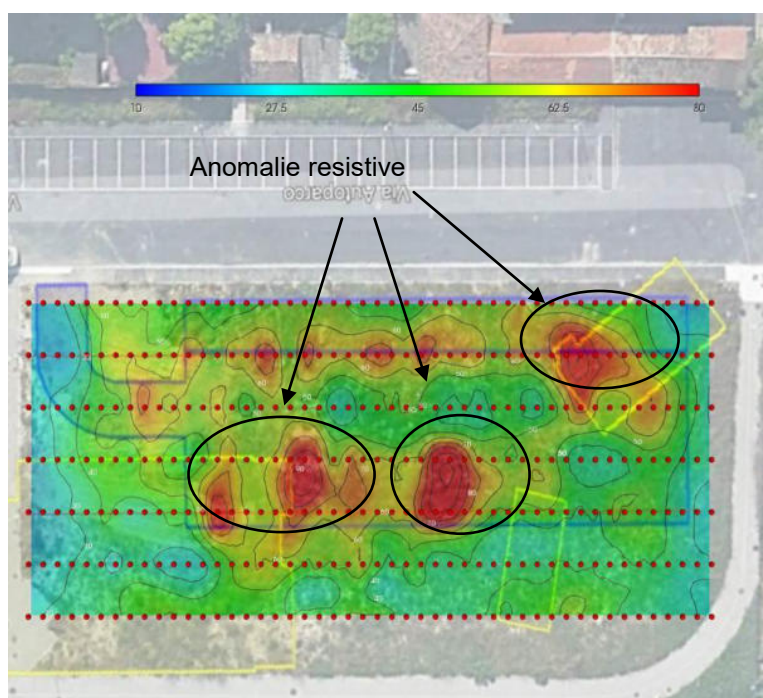
Si evidenzia però che riempimenti, eseguiti con materiali antropici/terreni a litologia sostanzialmente simili al terreno incassante, sono difficilmente o non ben chiaramente identificabili.

Dalle mappe sopra esposte, si notano “anomalie resistive” ben identificabili principalmente nelle sezioni XY (es. vedi fig. 10-11 alle profondità di -1 e -2 m da pc) con valori di resistività $>70/80 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ (colori dall'arancio al rosso nelle mappe).

Come sopra accennato, si localizzano nel settore centrale dell'area tra le linee L3 e L4, ed anche nella porzione orientale dell'area essenzialmente tra linea L6 e tra L7 (in prossimità di via Autoparco), sufficientemente evidenti nelle sezioni fino a profondità di -2/-2,5 m di profondità dal p.c.

(a lato è esposta la Fig. 10 sezione XY a -1 m da p.c. a titolo di esempio)

Difficilmente, senza la disponibilità di una corretta taratura mediante indagini dirette, è possibile restituire correttamente od associare la distribuzione dei volumi di materiale “antropico” che caratterizza le anomalie. Come a titolo di esempio, è stato esposto dalle figure 31 e 32 che mostrano isosuperfici con una differenza di solo 5 Ohm.



Documentazione fotografica



Ubicazione L1 vista da sud



Ubicazione L2 vista da sud



Ubicazione L3 vista da sud



Ubicazione L4 vista da sud



Ubicazione L5 vista da sud



Ubicazione L6 vista da sud



Ubicazione L7 vista da sud

Indagine MASW

L'indagine MASW è indirizzata a misurare le velocità delle onde sismiche (V_s) del sottosuolo e la valutazione del parametro $V_{s,eq}$ come prescritto da:

- **Ordinanza del P.C.M. n° 3274 del 20 marzo 2003**
- **D.M. 17 gennaio 2018 “Norme tecniche per le Costruzioni”.**
- **Successiva Circolare Ministeriale [n°7 del 21/01/2019](#) recante Istruzioni per l'applicazione.**

Si ricorda che la normativa (par. 3.2.2 NTC18) richiede l'effetto della risposta sismica locale valutata mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2. dell'NTC18.

All'interno del territorio nazionale sono state individuate 4 zone sismiche, contraddistinte dal valore a_g dell'accelerazione di picco al suolo, normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità (v. Allegato 1 ord. 3274 del 2003 e succ. modifiche). La classificazione del suolo (tabella 3.2.II) è invece convenzionalmente eseguita sulla base delle condizioni stratigrafiche e della velocità media 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 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_{s30} ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità

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

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

Caratteristiche attrezzatura

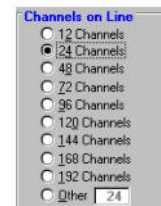
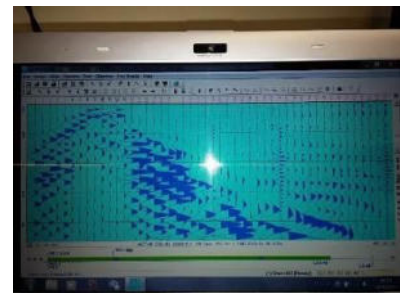
L'indagine MASW è stata eseguita utilizzando un sismografo multicanale ad incrementi di segnale, della Abem-Seistronix **mod. Ras 24** con 24 canali attivi (sistema ampliabile sino a 240 canali),

sismografo (ch 1-24)



Le specifiche tecniche dello strumento sono:

-processore:	Pentium 200 MMx Intel,
-Trattamento dati:	Floating Point 48-Bit,
-Ambiente operativo:	Windows7 32 bit,
-Display:	VGA colori LCD_TFT 15"
-Supporto memorizz.:	Hard Disk
-Risoluzione acquisizione:	12/48 bit
-Sonde ambiente interne:	temperatura, umidità relativa
-Formato dati:	SEG-2 (.dat),
-Durata acquisizioni:	Rifrazione, 32÷4000 ms
-Tempi campionamento:	da 12 µs a 4 ms
-Filtri digitali:	Passa alto (25÷400 Hz) Passa Basso (100÷250 Hz) Notch (50÷180 Hz)
-Attivazione filtri:	in acquisizione o manualmente
-Trigger:	inibizione impulsi dovuti a rimbalzi
- Canali:	24/48 (max 240)



Altra strumentazione

- un cavo con lunghezza 65 m per collegare in serie i geofoni
- 24 geofoni da 4,5 Hz
- Sorgente impulsiva: mazza battente da 10 Kg con piastra di battuta in alluminio 15x15 cm
- Bindella metrica per posizionare i ricevitori.

Cenni sulla tecnica MASW

L'indagine sismica di tipo MASW consente la determinazione diretta della velocità delle onde trasversali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) dei terreni del sottosuolo in esame in modo da ottenere una corretta caratterizzazione della categoria sismica del sottosuolo dell'area in oggetto (V_{s30}). L'indagine sismica adottata, Masw (in sismica attiva) è stata scelta in funzione delle limitazioni che affliggono in genere misure di onde Sh in metodi a rifrazione tradizionali (come ad es. difficoltà di generazione di onde polarizzate Sh o inversioni di velocità identificabili con difficoltà e/o valutabili con costosi lunghi ed impegnativi metodi sismici in foro es. Cross-Hole e Down-Hole).

La tecnica sismica Masw, è stata ampiamente testata (perfezionata già dal 1999) ed è contemplata fra le indagini per la definizione rigorosa del profilo di Vs per caratterizzazione sismica del sito (*NTC-08 e ad es. Lai, Foti e Rota "Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione - IUSS Press Eucentre 2009*) e risulta migliore per la caratterizzazione del primo sottosuolo; le tecniche basate su utilizzo di registrazioni di microtremori di origine naturale e/o antropica (tecniche passive) possono caratterizzare infatti il sottosuolo più in profondità, da diverse decine, sino alle volte, anche a centinaia di metri (*Lai et alii - IUSS Press Eucentre 2009*) ma con minor risoluzione per la zona prossima alla superficie che invece più ci interessa.

Diversi autori (*Lachet e Bard 94, Bard 99, De Ferrari et alii - Università studi di Genova 2008*), segnalano che sistemi d'acquisizione in sismica passiva sono poco idonei per terreni alluvionali, in quanto l'utilizzo di tecniche passive, è possibile o consigliabile nel caso di:

- intenso "rumore antropico" (che impedisce o maschera l'acquisizione dei dati in sismica attiva)
- discreto contrasto di impedenza sismica ($>2,5-3$) fra il substrato (sismico) ed il materasso alluvionale sovrastante
- è importante l'interramento del sensore sismico passivo (per migliorare l'accoppiamento sensore-terreno), quindi altri autori (*Konno e Ohmachi 98, Bard 99, Bindi et alii 2000, Parolai et alii 2002*) consigliano di evitare terreni caratterizzati da: erba, fango, terreno saturo, neve, ghiaccio, materiali incoerenti in superficie (ghiaia, ciottoli, quindi piazzali rilevati ecc.), coperture artificiali con piastrelle, superfici sintetiche, ecc.

Valutando le sopracitate motivazioni per caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista del profilo Vs/profondità è stata realizzata una prospezione Masw, (rilevazione onde di Rayleigh - tecnica in sismica attiva).

Dal punto di vista operativo l'indagine è stata eseguita stendendo lungo una linea 24 ricevitori (geofoni), ad una distanza intergeofonica costante ed energizzando ad una estremità dello stendimento con una mazza su una piastra di alluminio. La distanza tra il punto di energizzazione e il primo geofono è denominata "offset".

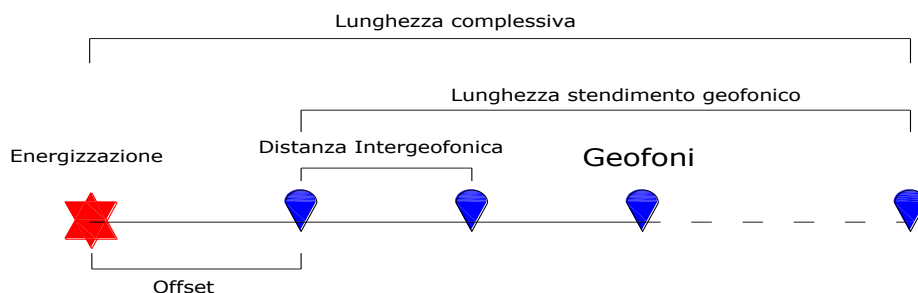


Fig.33 Schema illustrativo prova Masw

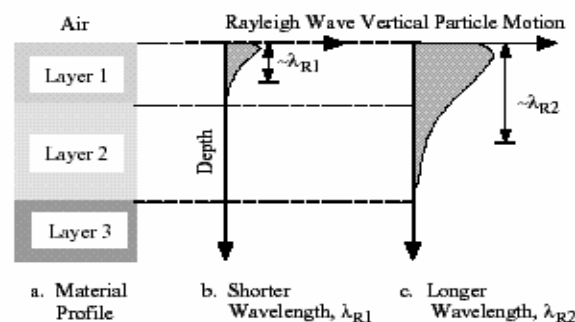
La Base Masw eseguita, per le possibilità operative presenti in corrispondenza del sito di intervento, presenta (Compreso il punto di shot) la geometria come indicato:

➤ Numero geofoni	24
➤ Distanza Intergeofonica	2,0 m
➤ Lunghezza stendimento geofonico	46 m
➤ Distanza punto di shot da primo geofono “offset”	10 m
➤ Lunghezza complessiva	56 m

Si ricorda che data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), la tecnica di acquisizione per onde di superficie necessita di geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz. Quindi le basi teoriche della tecnica di Acquisizione delle Masw, (analisi ed elaborazione delle onde di superficie di Rayleigh) sono completamente diverse dalle onde P od S degli stendimenti di simica a riflessione o rifrazione). Perciò nell'acquisizione con tecnica Masw, non è possibile caratterizzare la tecnica con un classico coefficiente geometrico che esprime la profondità di investigazione in funzione della lunghezza della stesa sismica, (come nella riflessione o nella rifrazione), ove infatti le metodiche di interpretazione si basano sui tempi di arrivo ai geofoni delle onde riflesse o rifratte (quindi si misurano dei tempi). Nella tecnica Masw non si misurano dei tempi, ma viene eseguita una trattazione spettrale dei sismogrammi e mediante trasformata di Fourier si restituisce lo spettro del segnale sismico nel dominio frequenza (f) n° d'onda (k) detto anche dominio f-k. La lunghezza dello stendimento dipende sia dal numero di ricevitori utilizzabili, sia dallo spazio disponibile.

Normalmente si dispongono i ricevitori ad interasse costante compreso tra 0,5 m e 3,0 m. (con array a parità di numero di ricevitori un interasse di 3,0 m consente di avere uno stendimento di ricevitori più lungo e quindi una maggiore risoluzione della curva di dispersione lungo la coordinata numero d'onda k; tuttavia si riduce il numero d'onda di Nyquest oltre cui non si ha certezza sull'affidabilità del segnale misurato.

Al contrario un interasse piccolo può essere necessario in piccoli spazi e consente un intervallo più ampio di numeri d'onda, ma comporta una minore risoluzione della curva di dispersione lungo i numeri d'onda.



La profondità investigata dalle onde di Rayleigh dipende più propriamente dalla lunghezza d'onda, dalla velocità delle onde di taglio V_s e dalla frequenza. (Stokoe II and Santamarina, 2000).

La relazione quindi che meglio consente di valutare la profondità di investigazione di un'indagine masw, è legata più che alla dimensione dello stendimento, al valore della V_s assegnata ad una determinata profondità z dal piano campagna, calcolata in funzione della lunghezza d'onda, cioè:

$$z = \frac{\lambda}{1.5/2.0}$$

Dalle tecniche di analisi-interpretazione (analisi spettrale), mediante utilizzo del software (**SWAN®** vers. 2008) in seguito descritta più in dettaglio, dal grafico “*Experimental Dispersion Curve*” (nel dominio Frequenza-Velocità) è possibile ottenere la lunghezza d’onda delle onde di Rayleigh, caratteristiche dell’indagine eseguita, quindi per il sito in esame risultando una $\lambda \approx 75$ m, in base alla formulazione sopra indicata se ne può dedurre una profondità di investigazione pari a circa 50/37 m

Con la tecnica Masw (indagine sismica non invasiva di superficie) si ottiene una modellazione del sottosuolo, basandosi sulla propagazione delle onde di Rayleigh, oggi realizzata mediante approcci multi-stazioni, che risultano robusti ed efficienti (Foti, 2000; Lai e Wilmanski, 2005) rispetto ai primi approcci del metodo, che si basavano essenzialmente su 2 ricevitori (Prova Sasw - Stoke et al., 1994).

Queste prove (masw-sasw) sfruttano la proprietà della dispersione geometrica, che rende la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh (V_R) dipendente dalla frequenza di eccitazione in mezzi verticalmente eterogenei.

L’onda di Rayleigh, costituisce un particolare tipo d’onda sismica ed è facilmente individuabile in quanto ha una velocità differente dai treni d’onda delle onde P ed S risultando più lenta anche di queste ultime, con una velocità di propagazione $V_R \approx 0,9 \div 0,96$ Vs (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing Territorio Politecnico di TORINO)

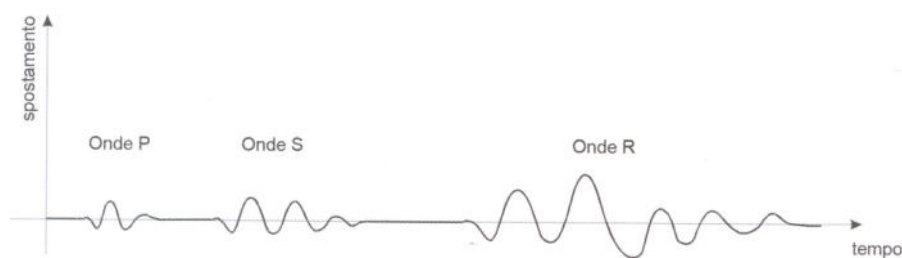


Fig. 34: sismogramma che evidenzia l'arrivo distinto di onde P, S e di Rayleigh (da Crespellani e Facciorusso “Dinamica dei terreni”)

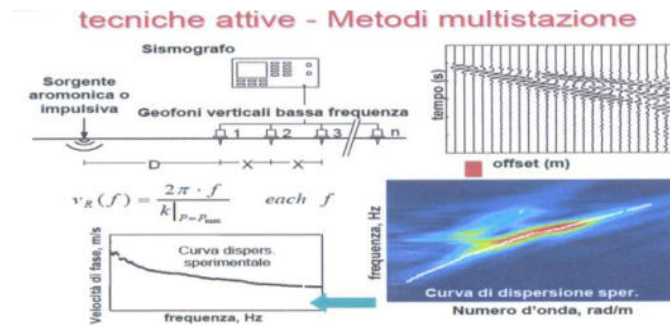
L’onda di Rayleigh si trasmette infatti sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo ed è il risultato dell’interferenza e della combinazione d’onde sismiche di pressione (P-waves) e onde di taglio polarizzate verticalmente (Sv-waves).

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione (piccolo sisma) e nel registrare le vibrazioni prodotte sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

Il profilo di Vs viene determinato attraverso la soluzione di un problema matematico di inversione della curva di dispersione (V_R in funzione della frequenza).

In un mezzo reale stratificato avviene una dispersione delle onde prodotte; in altre parole, una deformazione del treno d’onda, dovuto alla variazione della velocità di propagazione, con la frequenza, che varia in relazione alle caratteristiche di “rigidezza” di ogni singolo strato.

Nella figura visualizzata (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing Territorio Politecnico di TORINO) è ben riassunto il processo di acquisizione ed il passaggio alla curva di dispersione:



Gli elementi a bassa frequenza penetrano quindi più in profondità, con velocità di fase in genere più alta, rispetto alle componenti ad alta frequenza.

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, visualizzato dai grafici **$V(fase)/f(frequenza)$** , tramite elaborazioni e programmi dedicati, è convertito in profili **V_s / profondità**.

Interpretazione dati acquisiti

L'interpretazione delle tecniche di rilievo sismico MASW, prendono spunto come sopra accennato dalle prime tecniche studiate da Nazarian e Stokoe (1984-94) che per primi hanno presentato il metodo SASW che utilizzava una sorgente d'impulso e 2 soli sismometri di rilevazione (1 Hz).

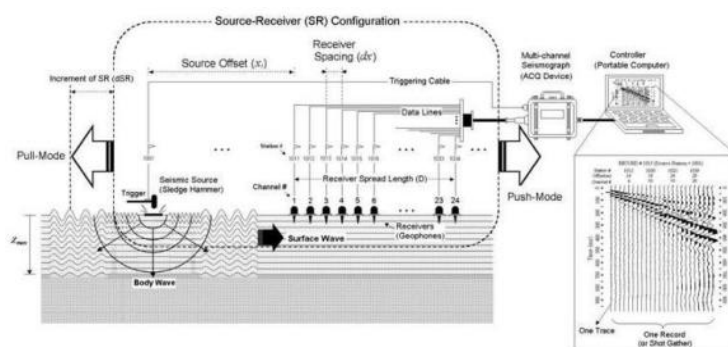
Tale tecnica come d'altronde anche la Masw, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è notorio che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

A tale scopo Park et Alii (1999) hanno studiato e sviluppato il metodo MASW, per sopperire alle difficoltà d'applicazione, della tecnica Sasw in diverse situazioni.

La differenza principale è l'utilizzo simultaneo di 24 (o più) geofoni (sismometri polarizzati verticalmente - frequenza massima 4,5 Hz) per consentire di ricavare numerosi profili di velocità V_s , ricavati dallo studio delle velocità di fase, dei numerosi treni d'onda di Rayleigh che sono registrati ai sismometri.

I geofoni possono essere spazati da 0,5 sino ad un massimo di circa 2-3 m e forniscono una ridondanza statistica delle misure delle velocità di fase, avvalorandone quindi la veridicità (rispetto al metodo Sasw che si basava solo su di un'unica misura).

Le tracce dei sismogrammi possono essere salvate nel dominio temporale, permettendo quindi di distinguere ed evidenziare (nel record di registrazione) le onde di Rayleigh, caratterizzate da elevata ampiezza di segnale (la quasi totalità dell'energia prodotta si ripartisce nelle onde di Rayleigh).



Dal sismogramma tramite una trasformata nel dominio, **frequenza (f) – numero d'onda (k)**, le tracce cui corrispondono i massimi spettrali (senza trascurare i modi superiori se presenti) si può così risalire alla curva di dispersione (cioè un grafico ampiezza/frequenza) mediante la relazione:

$$V_R(f)=f/k.$$

che consente di individuare il segnale proprio, relativo alle onde superficiali che interessano tale metodologia.

Il processo iniziale di individuazione della curva di dispersione caratteristica del sito in esame è ottenuto tramite il software (**SWAN®** vers. 2008) seguito poi da una fase di elaborazione-interpretazione, eseguendo una “analisi spettrale” si procede sostanzialmente nella risoluzione del cosiddetto problema inverso: a partire dalla curva di dispersione misurata in situ, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri sismici, secondo il seguente schema:

- Concatenazione dei file contenenti i record di registrazione in situ.
- fase di pre-processing per “ottimizzare” i record stessi in modo da migliorare la qualità dell'interpretazione cioè eventuale filtraggio o “pulizia” dei dati grezzi.
- Passaggio dal sismogramma al dominio spettrale mediante trasformata FK.
- Picking dei punti dello spettro per ottenere la curva di dispersione sperimentale; la procedura consiste nel trovare per ogni frequenza dei massimi assoluti/relativi dello spettro FK, finalizzata alla individuazione del modo fondamentale di propagazione dell'onda (ovvero quello a velocità minore), senza trascurare (analisi multimodale) di ricercare anche eventuali modi superiori.
- Estrazione curva di dispersione sperimentale mediante la procedura sopra indicata dallo spettro FK.
- Inversione: tale procedura è avviata allo scopo di ottimizzare un modello stratigrafico che sia relativo e sovrapponibile alla curva di dispersione sperimentale propria del sito; in tale procedura il programma **SWAN®** utilizza una tecnica di inversione lineare tipo OCCAM che presenta il vantaggio di minimizzare l'errore quadratico medio tra dati sperimentali e dati teorici. In linea generale come in gran parte dei processi di inversione (definiti “try and error”) l'inversione viene fermata quando un determinato parametro, definito ϵ (cioè la differenza fra dato osservato e dato calcolato) è in genere $< 2-3\%$. L'inversione OCCAM, utilizzando differenze quadratiche medie, dà risultati ancora migliori, di un'inversione lineare classica, dato che quando si raggiunge lo stop dell'inversione (ϵ_{MIN}) cioè un valore percentualmente molto piccolo, la sovrapposizione delle curve è davvero buona.
- Fase di ottimizzazione e di taratura della curva teorica, realizzata contestualmente alla procedura d'inversione, con inserimento (eventuale) di strati sino ad un massimo di 30, assegnazione di moduli di Poisson e taratura dello spessore degli strati mediante confronto con prove dirette (prove penetrometriche, stratigrafie di sondaggio, colonne di perforazioni di pozzi ecc.) ed eseguendo ulteriori processi di inversione allo scopo di raffinare il risultato ottenuto, cioè una curva di dispersione teorica finale molto ben sovrapposta a quella sperimentale.

L'obiettivo finale cioè l'ottenimento di un profilo verticale delle Vs, minimizzando le imprecisioni (risultati random), ottenendo quindi un modello ad elevata attendibilità e fortemente rappresentativo, mediante le tarature, del reale profilo Vs/profondità del sito in analisi, come d'altronde suggerito anche da ricercatori in ambito geofisico (es. Dal Moro et alii Gruppo Esplor. Geofisica - Dip. Geol e Scienze Marine Univ. Trieste *“cosa migliore è confrontare lo spettro di velocità osservato, con le curve teoriche di dispersione di un modello che riteniamo plausibile per l'area sotto esame.”*).

Considerazioni sulle tecniche di inversione:

- Le tecniche d'inversione possono fornire soluzioni non univoche, ma proprio ovviare a questa possibilità, si eseguono TARATURE, con dati reali del sito (prove cpt, stratigrafie ecc.) utilizzando anche parametri che esprimono la “rigidezza” degli strati individuati (es. coeff. Poisson), proprio per indirizzare l'inversione verso un modello molto vicino a quello reale.
- La funzione obiettivo (il misfit tra dato osservato e dato calcolato) è prossima a zero, solo in caso ideale in assenza di rumore; per questo motivo il sismogramma può essere trattato o filtrato per ridurre al minimo od eliminare eventuali rumori o disturbi esterni, che non hanno nulla a che fare con l'onda sismica che stiamo analizzando.

- E' fuorviante e sbagliato attribuire una percentuale di errore eseguendo una operazione di alterazione delle velocità sismiche, ottenute dall'esecuzione dei dettagliati processi di inversione sopra esposti (esempio attribuendo un errore globale del $\pm 10\%$, quindi alterando ad es. le velocità sismiche ottenute moltiplicando $\cdot 0,9$ le Vs dei singoli strati), perché in tal modo si **vanificherebbe** completamente l'elaborazione Masw, che è stata fatta con cura ed esperienza secondo principi codificati e consolidati. Ipotizzando possa esistere un modello Vs/profondità analogo a quello definito con l'interpretazione corretta della prova Masw, ma con velocità alterate (cioè diminuite/aumentate del 10%) si otterrebbe un Match fra curva sperimentale e teorica **completamente non attendibile**. A titolo di esempio si allegano alcune figure che illustrano tale erronea operazione di alterazione delle Vs calcolate.

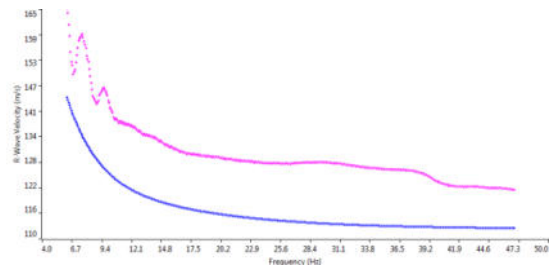
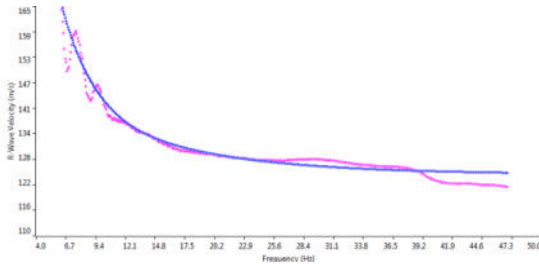


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica (blu) ottenuta dal processo inversione Masw dominio frequenza/velocità.
Si noti la quasi perfetta corrispondenza del fitting fra le due curve

Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica "alterata" modificando le Vs diminuendole erroneamente del 10% (blu) dominio frequenza/velocità.
Si noti la completa "sfasatura" della curva teorica sinonimo di un allontanamento dalla reale stratigrafia sismica che caratterizza il sito quindi un modello **NON ACCETTABILE**

Le curve di dispersione sopra esposte sono da considerare indicative e non riferite alla indagine Masw della presente relazione; sono riferite ad un generico sito con una stratificazione di 5 strati, mantenuti identici nelle 2 simulazioni, con analoghi coefficienti di Poisson assegnati (variabili fra 0.45-0.48) e $V_{S30} \approx 190$ m/sec (grafico a sinistra) e $V_{S30} \approx 170$ m/sec (grafico a destra).

Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{s30})

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (come previsto da DM 17/01/2018) sono stati esaminati i dati ottenuti dalla prospezione sismica di superficie, opportunamente tarati con dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc..) e con le prove penetrometriche eseguite in sito.

i valori della velocità media delle onde di taglio V_s risultano pertanto:

metodo sismico attivo-MASW onde Rayleigh:

1° strato: da 0,0 a 1,10 m	spessore medio 1,10 m	velocità media onde V_s 215 m/sec
2° strato: da 1,10 a 5,30 m	spessore medio 4,20 m	velocità media onde V_s 180 m/sec
3° strato: da 5,30 a 11,20 m	spessore medio 7,70 m	velocità media onde V_s 220 m/sec
4° strato: da 11,20 a 14,80 m	spessore medio 3,60 m	velocità media onde V_s 210 m/sec
5° strato: da 14,80 a 19,50 m	spessore medio 4,70 m	velocità media onde V_s 230 m/sec
6° strato: da 19,50 a $\geq 30,00$ m	spessore medio $\geq 10,50$ m	velocità media onde V_s 280 m/sec

In base a quanto sopra, la classificazione delle categorie dei suoli di fondazione, come da All. 2 (*cfr. Ord. Pres. Consiglio dei Ministri 3274 del 20/03/2003 e art. 3.2.2 DM 17/01/2018*), ai vari strati sismo stratigrafici individuati, è stato associato il valore della velocità V_s direttamente misurate, consentendo di ottenere la V_{s30} , cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{si}}}$$

dove

h_i = spessore dello strato i -esimo
 V_{si} = velocità onde S nello strato i -esimo
 N = numero strati considerati

Ottenendo in base ai dati sopra esposti,

Prospezione MASW

$V_{s30} = 217$ m/sec (da p.c. a -30 m)

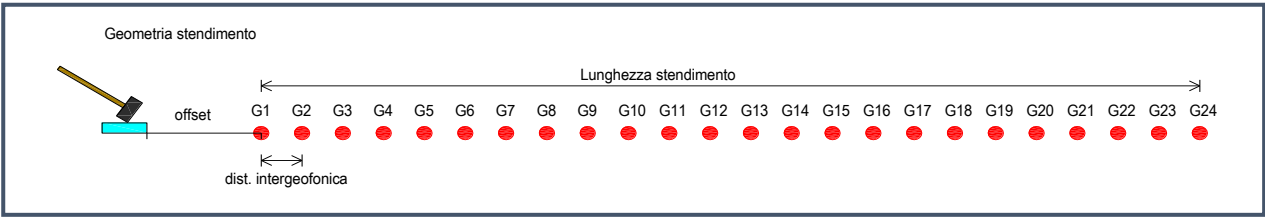
Da cui si presume che, in base alla misura delle onde di taglio V_{s30} , il terreno corrisponde alla categoria del suolo di fondazione di tipo **C** (*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.*)

Si ricorda che in base a quanto previsto da art. 3.2.2 NTC2018, "Per le fondazioni superficiali, la profondità del calcolo delle V_s 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.

TECNOGEOFISICA SNC

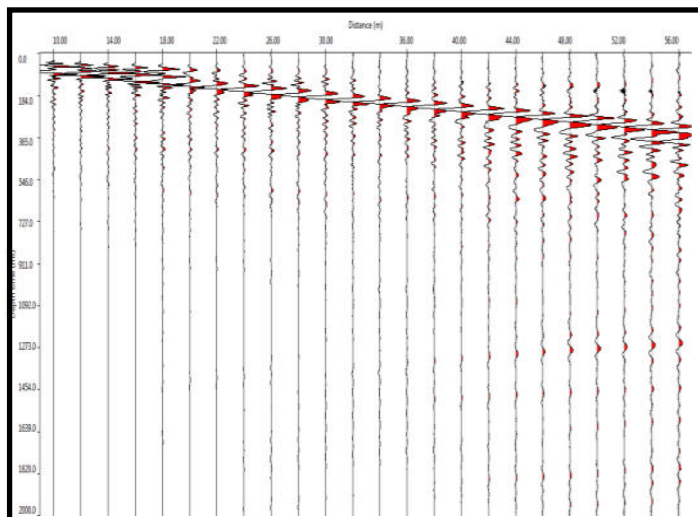
Allegati Intervento

Ubicazione indagine

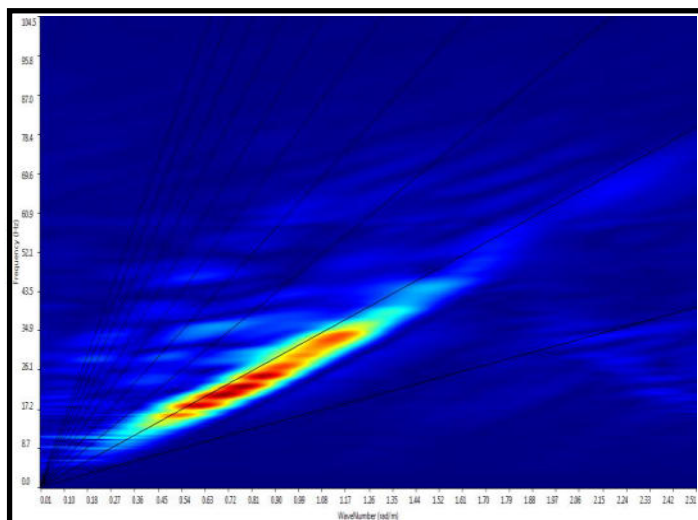


Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza stendimento m	Offset m	Lunghezza complessiva m	Ubicazione centro indagine
MASW	24	2,0	46	10	56	Lat. N 44,231496 Long. E 12,033203

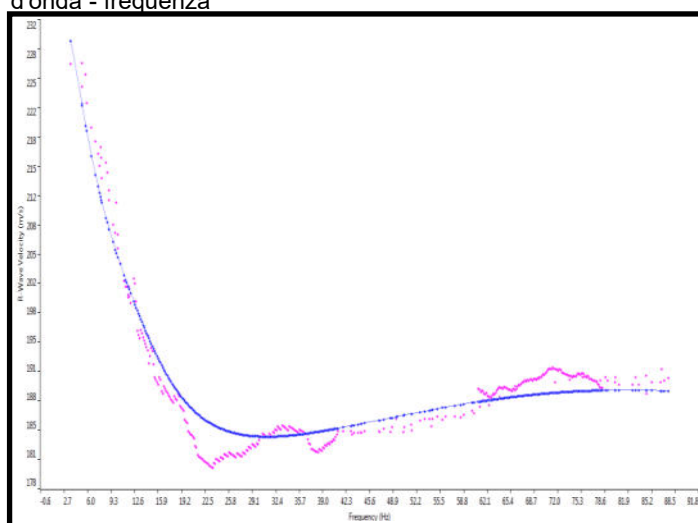
Scheda MASW



Sismogramma nel dominio spazio/tempo



Spettro FK - Rappresentazione del sismogramma nel dominio numero d'onda - frequenza



Sovrapposizione curva di dispersione calcolata / curva teorica rappresentata nel dominio Frequenza/Velocità

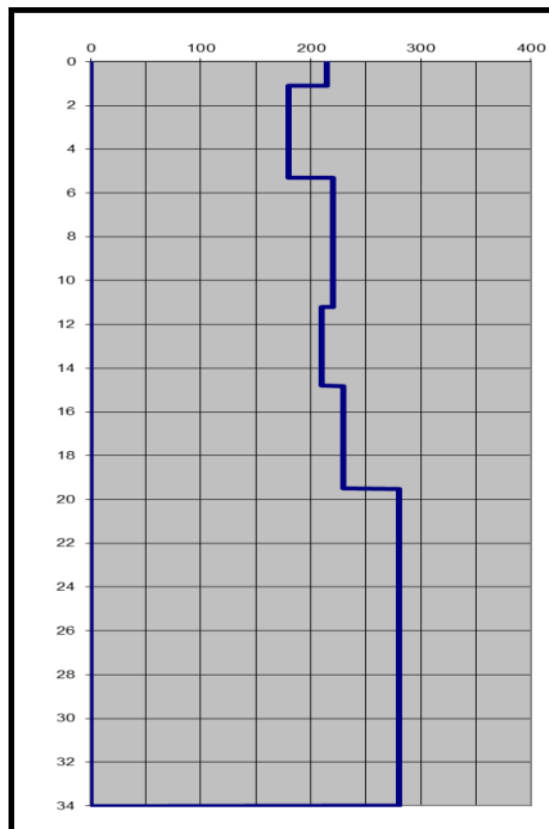


Grafico velocità/profondità onde di taglio

Risultati Elaborazione MASW

Strato	profondità		Spessor e m	Vel. m/se c
	da	a		
STRATO 1	0.00	1.10	1.10	215
STRATO 2	1.10	5.30	4.20	180
STRATO 3	3.50	11.20	7.70	220
STRATO 4	11.20	14.80	3.60	210
STRATO 5	14.80	19.50	4.70	230
STRATO 6	19.50	≥30.00	≥10.50	280

$$V_{s0} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Dove:

 h_i = spessore dello strato i-esimo V_{si} = velocità onde S nello stato i-esimo N = numero strati considerati

V_{s0} da pc a -30 m = **217 m/sec**