

Scuola Superiore di Studi e Perfezionamento S. Anna
Variante al Piano Operativo Comunale per modifica alla scheda norma 4 PP
UTOE 31 Carraia zona omogenea f4 (allegato 1b delle NTA)
con contestuale modifica alle aree contigue al comparto destinate alla
salvaguardia idraulica articolo 39.11 delle NTA del POC.
Adozione

Geol. Francesca Franchi
321A OGT



Geol. Emilio Pistilli
1665A OGT



CONTENUTI: RELAZIONE DI FATTIBILITÀ GEOLOGICA

COMMITTENTE: Sant'Anna – Scuola Universitaria Superiore Pisa

☒	REDAZIONE	n.	1	del	Giugno 2026
☐		n.		del	
☐		n.		del	

GEOPROGETTI
studio associato

Via Venezia, 77
 56038 Ponsacco (PI)
 tel. 0587 54001
 info@geoprogettisa.it
geoprogettisa.it

**Comune di San Giuliano Terme
Provincia di Pisa**

**Scuola Superiore di Studi e Perfezionamento S. Anna
Variante al Piano Operativo Comunale per modifica alla scheda norma
4 PP UTOE 31 Carraia zona omogenea f4 (allegato 1b delle NTA)
con contestuale modifica alle aree contigue al comparto destinate alla salvaguardia
idraulica articolo 39.11 delle NTA del POC.
Adozione.**

Relazione di fattibilità geologica

Indice

Premessa.....	3
Riferimenti normativi.....	5
1 – Inquadramento geologico.....	5
2 – Inquadramento sismico.....	8
4 – Classificazione delle pericolosità.....	8
Pericolosità geologica:.....	8
Pericolosità sismica locale:.....	9
Pericolosità idraulica:.....	9
4 – Criteri generali di fattibilità.....	11
Criteri generali di fattibilità in relazione agli aspetti geologici e sismici:.....	12
Criteri generali di fattibilità in relazione al rischio di alluvioni:.....	13

Appendici alla relazione:

- appendice 1: inquadramento cartografico
- appendice 2: reticolo idrografico locale
- appendice 3: carta geomorfologica
- appendice 4: carta dei dati di base
- appendice 5: carta delle MOPS
- appendice 6a: carta della pericolosità geologica del Piano Operativo Comunale vigente
- appendice 6b: carta della pericolosità geologica, variante al Piano Operativo Comunale
- appendice 7a: carta della pericolosità sismica del Piano Operativo Comunale vigente
- appendice 7b: carta della pericolosità sismica Variante al Piano Operativo Comunale
- appendice 8: carta della pericolosità idraulica del Piano Operativo Comunale vigente
- appendice 9: carta dei battenti idraulici del Piano Operativo Comunale vigente
- appendice 10: carta della magnitudo idraulica del Piano Operativo Comunale vigente
- appendice 11: carta pericolosità da alluvione del PGRA dell'Autorità di Bacino distrettuale
- appendice 12: carta della pericolosità idraulica, variante al Piano Operativo Comunale
- appendice 13: carta sintetica delle pericolosità ai sensi del DPGR 5/R 2020
- appendice 14: documentazione prove geotecniche a disposizione in sito
- appendice 15: documentazione indagini sismiche a disposizione in sito

Premessa

La presente relazione geologico-tecnica viene redatta a supporto della variante al Piano Operativo del Comune di San Giuliano Terme che ha come scopo la modifica della scheda norma 4 PP UTOE 11 Carraia ed una diversa perimetrazione delle aree contigue, destinate alla salvaguardia idraulica nel territorio comunale (figure 1 e 2).

La variante si inserisce in un quadro di Atti istituzionali, tra i quali, si richiamano:

- anno 2005: Accordo di Programma per il trasferimento delle attività dell'Azienda Ospedaliero Universitaria Pisana e del polo universitario da S. Chiara a Cisanello. Tale accordo prevede il riassetto idraulico dei bacini di Pisa Nord-est e San Giuliano Terme, anche tramite la realizzazione di alcune casse di laminazione, di cui due ubicate nel comune di San Giuliano Terme;
- anno 2010: Studio idrologico ed idraulico a supporto della "variante al PS e RU per la realizzazione del Campus Sant'Anna San Giuliano – Polo scienze della Vita e dell'Ambiente". Da questo studio deriva che all'area del Comparto 4, destinata alla realizzazione del polo scientifico ed interessata da un vincolo di salvaguardia idraulica per la realizzazione di una delle suddette opere di laminazione, compete un volume di laminazione di circa 33'840 m³, riportato nella scheda norma vigente;
- anno 2013: Accordo di Programma per la realizzazione del "Polo Scientifico Sant'Anna in San Giuliano Terme" tra la scuola S. Anna ed il Comune di San Giuliano Terme;
- anno 2024: Accordo con la Scuola S. Anna approvato con DGC n. 174, per la revisione delle previsioni sovraordinate, anche con la finalità di ridurre, mantenendo il medesimo standard di sicurezza, il volume di invaso di 33'840 m³ nell'area di prevista urbanizzazione della Scuola Sant'Anna;
- anno 2025: Informativa n. 295, con la quale la Giunta Comunale ha valutato lo stato di attuazione degli studi carattere idraulico a firma dall'Ing. David Settesoldi a supporto dell'Accordo del 2024 e i conseguenti risultati propedeutici all'attivazione della Variante Urbanistica.

In particolare la variante in esame trae origine dagli esiti dello studio idraulico condotto dall'Ing. Settesoldi il quale, simulando una diversa perimetrazione delle casse di laminazione precedentemente individuate dall'Accordo di Programma stipulato nel 2005, ha verificato la possibilità di escludere il Comparto 4 dalla perimetrazione originaria senza pregiudizio per la salvaguardia idraulica del territorio.

Le immagini che seguono evidenziano i perimetri delle casse di laminazione nel territorio comunale, nello stato attuale ed in quello proposto dalla Variante al P.O.C.

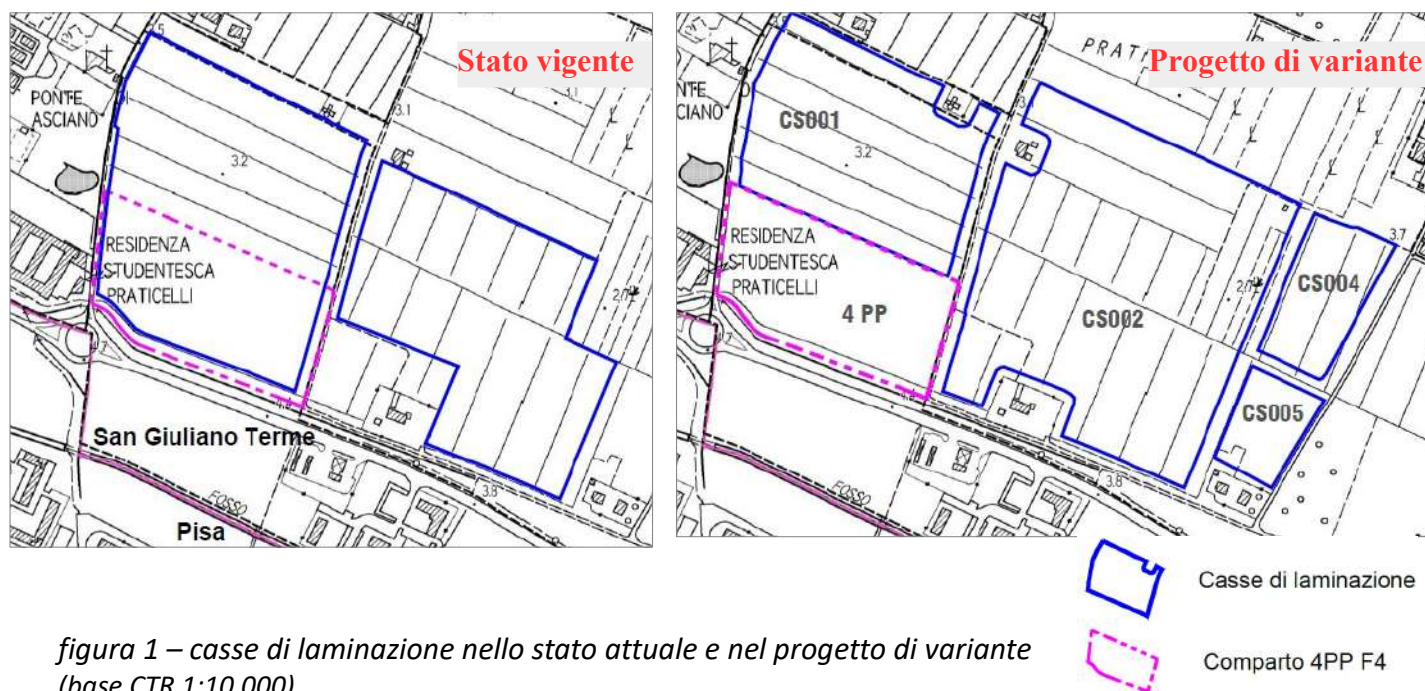


figura 1 – casse di laminazione nello stato attuale e nel progetto di variante
(base CTR 1:10.000)

Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati dello studio idraulico ed agli elaborati urbanistici a supporto della proposta di Variante al POC.

Ai fini della presente indagine, per inquadrare le caratteristiche geologiche del sottosuolo e le condizioni di pericolosità dell'area, si è fatto riferimento agli studi geologici del Piano Operativo Comunale ed alle cartografie dell'Autorità di Bacino distrettuale.

La conoscenza del sottosuolo è stata approfondita utilizzando i risultati delle prove a disposizione, sia quelle del Piano Operativo che quelle già effettuate a supporto della progettazione degli interventi previsti nel comparto.

Tra le indagini disponibili in sito ne sono state estratte alcune rappresentative delle caratteristiche geomeccaniche e sismiche del sottosuolo, di cui si riportano in appendice i certificati (appendici 4, 14 e 15).

Le indagini effettuate hanno consentito di definire le pericolosità dell'area alla luce della normativa vigente e di esprimersi in merito alla fattibilità del progetto di Variante nel rispetto della normativa vigente.

Riferimenti normativi

- Piano Operativo del Comune di San Giuliano Terme (POC) ai sensi del D.P.G.R. 53/R 2011 (ottobre 2019)
- D.P.G.R. 25 ottobre 2011 n.53/R: "Regolamento di attuazione dell'Art. 62 L.R. n.1/2005";
- D.P.G.R. 30 gennaio 2020 n.5/R: "Regolamento di attuazione dell'Art. 104 della L.R. n.65/2014";
- Del. D.G.R.T. n. 31/2020 Direttive Tecniche al D.P.G.R. 5/R, Allegato A;
- D.P.C.M. 1 dicembre 2022: "Approvazione del primo aggiornamento del Piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino settentrionale." (G.U. n. 31 S.g. del 07-02-2023);
- L.R. 24 luglio 2018 n. 41: "Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010 n. 49 ...";
- D.P.G.R. 19 gennaio 2022, n. 1/R "Regolamento di attuazione dell'art. 181 della L.R. 10 novembre 2014, n. 65 (Norme per il governo del territorio). Disciplina sulle attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico.";
- Ministero Infrastrutture e Trasporti Decreto 17 gennaio 2018: "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni".

1 – Inquadramento geologico

L'area in esame si colloca all'interno della pianura alluvionale del Fiume Arno, con quote del p.c. intorno ai 2 m circa s.l.m.

Le aree di variante non sono interessate dal Vincolo Idrogeologico R.D. 3257/1923 né dalle Aree boscate, né infine dai tratti del Reticolo Idrografico e di Gestione censito dalla Regione Toscana con la L.R. 79/2012 ed aggiornato con D.C.R. 24/2025.

I terreni naturali sono costituiti dai sedimenti alluvionali attuali e recenti, di origine fluvio-palustre, in facies prevalentemente argillosa. La stratigrafia di questo tratto di pianura è caratterizzata nel complesso da un primo livello di terreni argillosi di media consistenza, di pochi metri di spessore, ai quali segue un consistente spessore di terreni argillosi organici, aventi consistenza da bassa a molto bassa (figura 3), che si estendono talvolta fino oltre i 40 m di profondità.

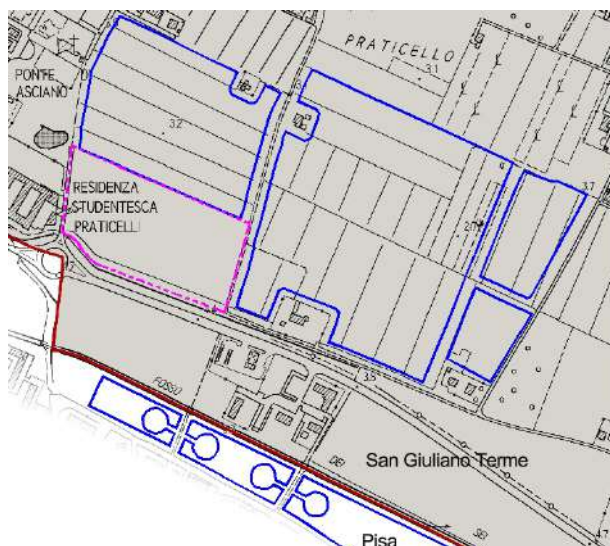


figura 3 - carta geomorfologica
(Piano Operativo comunale)

Dal quadro conoscitivo a disposizione e dai risultati delle indagini effettuate in sito non emerge la presenza di particolari processi o elementi di instabilità geomorfologica. Dalla carta MOPS si rileva tuttavia che l'area di variante rientra in una più vasta zona interessata da subsidenza diffusa (appendice 5).

Nel corso della campagna geognostica effettuata nel 2020, i carotaggi e le prove penetrometriche sono stati spinti fino a profondità comprese tra i 46 ed i 50 m sotto il p.c. Le indagini hanno confermato che nel sottosuolo, al di sotto del primo livello di media consistenza, spesso 5 m, si estende un dominio argilloso di consistenza da bassa a molto bassa, fino a circa 44-45 m di profondità, superato il quale si ritrovano terreni più compatti. In questo dominio di argille poco consistenti si intercala, tra le profondità di -21 e -28 m circa, uno strato di terreni più consistenti costituito da argille limose miste a limi sabbiosi e sabbie (figura 4).

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico, dai dati del Piano Strutturale del limitrofo Comune di Pisa, si rileva che le isofreatiche si collocano, nella stagione estiva, tra -1 m dal p.c. ed il p.c. Poiché tutte le prove effettuate in sito mostrano la dominanza di litotipi argillosi sostanzialmente impermeabili a partire da -1 m circa sotto il p.c., è verosimile concludere che le isofreatiche descrivono in questo caso la quota di saturazione della coltre superficiale più che rappresentare una vera e propria falda freatica. Nelle fasce di terreno più vicine ai capofossi, il livello di saturazione può considerarsi più direttamente controllato dalle oscillazioni del livello idrico dell'acqua nei fossi.

All'interno di tale quadro idrogeologico di permeabilità molto bassa, si rileva la presenza di una prima falda acquifera artesia in corrispondenza dei limi sabbiosi che si estendono tra i 21 m ed i 28 m di profondità, e di una seconda falda acquifera artesia in corrispondenza delle sabbie che si estendono a partire dai 44 m circa. In entrambi i casi i livelli piezometrici si stabilizzano intorno ai -3 m circa dal p.c. naturale.

Il modello geologico-stratigrafico del sottosuolo, ottenuto dalla correlazione dei dati acquisiti, è schematizzato graficamente nella seguente figura 4.

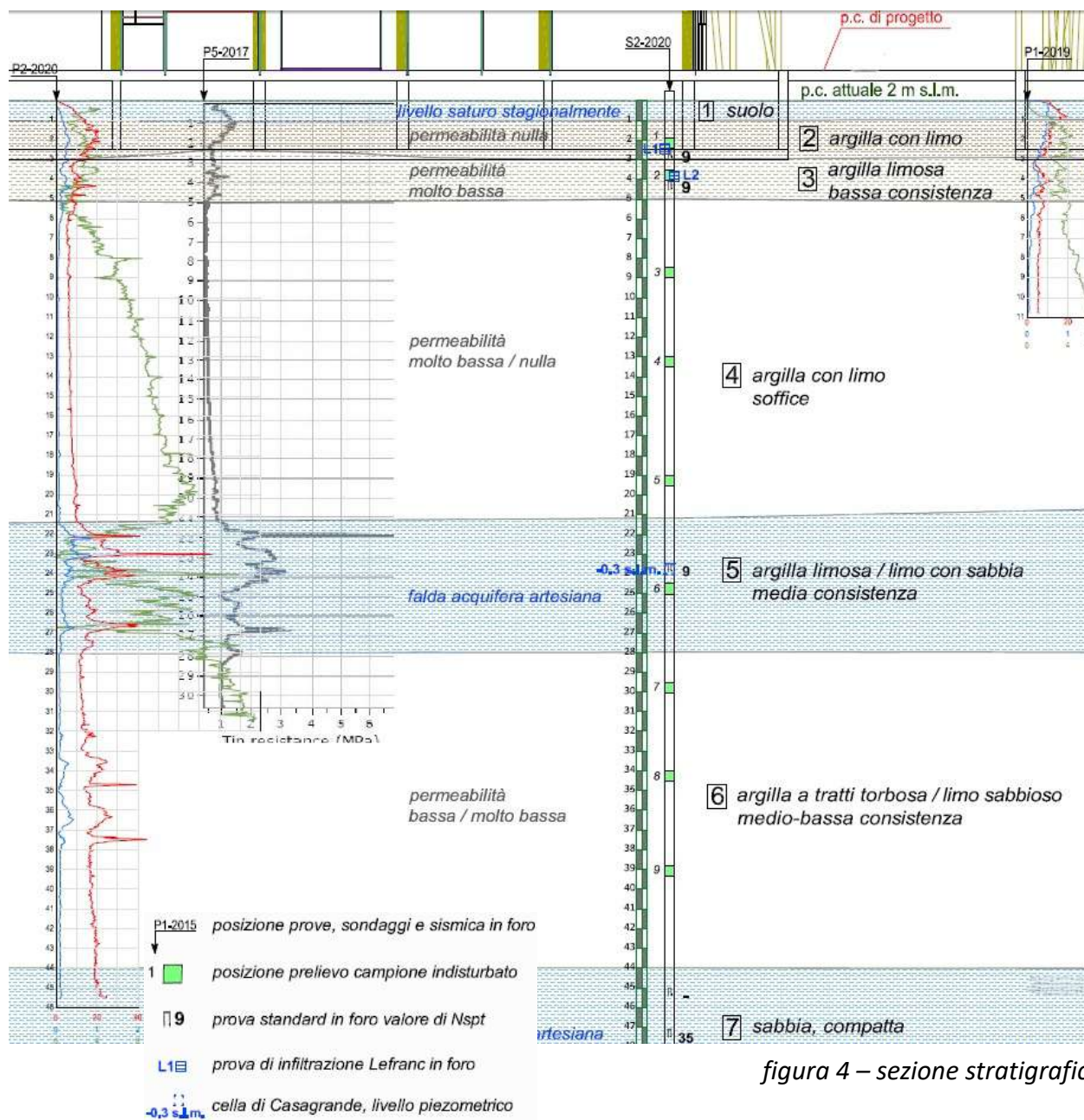


figura 4 – sezione stratigrafica

2 – Inquadramento sismico

Nella classificazione sismica 2014 della Regione Toscana che discende dagli allegati 1 e 2 della D.G.R.T. 878/2012 (“aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008 ...”), il territorio comunale di San Giuliano Terme è stato confermato sismico nella zona “3”.

Dal Database macrosismico italiano DBMI15 dell'INGV, si rileva che gli eventi storici di maggiore intensità sono quelli del 1117 “Monti Pisani” e 1846 “Colline Pisane”, il primo con magnitudo M_w non determinata ed il secondo con M_w 6, entrambi avvertiti a Pisa con un'intensità MCS tra 7 ed 8 (Database macrosismico italiano DBMI15 vers. 4.0 [data set], a cura di Locati M., Camassi R. ed al., INGV, 2022).

Nella mappa di pericolosità sismica dell'INGV, il territorio di San Giuliano Terme è collocato all'interno della zona sismogenetica ZS 916 (Versilia-Chianti), in cui la magnitudo momento massima M_{max1} (“osservata”) è $M_{wMax1} = 5.68$ (INGV, “Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'OPCM 3274/2003 - Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, aprile 2004”).

L'assetto locale dei terreni dal punto di vista sismostratigrafico è indicato nella carta MOPS del POC, in cui l'area di indagine è inserita nelle zone stabili, suscettibili di amplificazioni locali, senza indicazioni di effetti dinamici di sito quali la liquefazione (appendice 5).

Dalla stessa cartografia, si rileva che i principali picchi di amplificazione del rapporto H/V si individuano per le frequenze inferiori ad 1 Hz, coerentemente con quanto indicato dalla misura in sismica passiva a disposizione, che identifica un notevole spessore di terreni di copertura a bassa e medio-bassa velocità sismica (appendice 5).

4 – Classificazione delle pericolosità

Pericolosità geologica:

La Pericolosità geologica in corrispondenza del Comparto 4 e delle casse di laminazione, così come individuata nel P.O.C. vigente, redatto ai sensi della previgente normativa D.P.G.R. 53/R 2011, è pari alla Classe G.3: “Pericolosità geologica elevata - aree caratterizzate da terreni con

caratteristiche geomeccaniche scadenti" (appendice 6a).

Sulla base degli studi effettuati nel corso della presente indagine, tale giudizio appare congruo anche ai sensi della vigente normativa D.P.G.R. 5/R 2020, potendosi attribuire alle aree in oggetto la stessa classe di pericolosità G.3 - Pericolosità geologica elevata: "aree caratterizzate da terreni con scadenti caratteristiche geomeccaniche" (appendice 6b).

Le aree interessate dalla Variante non rientrano nella perimetrazione della pericolosità geomorfologica del "PAI dissesti" dell'Autorità di Bacino dell'Appennino Settentrionale.

Pericolosità sismica locale:

La Pericolosità sismica in corrispondenza del Comparto 4 e delle casse di laminazione, secondo la cartografia del P.O.C. Elaborata ai sensi del previgente D.P.G.R. 53/R 2011, è pari alla Classe S.3: "Pericolosità sismica locale elevata" la quale identifica "zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti rilevanti" (appendice 6a).

Sulla base degli approfondimenti effettuati nel corso della presente indagine ai sensi della vigente normativa D.P.G.R. 5/R 2020 si conferma il giudizio di pericolosità sismica locale elevata, classe S.3, riconoscendo la presenza di "aree con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti rilevanti" (appendice 6b).

Pericolosità idraulica:

Facendo riferimento agli specifici studi idraulici a livello comunale redatti a supporto del P.O.C. ed alla vigente cartografia della pericolosità, si rileva che alle aree in esame sono attribuiti livelli di pericolosità diversi:

- Il Comparto n. 4 è soggetto ad allagamenti per eventi con Tempo di Ritorno (Tr) inferiore ai 30 anni, per cui rientra nella classe di pericolosità "I.4 - pericolosità idraulica molto elevata" così come definita dal D.P.G.R. 53/R 2011 (appendice 8).
- Le casse di laminazione denominate CS002 e CS004 nello studio idraulico a supporto della variante in oggetto, ricadono anch'esse in zone interamente o parzialmente classificate a pericolosità idraulica I.4 ai sensi del D.P.G.R. 53/R 2011.
- Le casse di laminazione denominate CS001 e CS005, ricadono invece in aree potenzialmente soggette ad allagamenti per eventi con Tempi di Ritorno (Tr) superiori a 30 anni, e fino a 200 anni, per cui rientrano nella classe di pericolosità "I.3 - pericolosità idraulica elevata" ai sensi del D.P.G.R. 53/R 2011.

Tali livelli di pericolosità sono riportati nell'appendice 8, che riproduce uno stralcio della carta di pericolosità idraulica del POC con sovrapposti i perimetri del Comparto n. 4 e quelli delle casse di esondazione di cui alla variante in oggetto.

Nella cartografia della pericolosità da alluvione del P.G.R.A. del Distretto Appennino Settentrionale, il Comparto n. 4 e le casse di laminazione ricadono interamente nella classe di pericolosità media, "P2", che corrisponde alle zone interessate da potenziali eventi alluvionali con tempi di ritorno dai 30 ai 200 anni (appendice 11).

La differenza tra la pericolosità idraulica del PGRA e quella del P.O.C. è da ricondurre allo specifico approccio dello studio idraulico condotto in sede di aggiornamento del Piano Operativo. Nell'ambito territoriale in cui si inserisce l'area di studio, stante l'indisponibilità di studi idraulici relativi al Fiume Morto, in sede di Piano Operativo è stato utilizzato, in accordo con il Genio Civile sede di Lucca, un modello non convenzionale di tipo unicamente idrologico, volto ad individuare le aree soggette ad accumulo dei battenti, quindi morfologicamente poste a maggior rischio.

Tuttavia, poiché la modellistica idraulica adottata non rispettava i requisiti richiesti dall'allegato 3 al PGRA, la validazione è stata possibile solo a livello comunale senza che potesse essere recepita nella cartografia di PGRA.

Sulla base delle precedenti considerazioni, la pericolosità da alluvioni, rivalutata ai sensi del vigente D.P.G.R. 5/R 2020, risulta la seguente :

- Il Comparto n. 4 si inquadra nella classe di pericolosità "P3 - alluvioni frequenti" ai sensi della L.R. 41/2018;
- le casse di laminazione di n. 2 e n. 4 si inquadrano nella classe di pericolosità "P3 - alluvioni frequenti" ai sensi della L.R. 41/2018;
- le casse di laminazione di n. 1 e n. 5 si inquadrano nella classe di pericolosità "P2 – alluvioni poco frequenti" ai sensi della L.R. 41/2018;

(cfr. appendice 12).

Facendo riferimento alla carta dei battenti idrici dello studio idraulico del POC si rileva che i battenti sono complessivamente modesti, non superiori ai 30 cm (appendice 9).

La magnitudo idraulica ai sensi della L.R. 41/2018, relativa allo scenario di esondazione dello studio idraulico comunale, risulta perciò moderata per tutte le aree oggetto della proposta di variante (appendice 10).

4 – Criteri generali di fattibilità

Dall'analisi dei dati acquisiti nella presente indagine non discendono modifiche sostanziali al quadro conoscitivo di riferimento fornito dal POC.

La classificazione della fattibilità degli interventi previsti nel Comparto n. 4 e la diversa perimetrazione delle aree destinate alla salvaguardia idraulica, deve tuttavia essere rivalutata alla luce della vigente normativa e resa rispondente ai Criteri Generali di fattibilità del vigente D.P.G.R. 5/R 2020.

A tal fine, sulla base delle precedenti considerazioni, si riporta un estratto della planimetria di cui all'appendice 13, che sintetizza i livelli di pericolosità, a cui seguono i criteri generali di fattibilità individuati per ciascun aspetto.

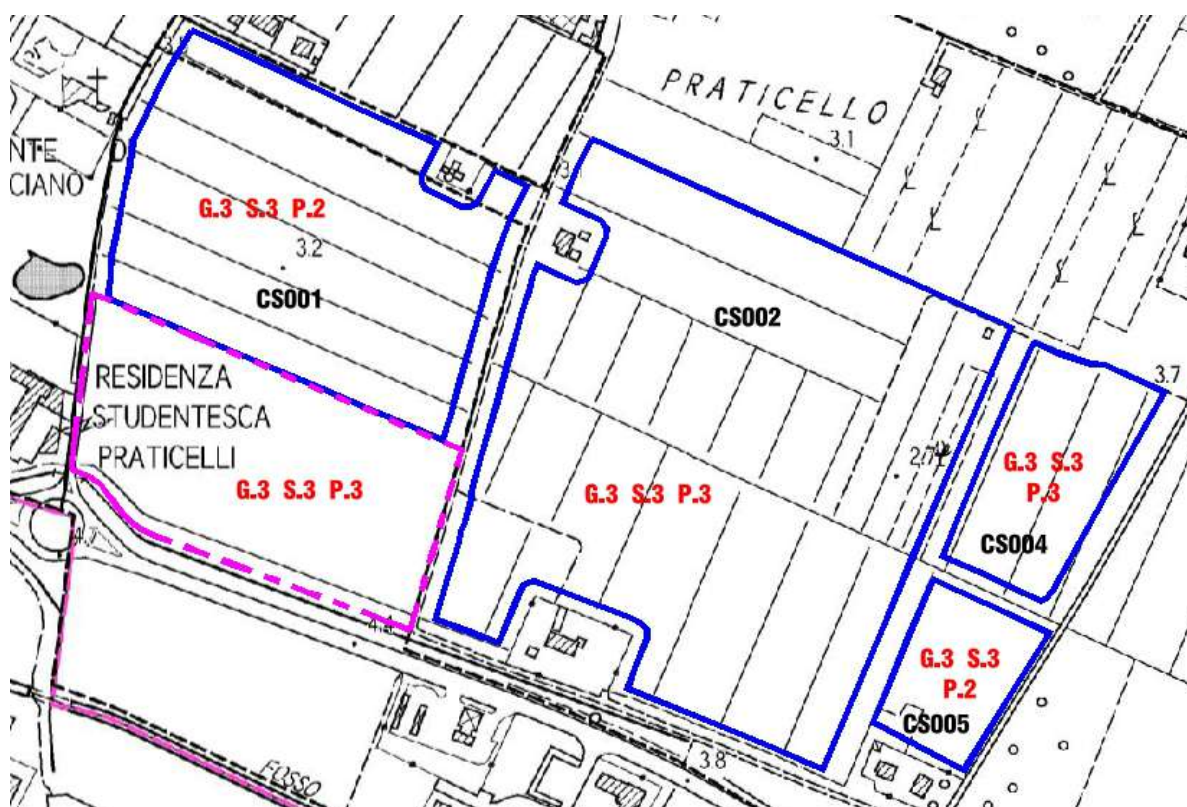


figura 5 – sintesi delle pericolosità

-  Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
-  Comparto 4PP F4

G3*G3 – pericolosità geologica elevata*

- La fattibilità degli interventi di nuova edificazione è subordinata all'esito degli studi ed indagini ai sensi del par. 3.2.2 delle Direttive Tecniche di cui all'Allegato A al D.P.G.R. 5/R.

S3*S3 – pericolosità sismica locale elevata*

- Sono effettuate adeguate indagini geognostiche e verifiche geotecniche finalizzate alla verifica dei cedimenti.

P2 - P3*P2 – aree caratterizzate da alluvioni poco frequenti**P3 – aree caratterizzate da alluvioni frequenti*

- La fattibilità degli interventi è subordinata alla gestione del rischio di alluvioni secondo i criteri generali di fattibilità ai sensi del par. 3.3 delle Direttive Tecniche al D.P.G.R. 5/R (Allegato A).

Di seguito, per ciascun aspetto di pericolosità (geologica, sismica e idraulica) e con riferimento alla destinazione d'uso di maggior impegno, sono riportati i criteri di fattibilità degli interventi a partire dalle indicazioni del vigente D.P.G.R. 5/R 2020.

Per gli interventi minori si deve fare riferimento alla tabella di fattibilità geologica e alle prescrizioni di cui all'Art. 39 delle NTA.

Criteri generali di fattibilità in relazione agli aspetti geologici e sismici:

Per quanto riguarda gli aspetti geologici e sismici, le classi di pericolosità elevata, G3 ed S3, sono da ricondurre alla presenza di terreni di fondazione particolarmente scadenti, per cui i criteri di fattibilità risultano uniformi.

Ai sensi dei criteri generali di fattibilità di cui all'Art. 3.6.3 delle Direttive Tecniche al D.P.G.R. 5/R, "in sede di Piano Attuativo o, in sua assenza, dei progetti edilizi, sono da studiare e approfondire i seguenti aspetti:

- *nel caso di terreni di fondazione particolarmente scadenti, sono effettuate adeguate indagini geognostiche e verifiche geotecniche finalizzate alle verifiche dei cedimenti;"*

In sede di progettazione definitiva delle opere edilizie, la caratterizzazione e modellazione del volume significativo di terreno come prescritta dal D.M. 17 gennaio 2018 e dal D.P.G.R. 1/R 2022, dovrà quindi essere condotta con particolare riguardo alla presenza nel sottosuolo del notevole spessore di terreni molto compressibili e di modesta capacità portante.

In merito alla problematica da subsidenza, il progetto delle nuove edificazioni deve valutare la necessità di proporre misure di attenuazione del rischio quali accorgimenti costruttivi e fondazioni speciali.

Per quanto riguarda gli aspetti sismici, il D.P.G.R. 5/R 2020 prescrive inoltre che, “Nell'ambito dell'area caratterizzata a pericolosità sismica locale elevata (S.3), la valutazione dell'azione sismica (NTC 2018, paragrafo 3.2), ..., è supportata da specifiche analisi di risposta sismica locale, (in conformità NTC paragrafo 3.2.2 e paragrafo 7.11.3), da condurre in fase di progettazione, nei seguenti casi:”

- “realizzazione o ampliamento di edifici strategici o rilevanti, ricadenti, nella classe d'indagine 3 o 4, come definite dal regolamento di attuazione dell'articolo 181 della l.r. 65/2014;”
- “realizzazione o ampliamento di edifici a destinazione residenziale, ricadenti in classe d'indagine 4, come definita dal regolamento di attuazione dell'articolo 181 della l.r. 65/2014;”

Tali prescrizioni dovranno quindi essere valutate alla luce del vigente D.P.G.R. 19 gennaio 2022 n. 1/R e dell'allegato 1, DGRT n. 81 del 31/01/2022.

Criteri generali di fattibilità in relazione al rischio di alluvioni:

Lo studio idraulico del 2025 redatto dall'ing. David Settesoldi, nella soluzione accolta dal Comune all'interno della variante e denominata “configurazione 3”, prevede in sintesi:

- una riduzione della superficie della cassa di laminazione n. 1, già prevista dallo studio idraulico del 2010, che consente di escludere dal perimetro della cassa l'area ove è prevista la realizzazione del Polo scientifico;
- un ampliamento della cassa n. 2 per compensare la riduzione della cassa n. 1;
- l'inserimento di ulteriori tre aree di laminazione, di cui due collocate nel Comune di San Giuliano Terme (cfr. fig. 1).

La relazione dell'ing. Settesoldi, sulla base delle verifiche effettuate conclude che nella “configurazione 3”, le modifiche alla previsione delle casse di laminazione nel Comune di San Giuliano Terme non alterano quanto previsto nel progetto del 2010 e sono funzionali alle finalità dell'Accordo di Programma del 2005.

Nell'appendice 8 alla presente relazione è riportato un sovrapposto dei perimetri delle casse di laminazione nello stato vigente ed in quello della proposta di variante.

Nella nuova configurazione gli interventi previsti all'interno del Comparto 4, sono comunque condizionati da quanto disposto dalla L.R. 41/2018.

Stante il fatto che gli interventi previsti all'interno del Comparto 4 si configurano come nuovi interventi edilizi all'interno del perimetro del territorio urbanizzato, e considerato che ricadono in aree a pericolosità per alluvioni frequenti con magnitudo moderata e battenti ≤ 30 cm, le condizioni alla fattibilità sono stabilite all'interno dell'Art. 11 comma 1, alla lettera b) riporta:

- “b) se ricadenti in aree caratterizzate da magnitudo moderata è realizzata almeno una delle opere di cui all'articolo 8, comma 1, lettere a), b) o c).”

Nelle more della realizzazione delle casse di laminazione di cui all'Accordo di Programma del 2005 è possibile realizzare interventi di nuova costruzione nel rispetto della lettera c) di cui all'Art. 8, comma 1:

- “c) opere di sopraelevazione, senza aggravio delle condizioni di rischio in altre aree.”

L'entità della sopraelevazione per la messa in sicurezza deve tener conto del battente previsto nell'area (≤ 30 cm) cui va aggiunto un franco di sicurezza di almeno 20 cm nel rispetto di quanto stabilito dalle NTA del PO.

Ai fini del non aggravio delle condizioni di rischio in altre aree, i volumi sottratti all'esondazione duecentennale devono essere allocati all'interno della stessa area di intervento.

Per l'invaso di tali volumi è individuata come idonea la porzione Est del Comparto; la progettazione dello scavo dovrà tener conto anche dei possibili apporti idrici dai terreni circostanti che possono saturarsi in superficie per effetto dell'infiltrazione meteorica.

Il progetto dovrà rendere conto anche del sistema di regimazione delle acque meteoriche adottando accorgimenti per mantenere la funzionalità del recapito finale nel rispetto dell'invarianza idraulica.

Tutti gli interventi attuati all'interno del Comparto devono garantire la ricucitura del reticolo minore e la corretta funzionalità del reticolo scolante locale.

La geometria delle casse di laminazione è tale da non interferire con la quota della falda freatica. Dato che la quota di saturazione dei terreni è controllata dalle oscillazioni del livello idrico nei fossi e che la base delle casse è stata fissata a una quota maggiore rispetto al fondo dei canali di drenaggio, si conclude che il deflusso delle acque avverrà naturalmente a gravità.

A livello di Piano di Bacino non sussistono ulteriori prescrizioni fermo restando che nelle aree P2 e P3, per le finalità di cui all'art. 1 della disciplina di piano, sono consentiti gli interventi che

possono essere realizzati in condizioni di gestione del rischio idraulico, con riferimento agli obiettivi di cui al comma 4 dello stesso articolo.

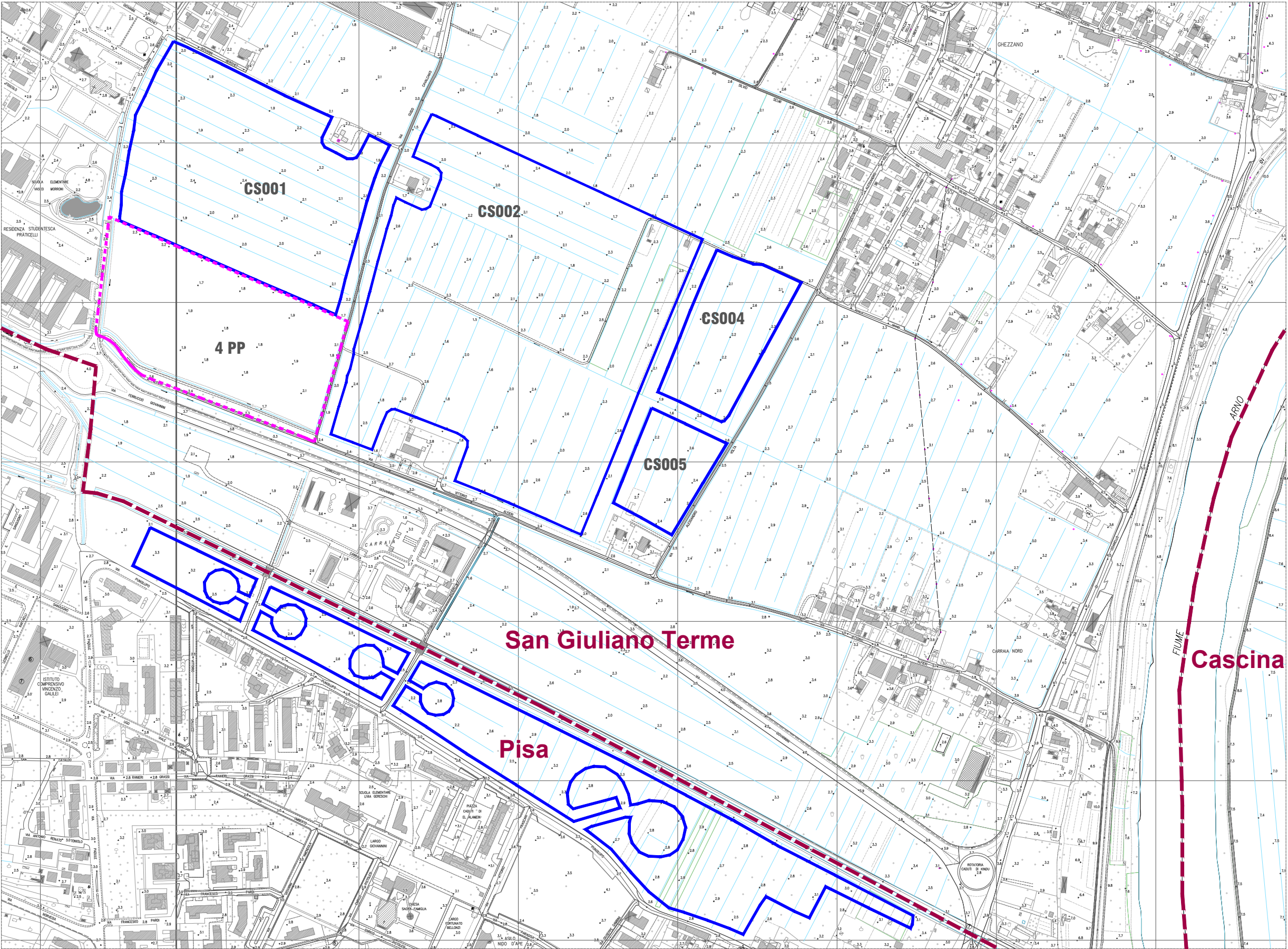
Ponsacco, Giugno 2026



Geol. Francesca Franchi

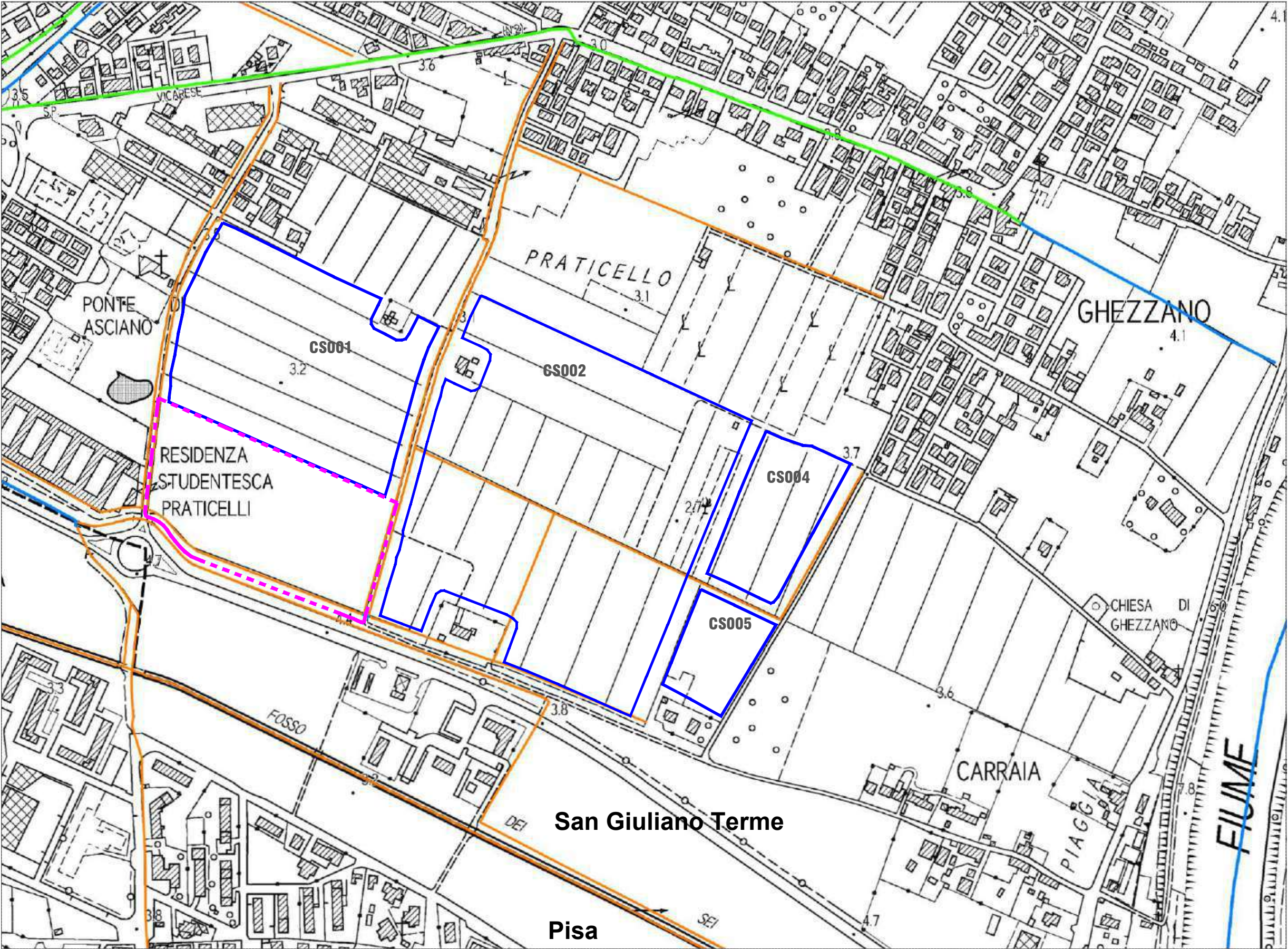
Geol. Emilio Pistilli

Inquadramento cartografico
Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:2.000



- LEGENDA
- Limiti comunali
 - Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
 - Comparto 4PP F4

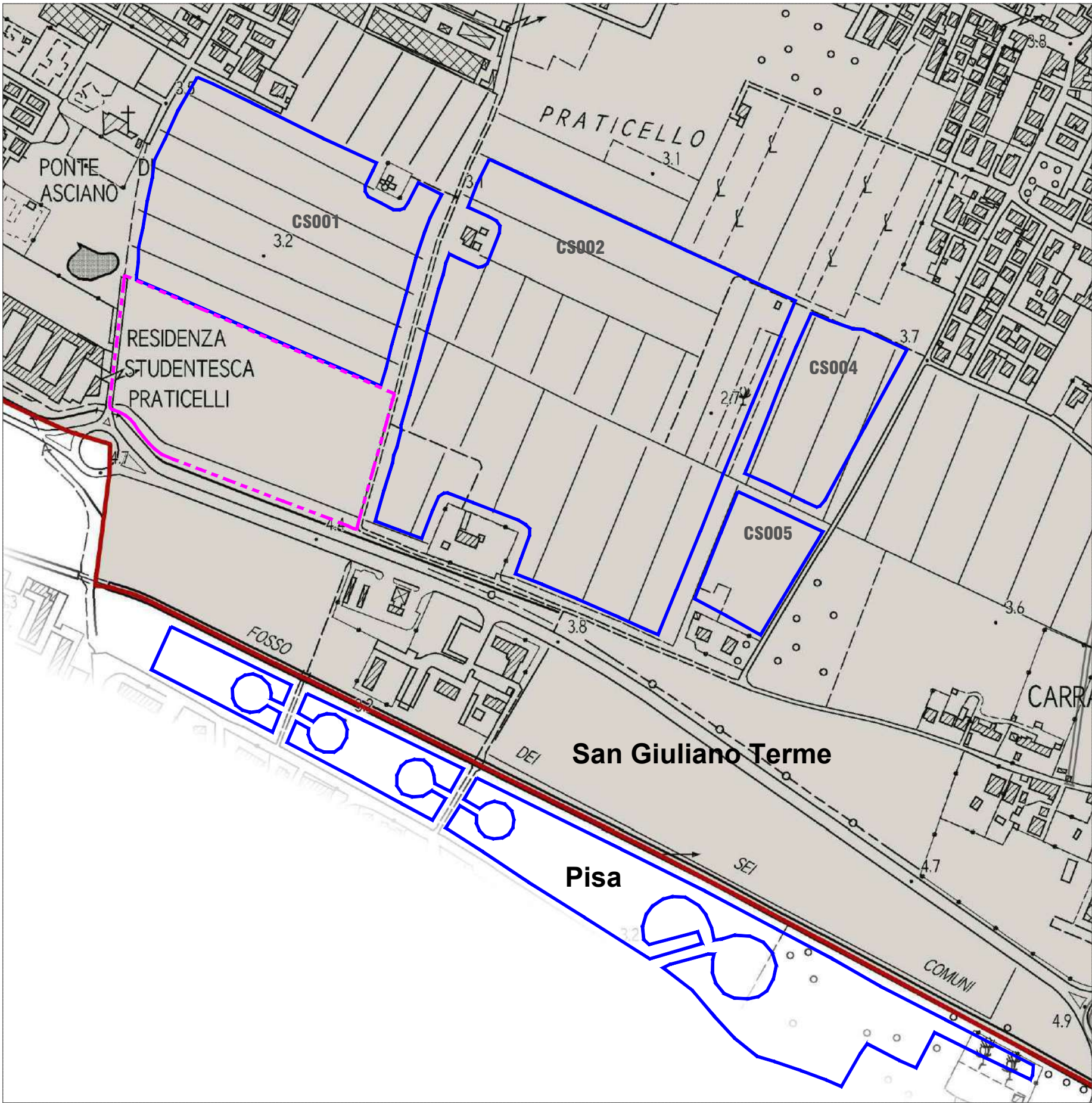
Reticolo idrografico e di gestione L.R. n. 79/2012 - aggiornamento D.C.R. n. 24/2025



LEGENDA D.C.R. 24/2025

- SI reticolo idrografico L.R. 79/2012
- TOMBATO
- Infrastruttura Idrica non facente parte del reticolo idrografico
- CS002 Casse di laminazione - variante al Piano Operativo Comunale
- Perimetro comparto 4PP F4

Carta geomorfologica

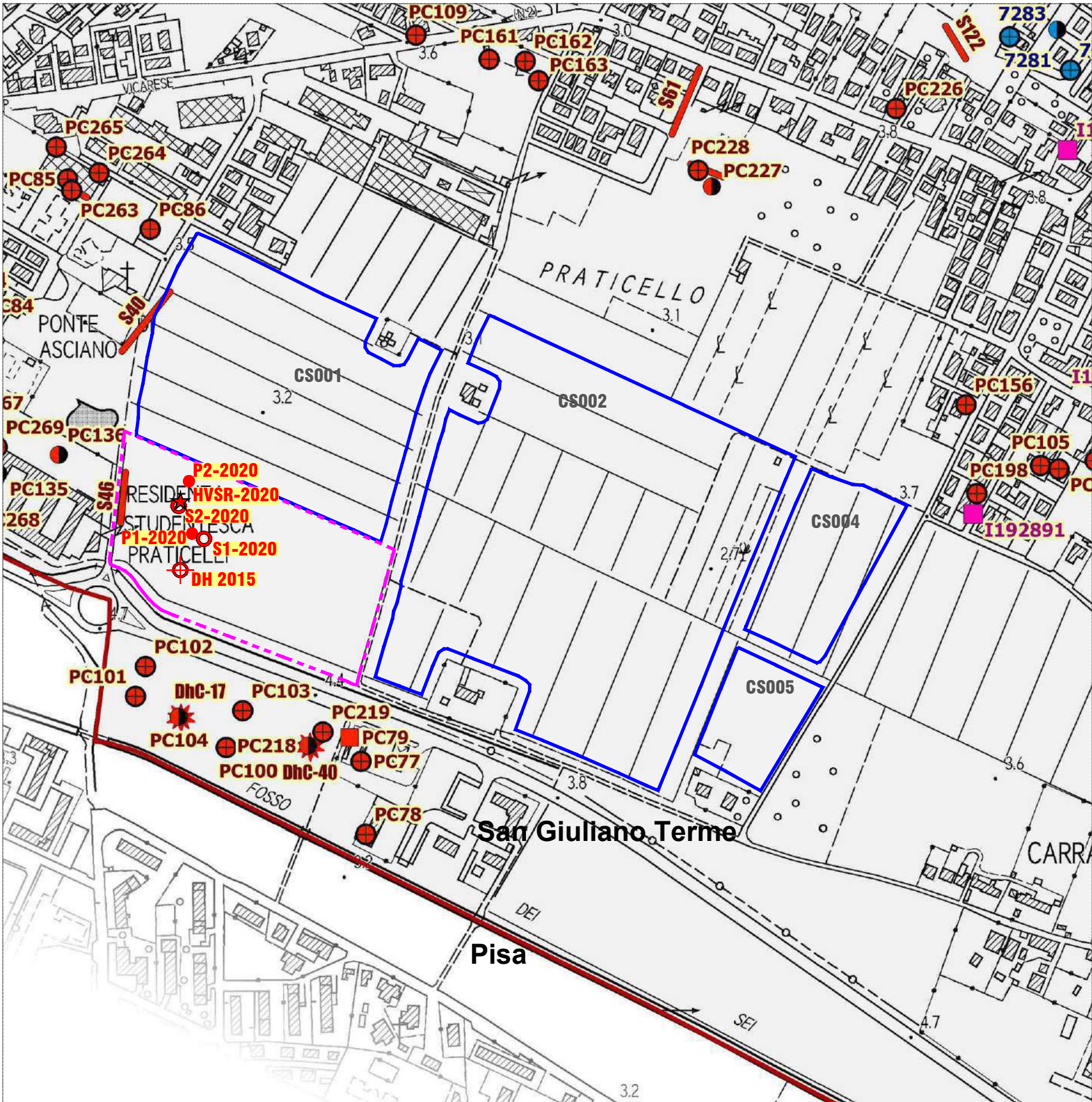


Base cartografica: Piano Operativo Comunale di San Giuliano Terme

LEGENDA

-  Limite comunale
- Aree di fondovalle*
- Sedimenti alluvionali attuali e recenti*
-  Terreni prevalentemente argillosi
-  Casse di laminazione - variante al Piano Operativo Comunale
-  Perimetro comparto 4PP F4

Carta dei dati di base



Base cartografica: Piano Operativo Comunale di San Giuliano Terme

LEGENDA

Limite comunale

INDAGINI GEOGNOSTICHE

Database ISPRA:

Sondaggio a distruzione di nucleo

Database della Provincia di Pisa:

Prova penetrometrica statica
 Sondaggio a carotaggio continuo

Indagini reperite negli archivi comunali:

Prova penetrometrica statica
 Sondaggio geognostico
 Sondaggio a distruzione di nucleo

INDAGINI GEOFISICHE

Reperate negli archivi comunali:

Sismica puntiforme (HVSr e Down Hole)
 Stese sismiche (MASW e Rifrazione)

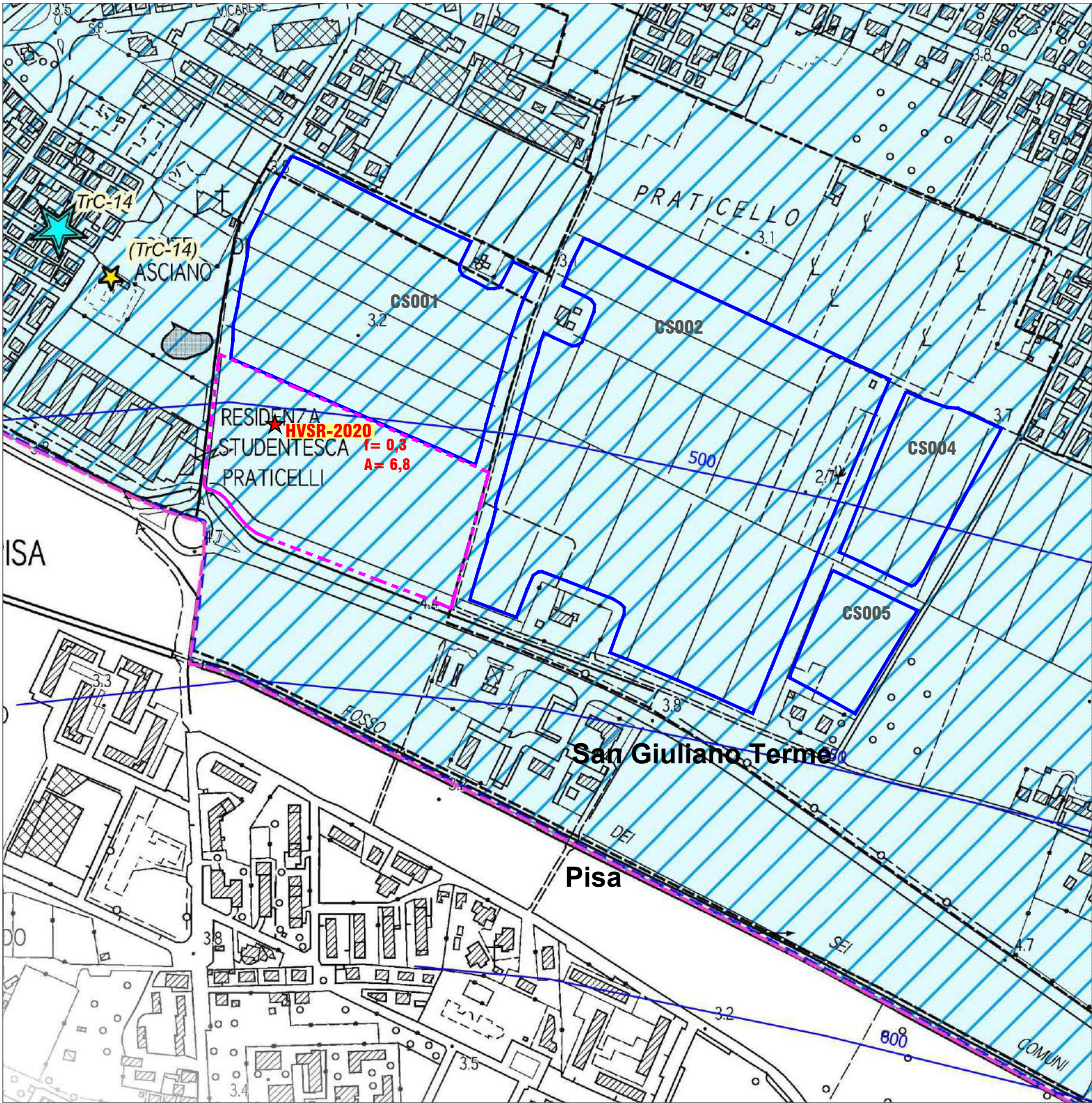
INDAGINI A DISPOSIZIONE IN SITO

S1 - 2020 Sondaggio a carotaggio continuo
 P1 - 2020 Prova penetrometrica
 HVSr - 2020 Misura microtremore ambientale HVSr
 DH 2015 Prova sismica in foro Down-hole

CS002 Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale

Comparto 4PP F4

Carta delle MOPS



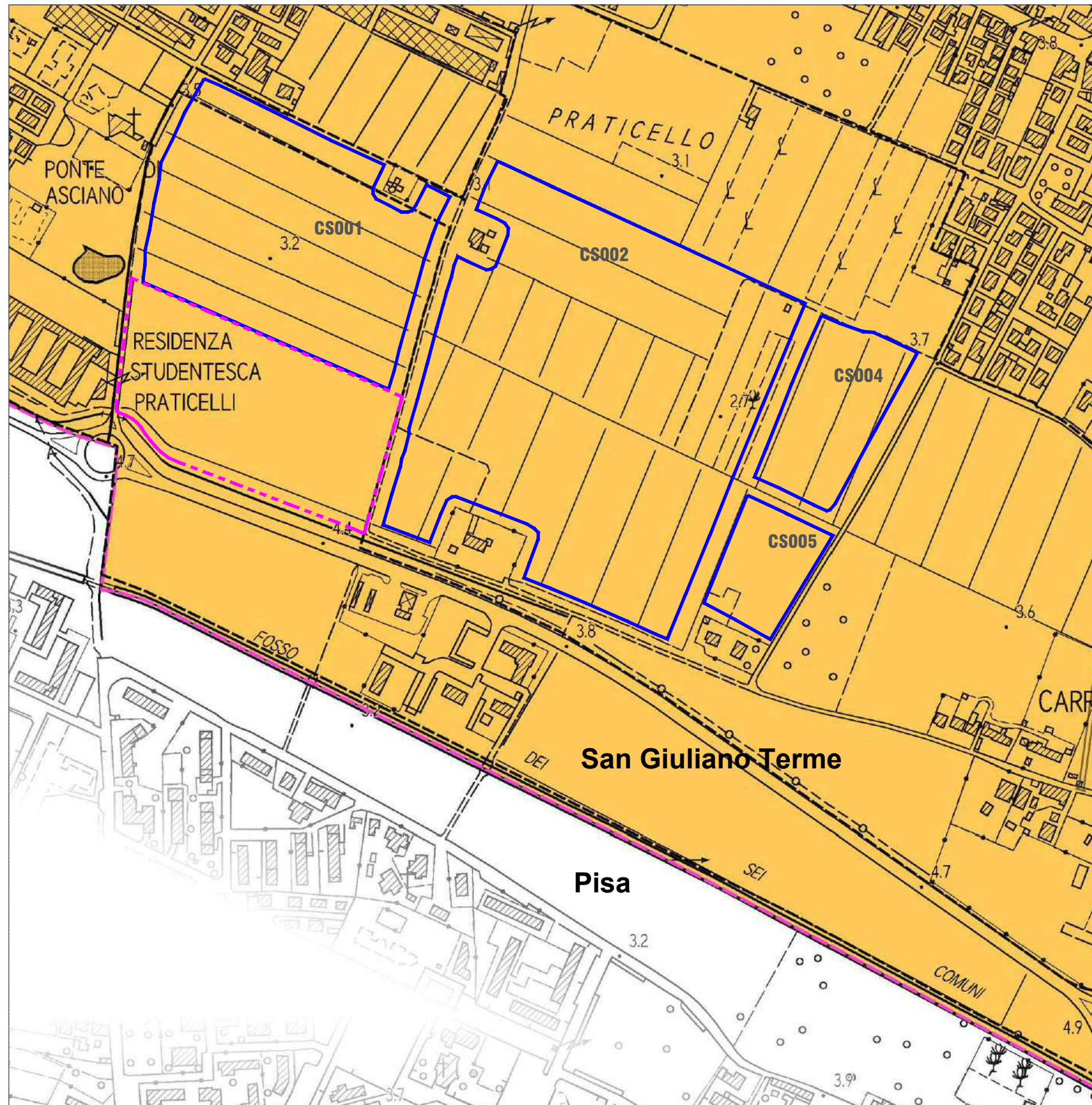
Scala 1:5.000

Base cartografica: Piano Operativo Comunale di San Giuliano Terme

LEGENDA

- Limite comunale
 - Area di indagine MOPS
 - Profondità presunta del substrato sismico
- FORME DI SUPERFICIE**
- Subsidenza diffusa constatata da misure interferometriche
- ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI**
- ZONA 5 - Depositi alluvionali attuali e recenti
- MISURE DI FREQUENZA DI SITO (sismica passiva)**
- Frequenza del picco di amplificazione (Hz), scala cromatica:
- 1.0 - 1.5
 - < 1.0
- Ampiezza del picco di amplificazione (A0), scala dimensionale:
- 2 - 3
 - 3 - 4
 - > 4
- INDAGINI A DISPOSIZIONE IN SITO**
- HVSR - 2020** ★ Misura microtremori
f = frequenza del picco HVSR
A = ampiezza del picco
 - CS002 Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
 - Comparto 4PP F4

Carta della Pericolosità Geologica - Piano Operativo Comunale vigente



LEGENDA

Limite comunale

Limite UTOE

PERICOLOSITA' GEOLOGICA D.P.G.R. 53/R/2011

G1 - Pericolosità geologica bassa

G2 - Pericolosità geologica media

G3 - Pericolosità geologica elevata

G4 - Pericolosità geologica molto elevata

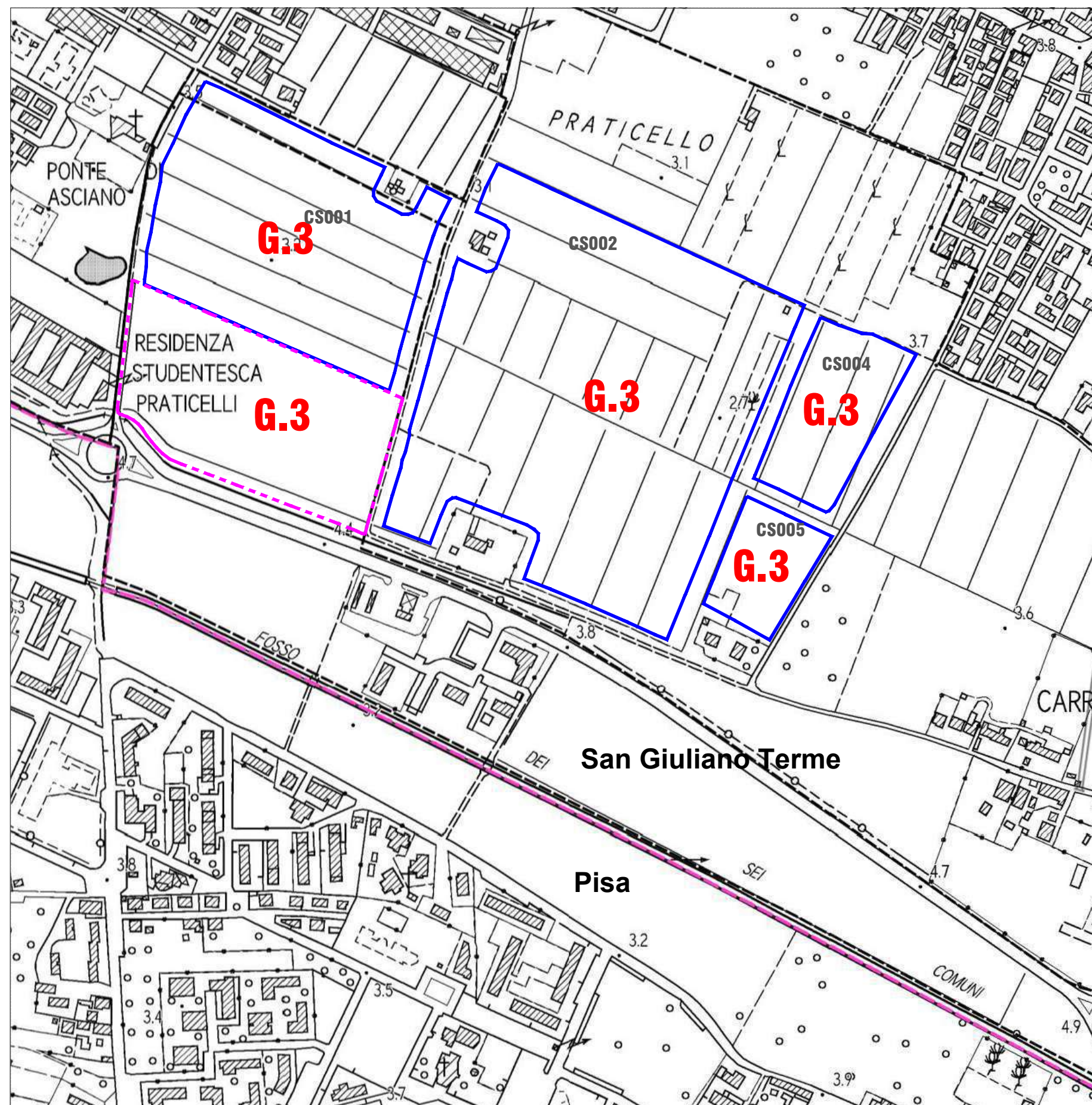


Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale



Comparto 4PP F4

Carta della Pericolosità Geologica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n.5/R



Scala 1:5.000

LEGENDA

Pericolosità geologica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n. 5/R:

G.1 - pericolosità geologica bassa

G.2 - pericolosità geologica media

G.3 - pericolosità geologica elevata (aree caratterizzate da terreni con scadenti caratteristiche geomeccaniche)

G.4 - pericolosità geologica molto elevata

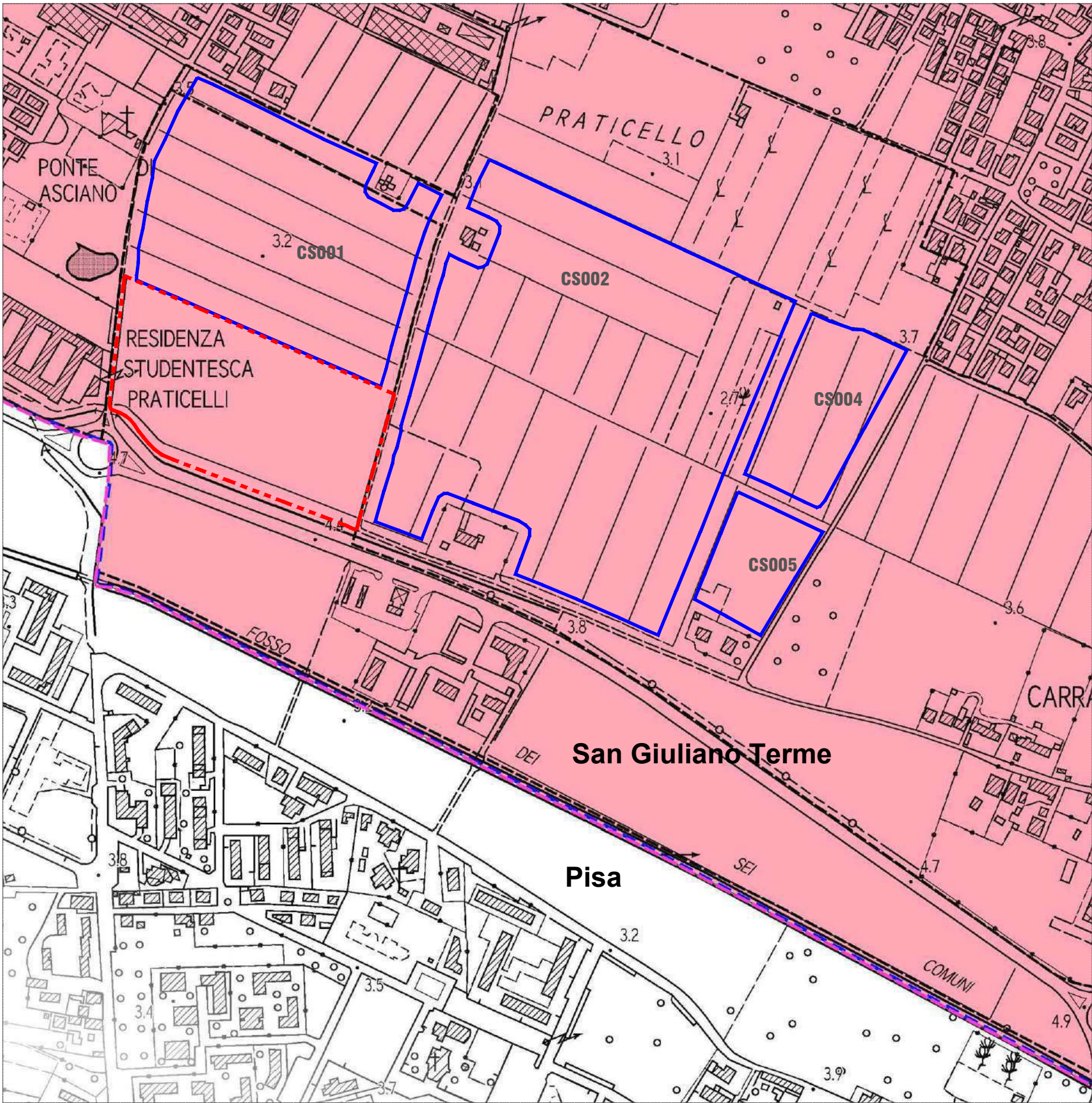


Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale



Comparto 4PP F4

Carta della Pericolosità Sismica - Piano Operativo Comunale vigente

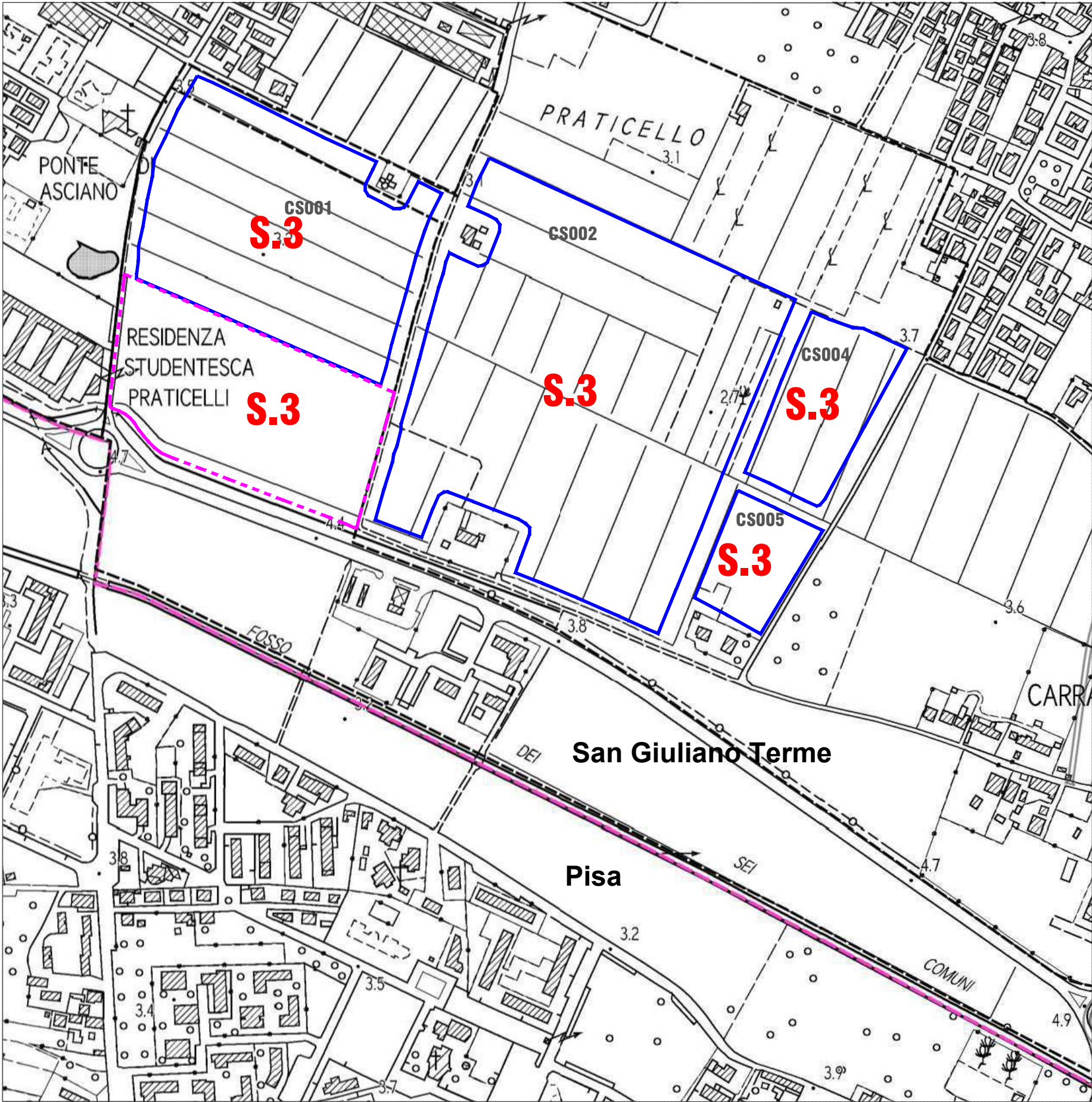


LEGENDA

- Limite comunale
- Area di indagine MOPS
- Limite UTOE
- PERICOLOSITA SISMICA D.P.G.R. 53/R/2011
 - S.1 - Pericolosità sismica locale bassa
 - S.2 - Pericolosità sismica locale media
 - S.3 - Pericolosità sismica locale elevata
 - S.4 - Pericolosità sismica locale molto elevata

- CS002 Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
- Comparto 4PP F4

Carta della Pericolosità Sismica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n.5/R



Scala 1:5.000

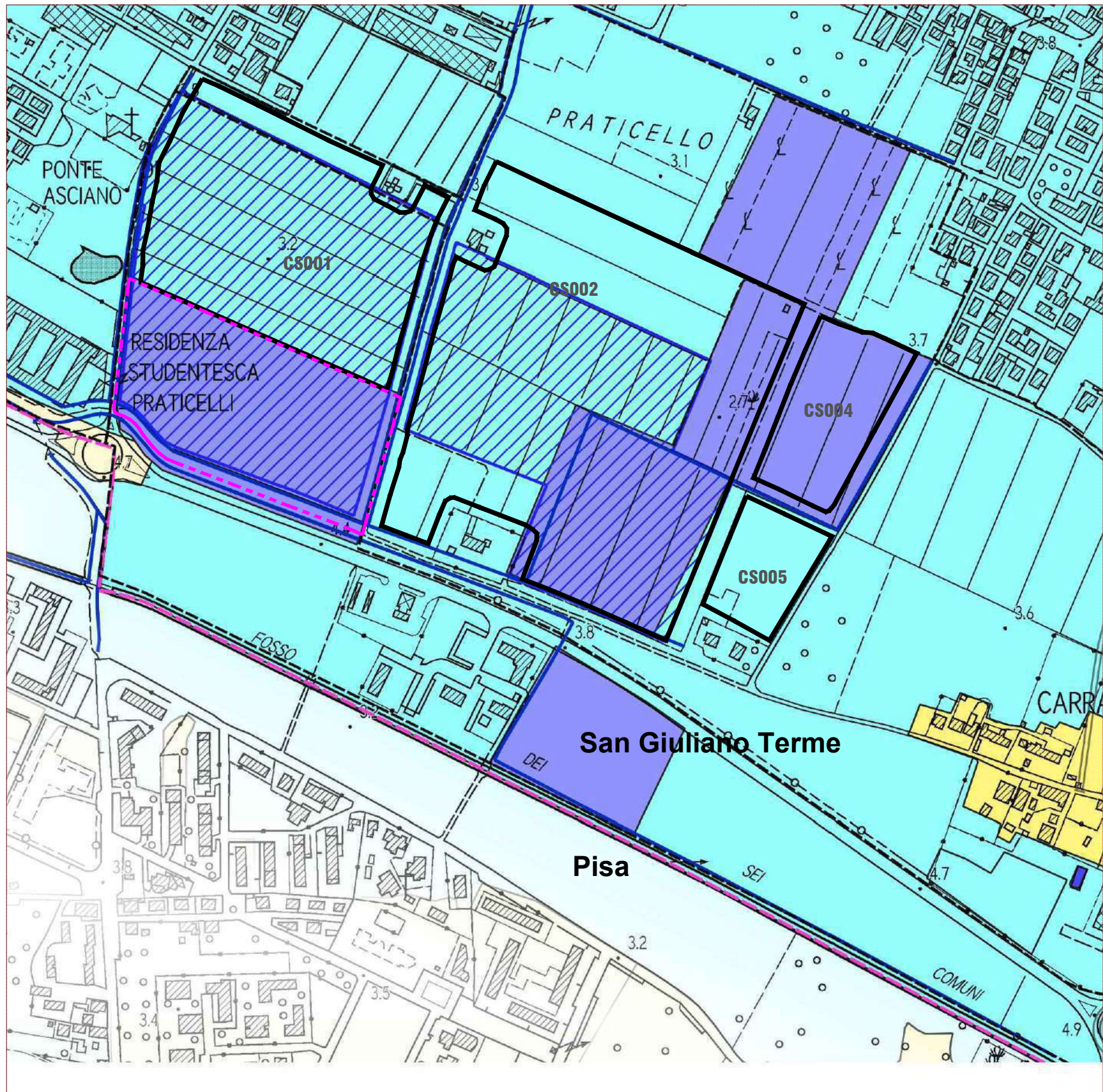
LEGENDA

Pericolosità sismica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n. 5/R:

- S.1 - pericolosità sismica bassa
- S.2 - pericolosità sismica media
- S.3** - pericolosità sismica elevata (aree con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti rilevanti)
- S.4 - pericolosità sismica molto elevata

-  Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
-  Comparto 4PP F4

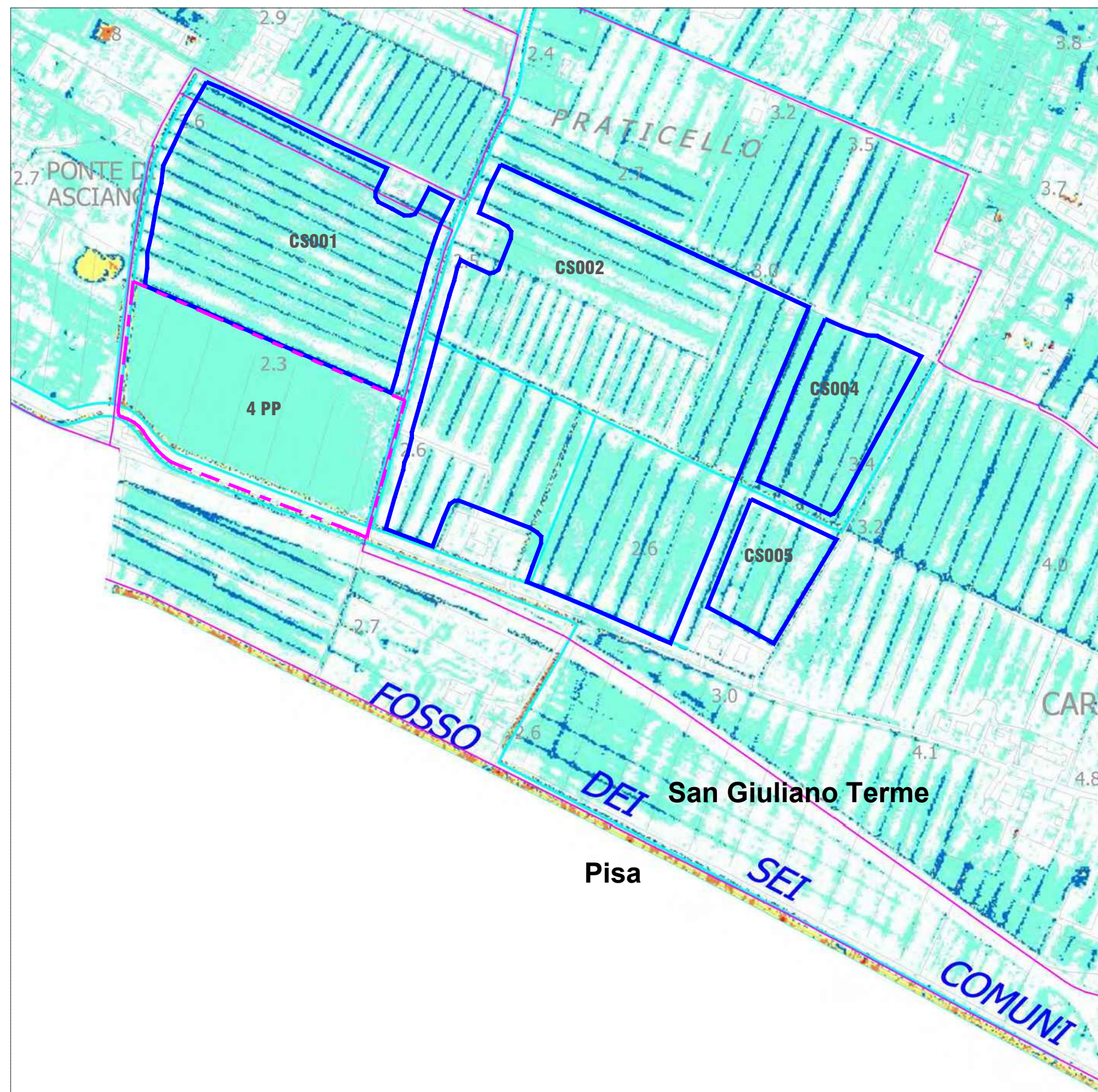
Carta della Pericolosità Idraulica - Piano Operativo Comunale vigente



LEGENDA

- Limite comunale
- Limite UTOE
- PERICOLOSITA' IDRAULICA D.P.G.R. 53/R/2011**
- I.2 - Pericolosità idraulica media**
Aree interessate da allagamenti con $200 < Tr \leq 500$ anni
 - Da studio idraulico eseguito nella presente indagine
 - Da PGRA
- I.3 - Pericolosità idraulica elevata**
Alluvioni poco frequenti ai sensi della L.R. 41/2018
Aree interessate da allagamenti con $30 < Tr \leq 200$ anni
 - Da studio idraulico eseguito nella presente indagine
 - Da PGRA
- I.4 - Pericolosità idraulica molto elevata**
Alluvioni frequenti ai sensi della L.R. 41/2018
Aree interessate da allagamenti con $0 < Tr \leq 30$ anni
 - Da studio idraulico eseguito nella presente indagine
- Zona di salvaguardia idraulica
- Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
- Perimetro comparto 4PP F4

Carta dei battenti idraulici - Piano Operativo Comunale vigente



LEGENDA

- $b < 30\text{cm}$
- $30\text{cm} < b < 60\text{cm}$
- $60\text{cm} < b < 90\text{cm}$
- $90\text{cm} < b < 1.2\text{m}$
- $1.2\text{m} < b < 1.5\text{m}$
- $b > 1.5\text{m}$
- Perimetri UTOE



Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale



Comparto 4PP F4

Carta della magnitudo idraulica - Piano Operativo Comunale vigente

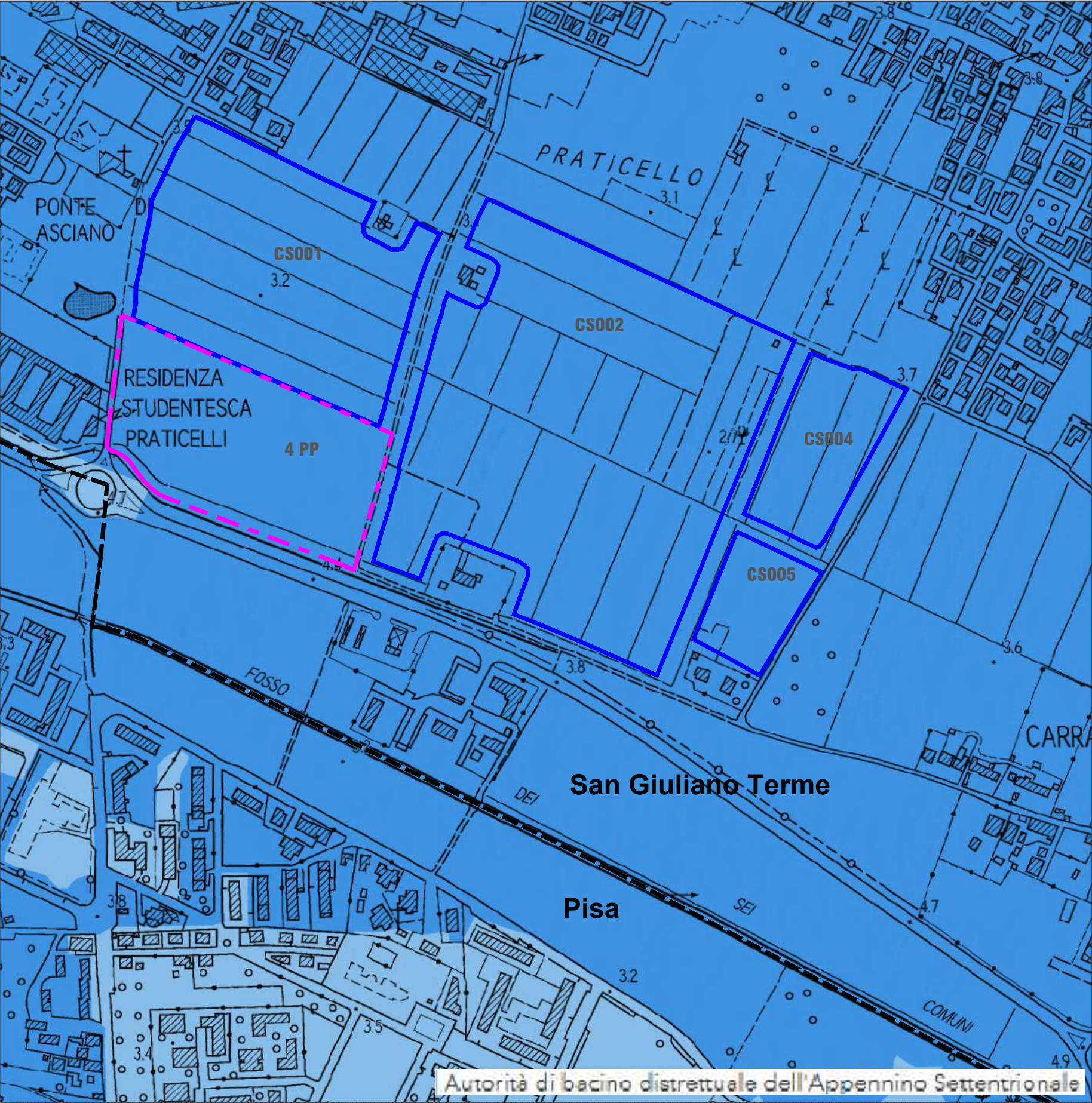


LEGENDA

magnitudo idraulica ai sensi della L.R. 24 luglio 2018 n. 41

- Moderata
- Severa
- Molto severa
- Limiti UTOE

- Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
- Comparto 4PP F4



LEGENDA

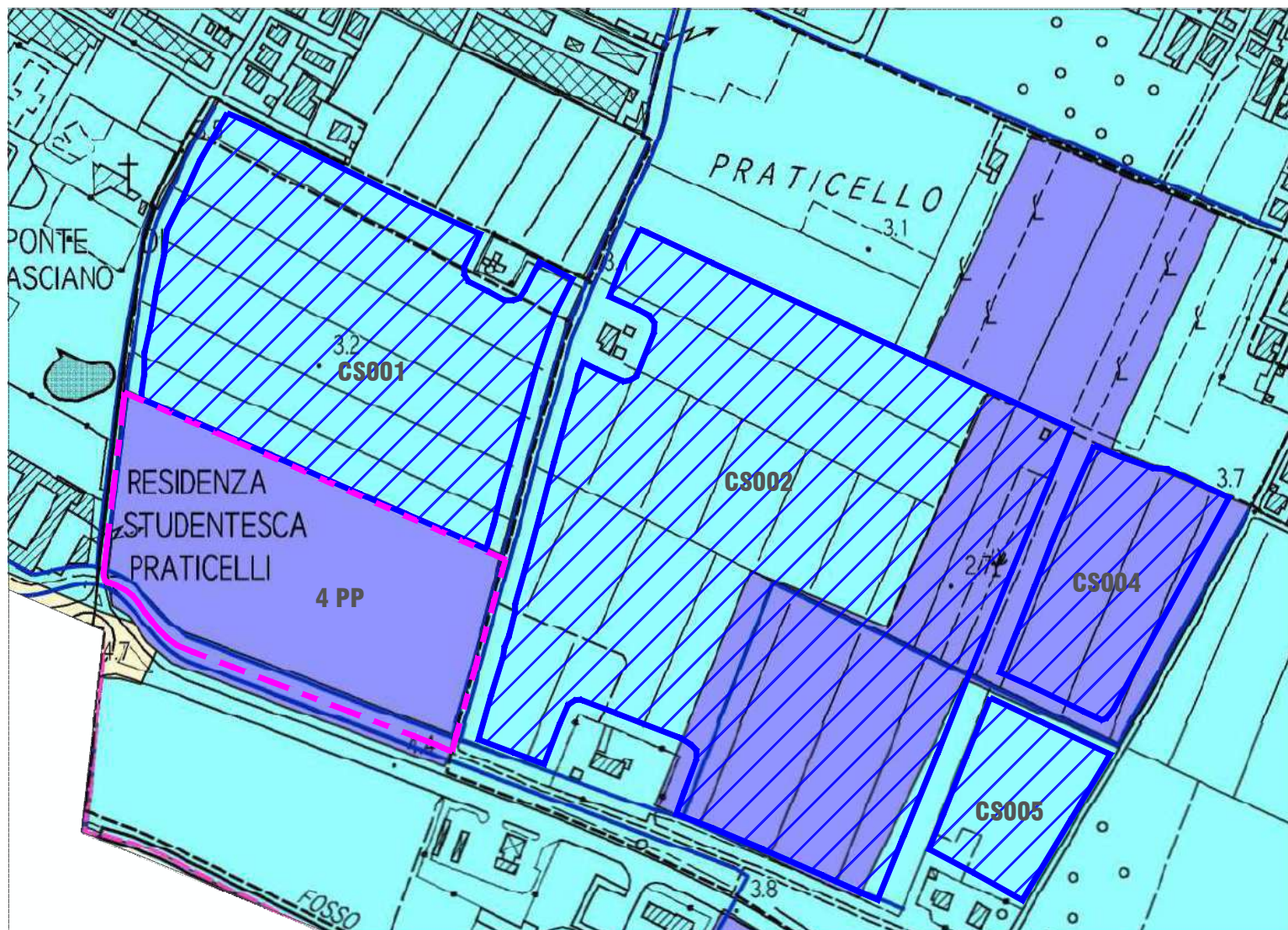
Pericolosità Dominio Fluviale

- P1
- P2
- P3

- CS002 Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
- Comparto 4PP F4

Carta della Pericolosità Idraulica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020, n. 5/R

Scala: 1:5.000



LEGENDA

Pericolosità Idraulica ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020 n. 5/R



Aree a pericolosità per alluvioni frequenti (P3), come definite dall'art. 2 comma 1 lettera d) della l.r. 41/2018



Aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti (P2), come definite dall'art. 2 comma 1 lettera e) della l.r. 41/2018

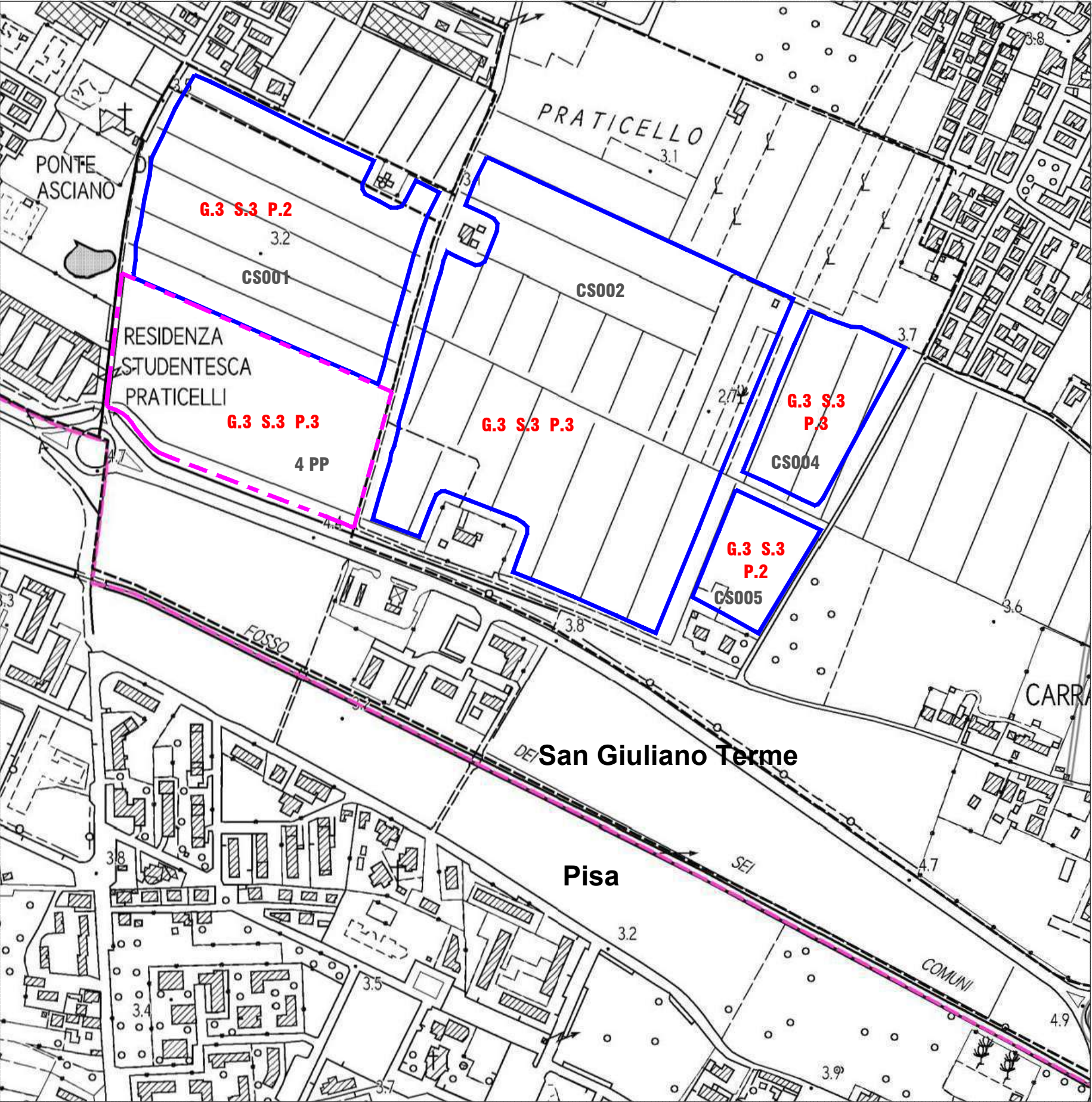


Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale - zona di salvaguardia idraulica



Comparto 4PP F4

Carta sintetica delle pericolosità



Scala 1:5.000

LEGENDA ai sensi del D.P.G.R. 30 gennaio 2020 n. 5/R

G.3 - pericolosità geologica elevata (aree caratterizzate da terreni con scadenti caratteristiche geomeccaniche)

S.3 - pericolosità sismica elevata (aree con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti rilevanti)

Aree a pericolosità per alluvioni frequenti (P3), come definite dall'art. 2 comma 1 lett d) della l.r. 41/2018

Aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti (P2), come definite dall'art. 2 comma 1 lett e) della l.r. 41/2018

-  Casse di laminazione - Variante al Piano Operativo Comunale
-  Comparto 4PP F4

DOCUMENTAZIONE PROVE GEOTECNICHE IN SITO

SONDAGGIO: S1

Committente : Scuola Superiore Sant'Anna

Cantiere : Località Praticelli - Comune di San Giuliano Terme

Data inizio perforazione : 18/03/2020

Data fine perforazione : 25/03/2020

Geologo per l'assistenza al sondaggio:

Geol. Francesca Fran

Ditta esecutrice : GALA snc

Profondità del p.c.c. (m)	Potenza (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	POCKET	S.P. □ □ □	Campioni	Prova di permeabilità
0.60	0.60		Riperto grossolano (massicciata pista)				
			Argilla marrone molto consistente	4.0 4.0 4.0	3.0	2.6 C11 3.0 4.0 C12 4.5	Prova 1 □ 2.6 2.0
4.00	3.40		Argilla grigia mediamente consistente con nodulo di torba 3,6 m.	1.0 1.5	4.5	6.3 C13 6.8	Prova 2 □
6.00	2.00			0.5		8.0 C14 8.6	
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	0.2		11.0 C15 11.6	
				0.2		16.0 C16 16.6	
				0.5		18.0 C17 18.6	
22.00	16.00		Sabbia fine grigia debolmente limosa			21.25 C18 21.75	
22.30	0.30		Argilla grigia mediam. consistente con frustoli di torba	0.5-0.2-0.2-0.5	23.0		
22.90	0.60		Limi sabbiosi grigi con concrezioni calcaree		10 11 8		
24.00	1.10		Sabbie fini marroni		24.4		
25.50	1.50		Limi a tratti sabbiosi, grigio marroni, mediam. consistenti	1.0-1.0	8 11 13		
26.00	0.50		Argille torbose grigie consistenti	1.0-1.5-1.0		27.0 C19 27.5	
27.00	1.00		Limi sabbiosi			29.2 C110 29.6	
28.90	1.90			1.0 1.0 0.5 0.5			
33.50	4.60		Argille grigie plastiche con fossili	0.5-1.0			
34.00	0.50		Argille grigie limose con torbe	1.0 1.5 1.0			
35.80	1.80		Limi argillosi grigi, torbosi, consistenti	1.0			
36.00	0.20		Sabbie fini molto compatte	1.0 1.0 0.5 1.0			
37.60	1.60		Argille limose grigio-marroni consistenti	1.0 1.0		37.0 C111 37.5	
			Argille grigie plastiche, a tratti limose	0.5 1.0 0.5 1.0			
42.00	4.40		Argille grigie mediam. compatte	1.0-1.0-1.5			
42.80	0.80		Limi sabbiosi grigi				
43.70	0.80		Argille grigie mediamente consistenti	1.0-1.0-1.5			
45.00	1.30				46.5		
			Sabbie grigie compatte		9 11 12		
50.00	5.00						

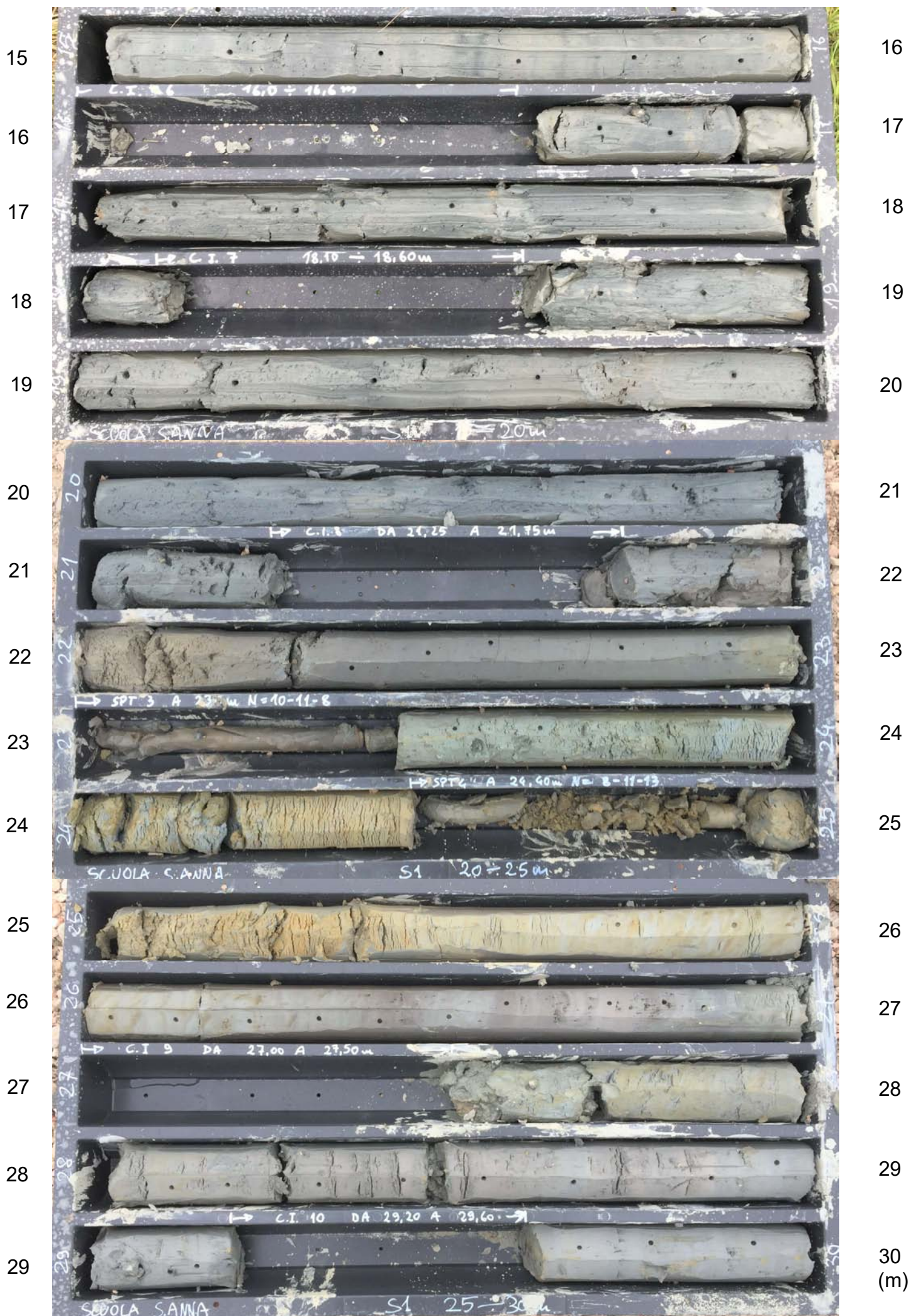
SONDAGGIO: S2			Committente : Scuola Superiore Sant'Anna	Cantiere : Località Praticelli - Comune di San Giuliano Terme			
Data inizio perforazione : 11/03/2020			Geologo per l'assistenza al sondaggio: Geol. Francesca Franchi		Ditta esecutrice : GAIA snc		
Profondità del p.d.c. (m)	Potenza (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	POCKET	S.P. T□□	Campioni	Prova di permeabilità
0.50	0.50		Riporto grossolano (massicciata pista)	3.5			
			Argilla marrone molto consistente	4.0		2.78 C11	
3.45	2.95		Argilla grigia di media-bassa consistenza con nodulo di torba a -3,6 metri	4.0	3.0	3.0 C11	Prova 1 2.78
			Argilla grigia di media-bassa consistenza con nodulo di torba a -3,6 metri	1.0		4.0 C12	
6.00	2.55		Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	1.5	4.6	4.6 C12	Prova 2 4.6
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	1.0			
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	0.5		9.0 C13	
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	0.2		9.5 C13	
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	0.5		13.5 C14	
			Argilla grigia plastica con frustoli torbosi	0.2		14.0 C14	
22.20	16.20		Argilla grigia mediam. consistente con frustoli di torba. A-22,5 m. nodulo di torba	0.5-1.0-0.5-1.0		19.5 C15	
23.00	0.80		Argilla grigia mediamente consistente, a tratti sabbiosa	1.0-1.5-1.0		20.0 C15	
23.50	0.50		Sabbie marroni debolmente addensate		24.0	25.0 C16	
25.00	1.50		Limi sabbioso-argillosi grigi con livelletti di argilla torbosa, mediamente consistenti	1.0	4	25.5 C16	
			Limi sabbioso-argillosi grigi con livelletti di argilla torbosa, mediamente consistenti	1.0	4		
28.50	3.50		Argille grigie plastiche con fossili e intercalazioni di sabbie limose	0.5		30.0 C17	
			Argille grigie plastiche con fossili e intercalazioni di sabbie limose	1.0		30.5 C17	
35.00	6.50		Argille torbose consistenti, a tratti molto consistenti	0.5		34.5 C18	
			Argille torbose consistenti, a tratti molto consistenti	0.5		35.0 C18	
37.60	2.60		Limi sabbiosi grigi poco consistenti	2.0		39.3 C19	
			Limi sabbiosi grigi poco consistenti	2.0		39.9 C19	
40.00	2.40		Limi argillosi grigi con fossili, poco consistenti	2.5			
42.50	2.50		Alternanza di limi sabbiosi e limi argillosi grigi, poco compatti	3.0			
45.50	3.00		Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0	45.5		
			Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0		22	
50.00	4.50		Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0	47.9	14	
			Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0		7	
			Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0		9	
			Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0		9	
			Sabbie medie compatte da grigio scuro a quasi nerastre nel tratto 46-47 metri	1.0		26	

STRATIGRAFIA CAROTAGGIO

Sondaggio S1: Loc. Praticelli, San Giuliano Terme. Data: 18 marzo 2020

APPENDICE .3b





30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44



31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45 (m)



Postazione del sondaggio S1.

STRATIGRAFIA CAROTAGGIO

Sondaggio S2: Loc. Praticelli, San Giuliano Terme. Data: 11 marzo 2020

APPENDICE .3c



15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29



16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30 (m)

30

31

31

32

32

33

33

34

34

35

35

36

36

37

37

38

38

39

39

40

40

41

41

42

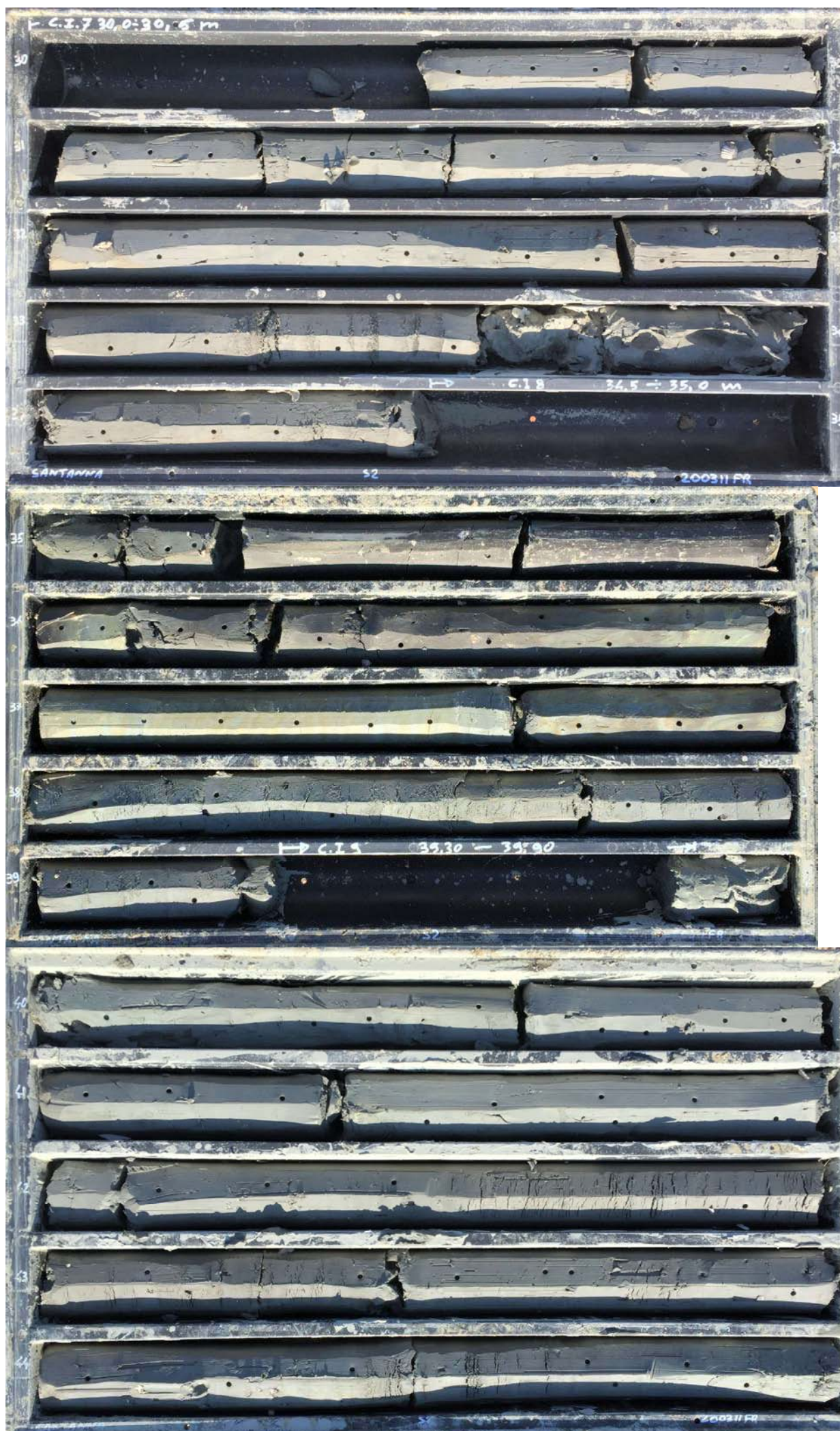
42

43

43

44

44

45
(m)



Postazione del sondaggio S2.

RELAZIONE TECNICA

Committente: Scuola
Universitaria Superiore Sant'
Anna

Location: San Giuliano Terme
– Via Berchet

Data Indagine: 01/04/2020

Codice lavoro: 200401a

PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON PUNTA ELETTRICA E PIEZOCONO CPTU

Dott. Jacopo Martini

GAIA Servizi S.n.c.

Via Lenin, 132 - 56017 - San Giuliano
Terme (PI)

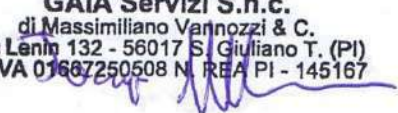
Tel./Fax: 050 9910582

e-mail: info@gaiaservizi.com

p. IVA 01966780502

Data elaborazione: 07/04/2020

GAIA Servizi S.n.c.
di Massimiliano Vannozzi & C.
Via Lenin 132 - 56017 S. Giuliano T. (PI)
P. IVA 01966780502 N. REA PI - 145167

A handwritten signature in blue ink is written over the company details.

Codifica: PR 7.5 01_08 Rev. 1 del 11/2011

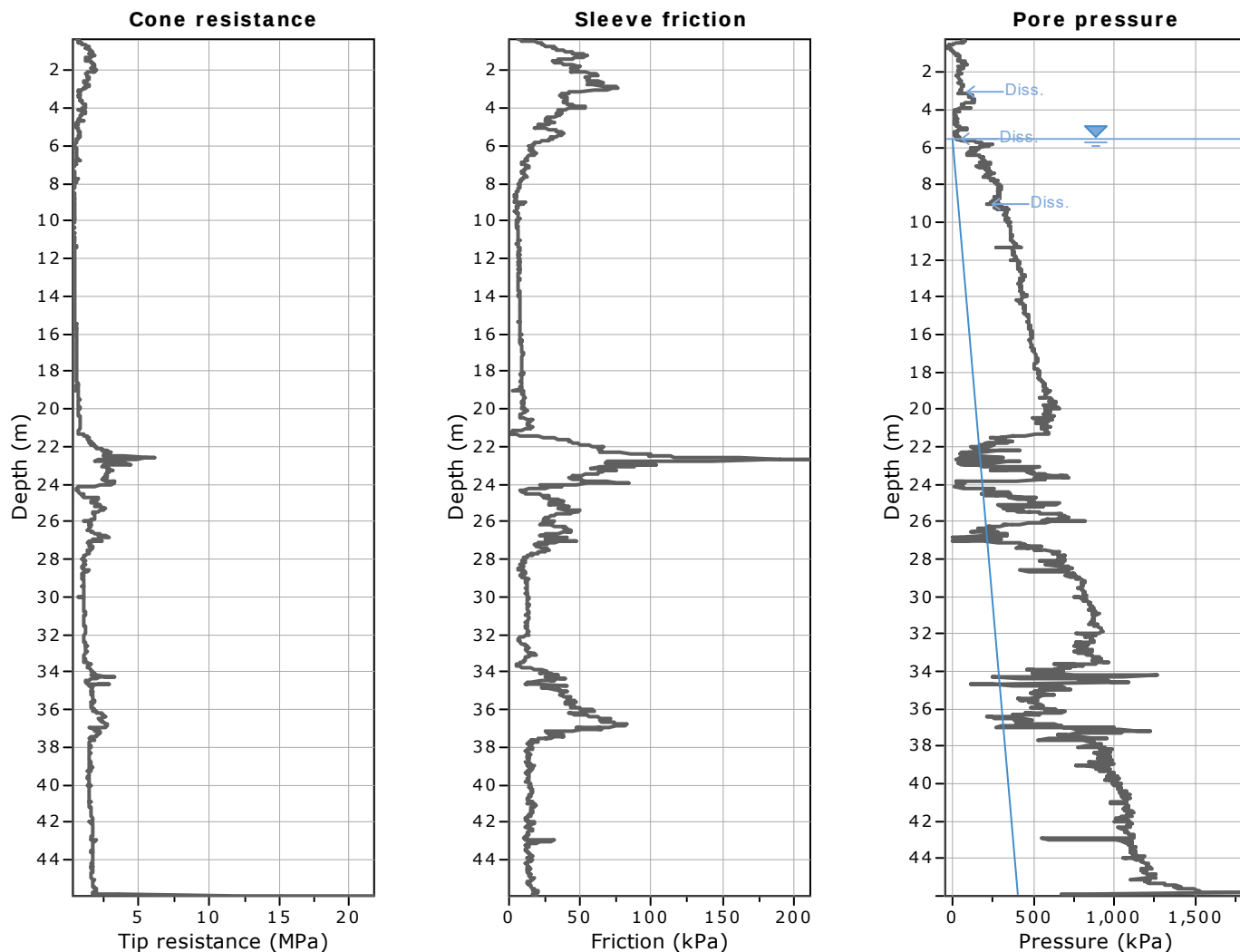
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



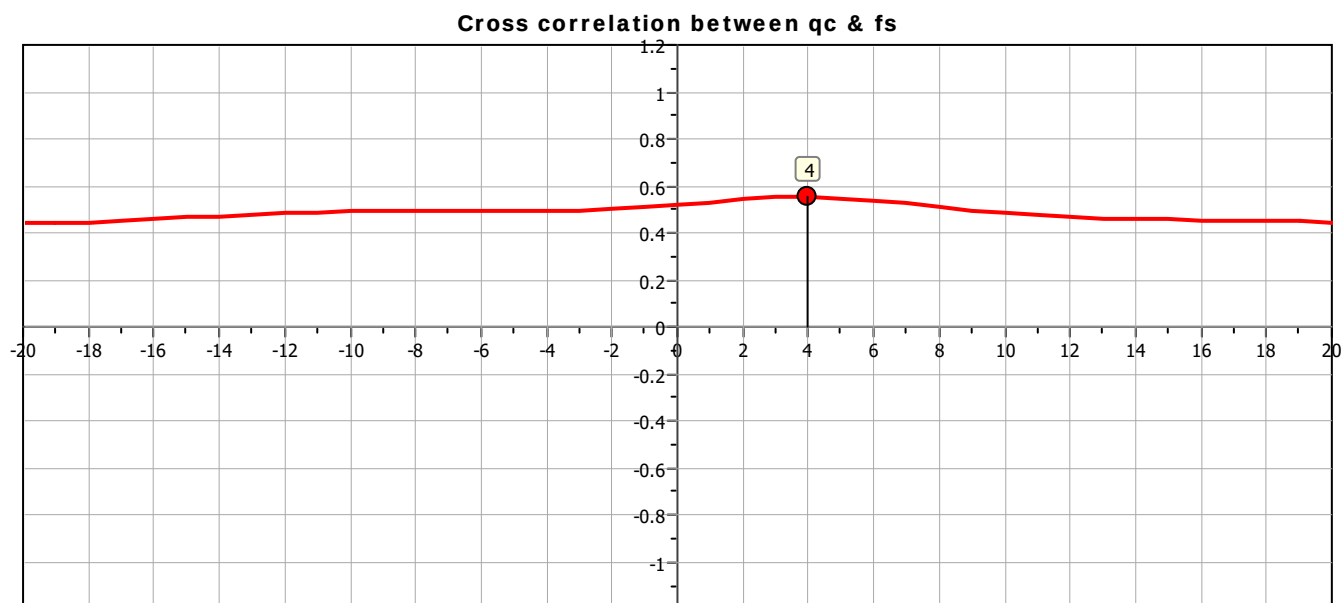
Figura 1: Prova penetrometrica CPTU P01



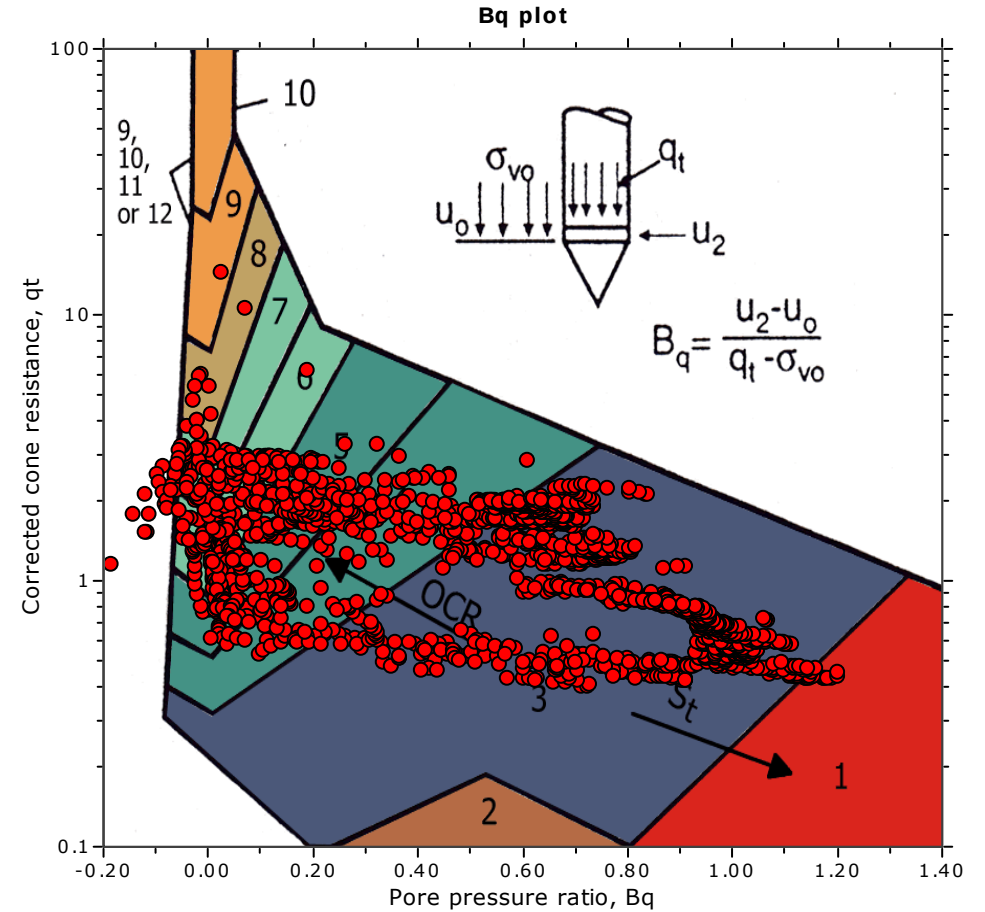
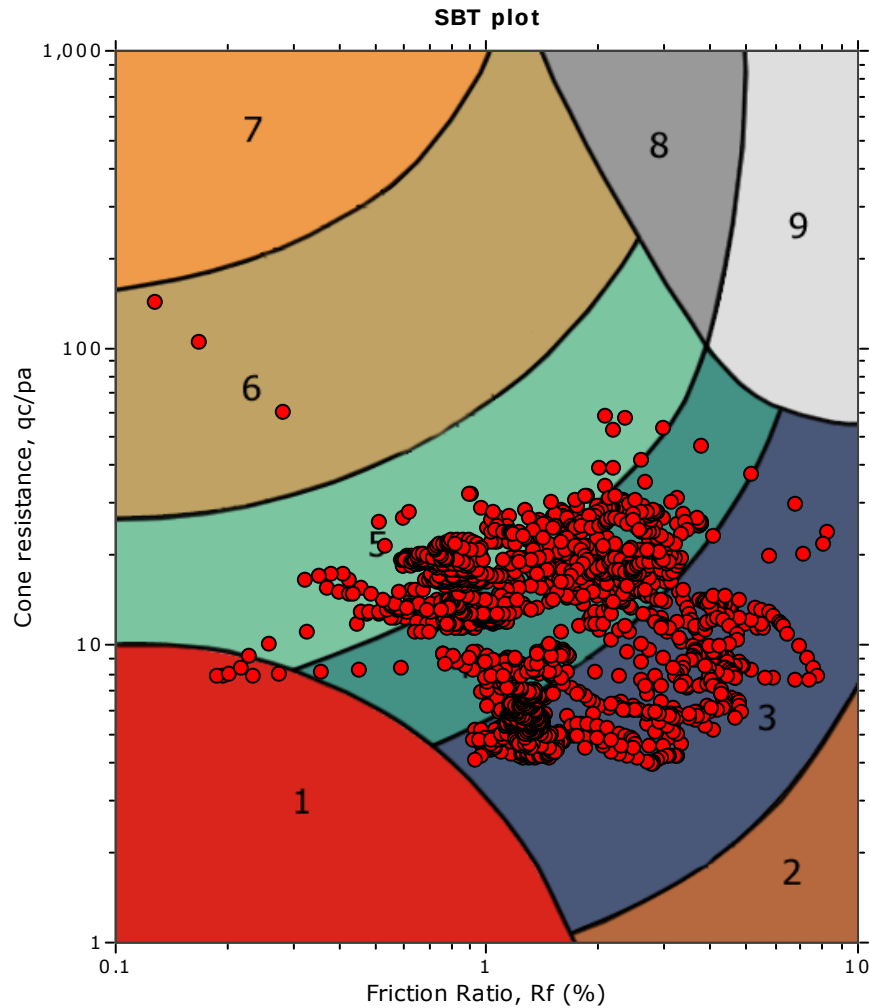
Figura 2: Prova penetrometrica CPTU P02



The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



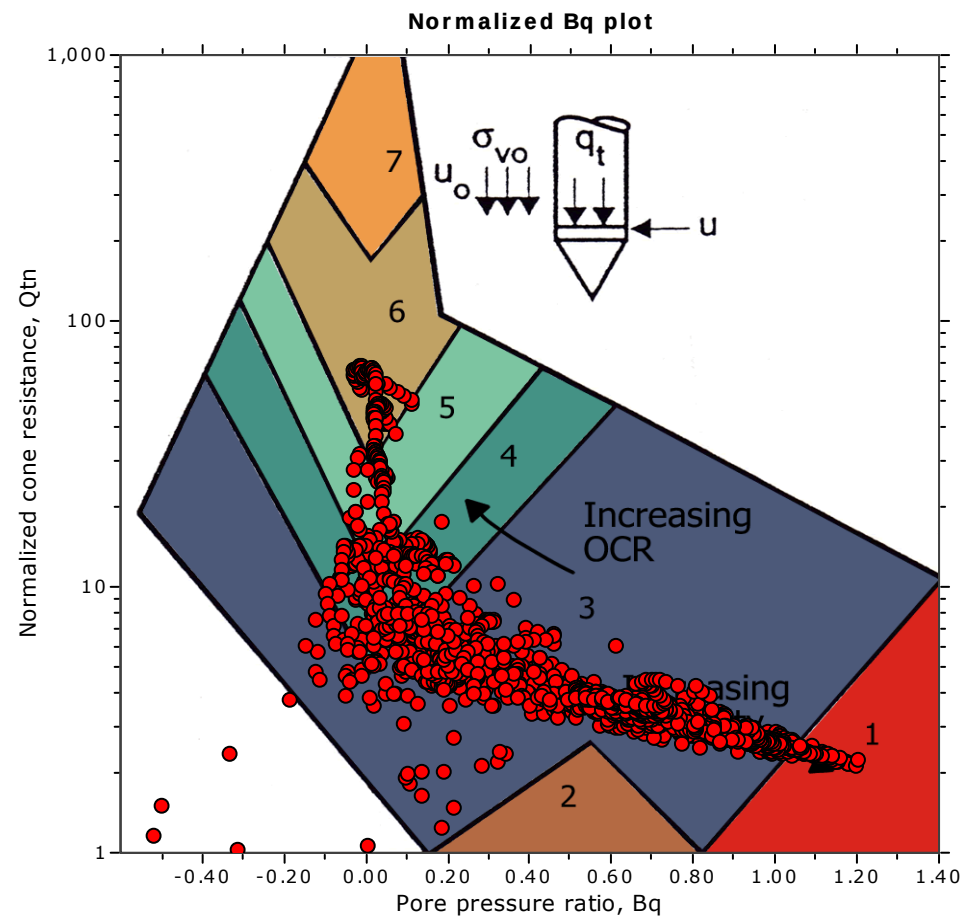
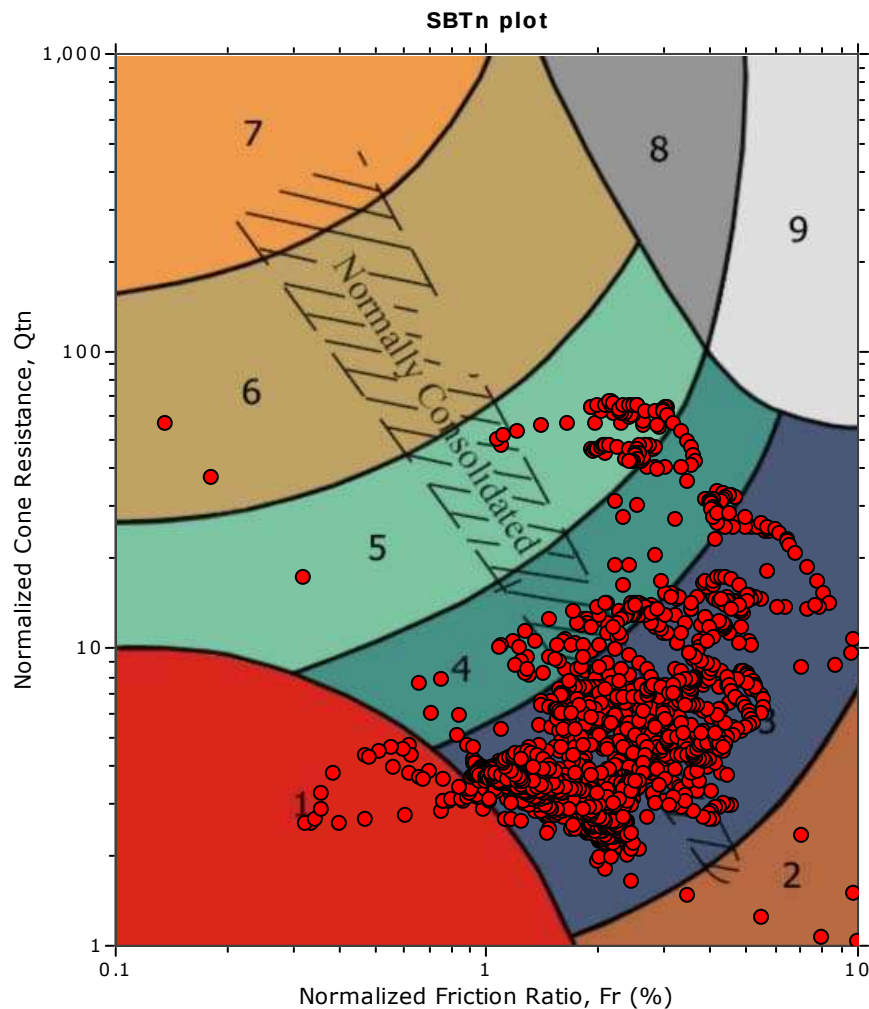
SBT - Bq plots



SBT legend

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

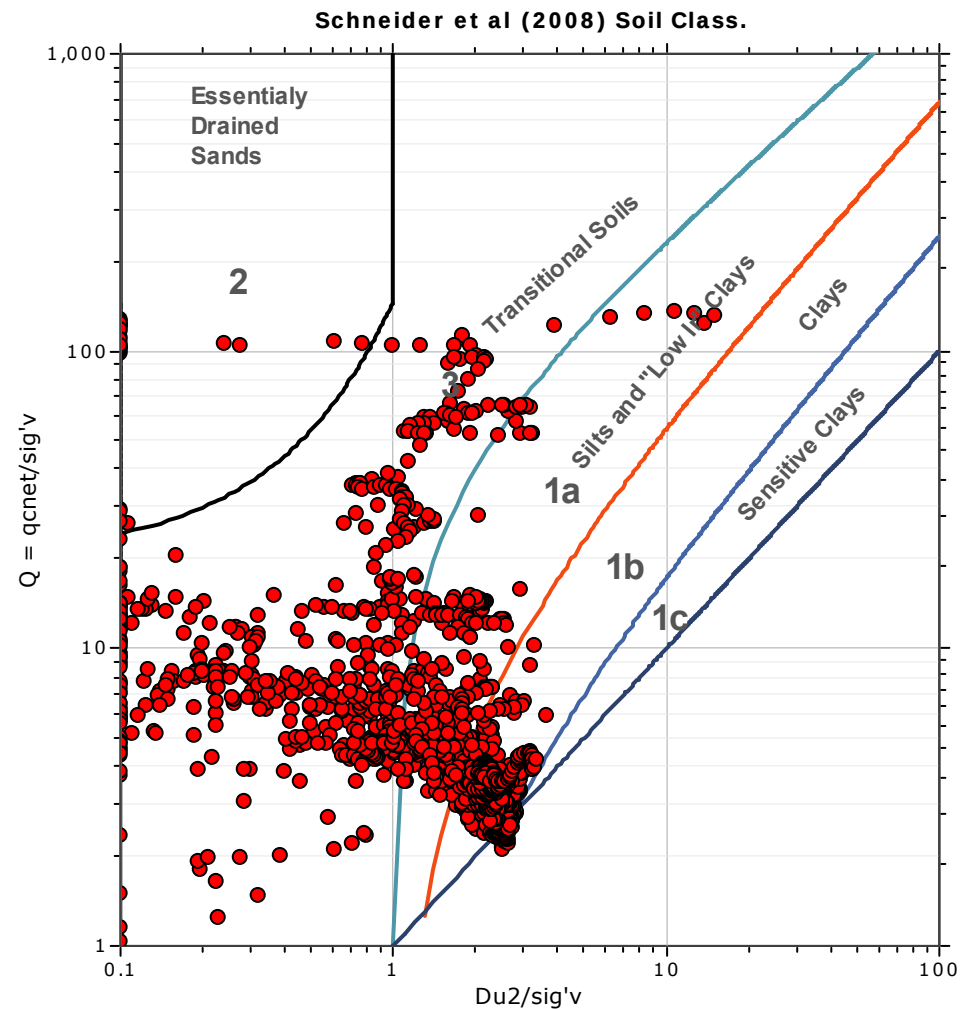
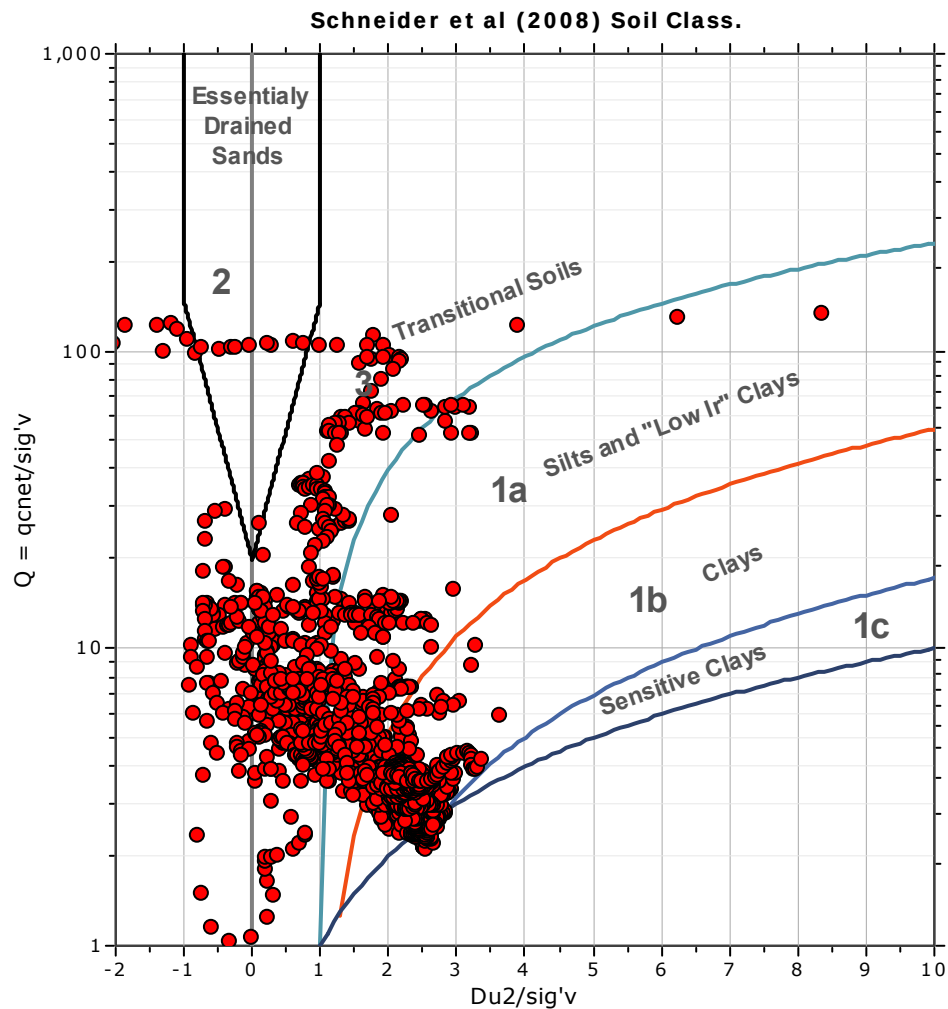
SBT - Bq plots (normalized)

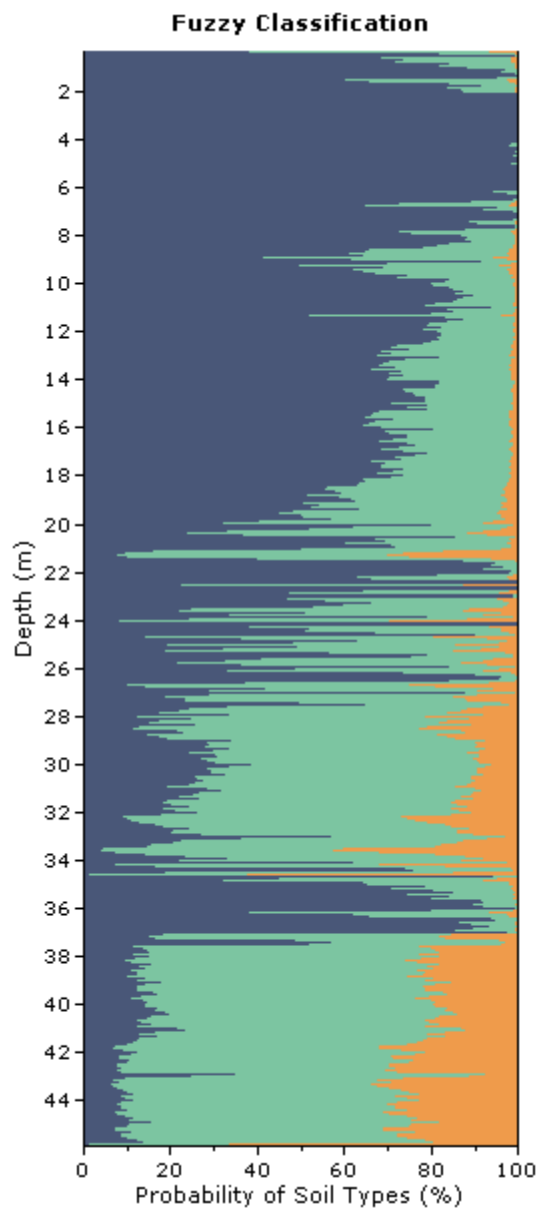
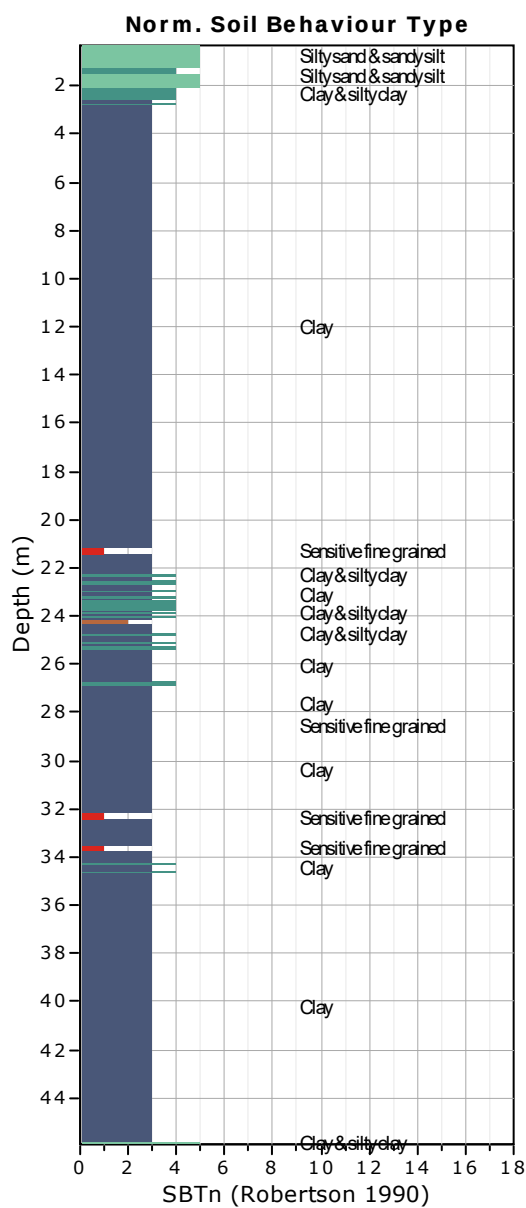


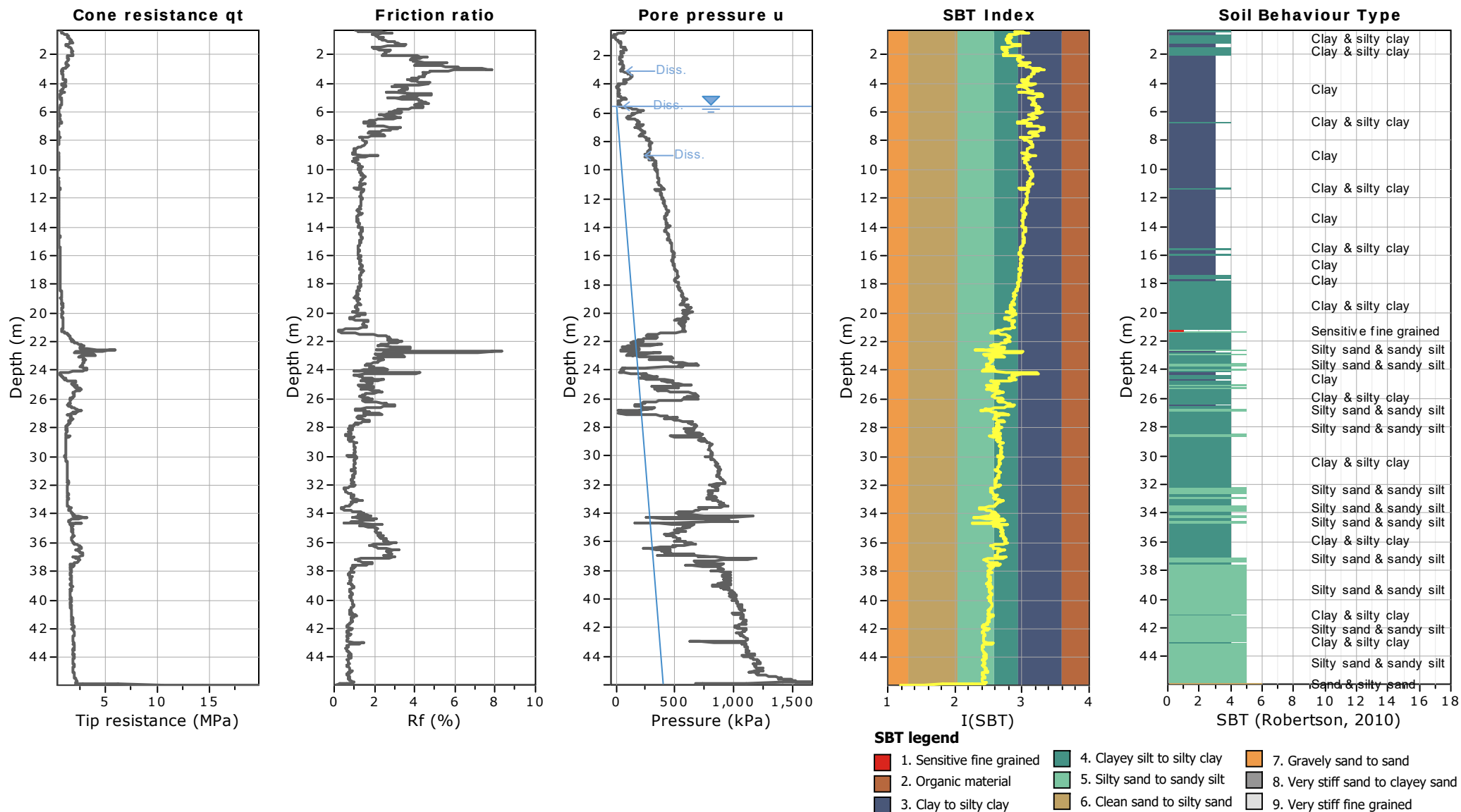
SBTn legend

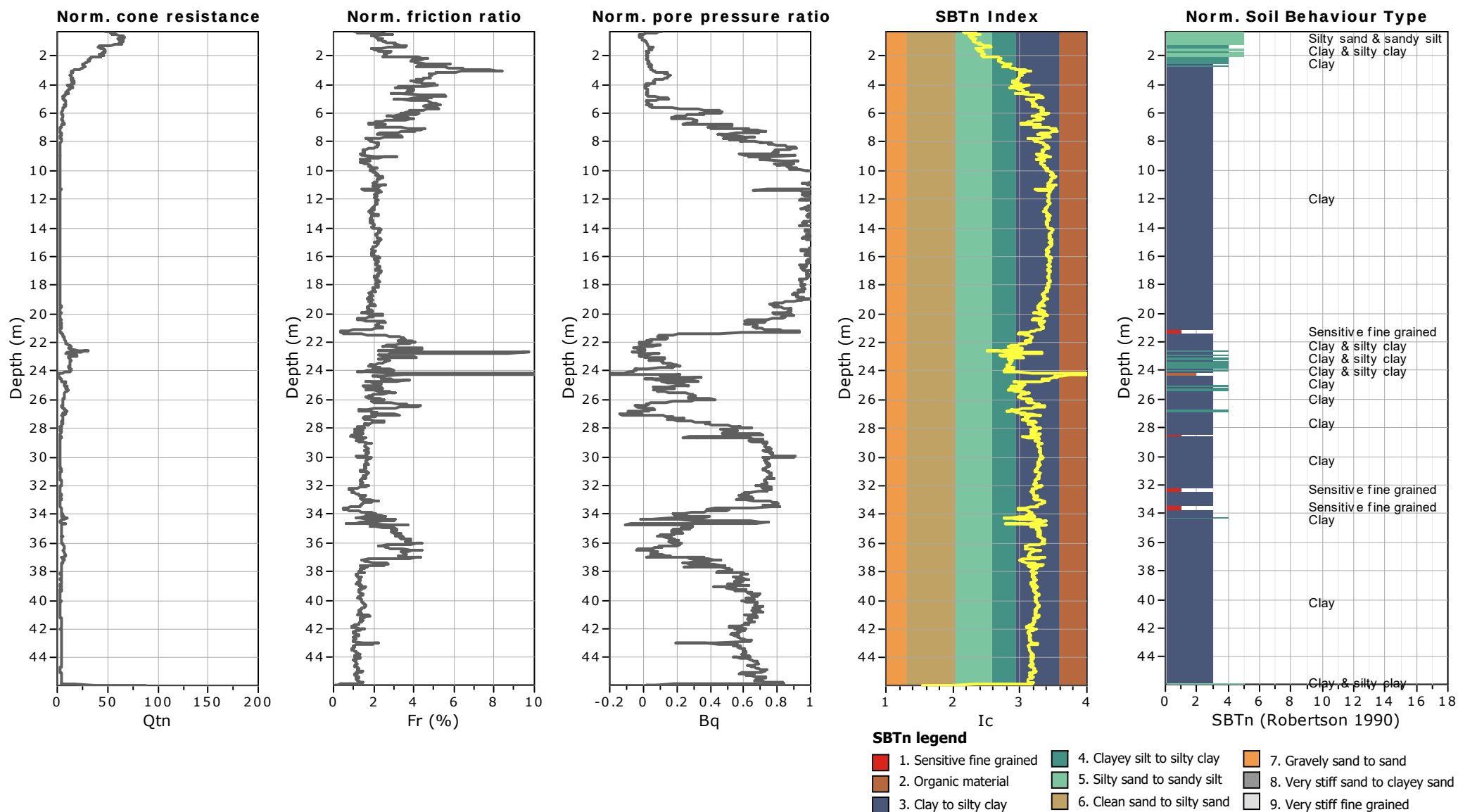
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

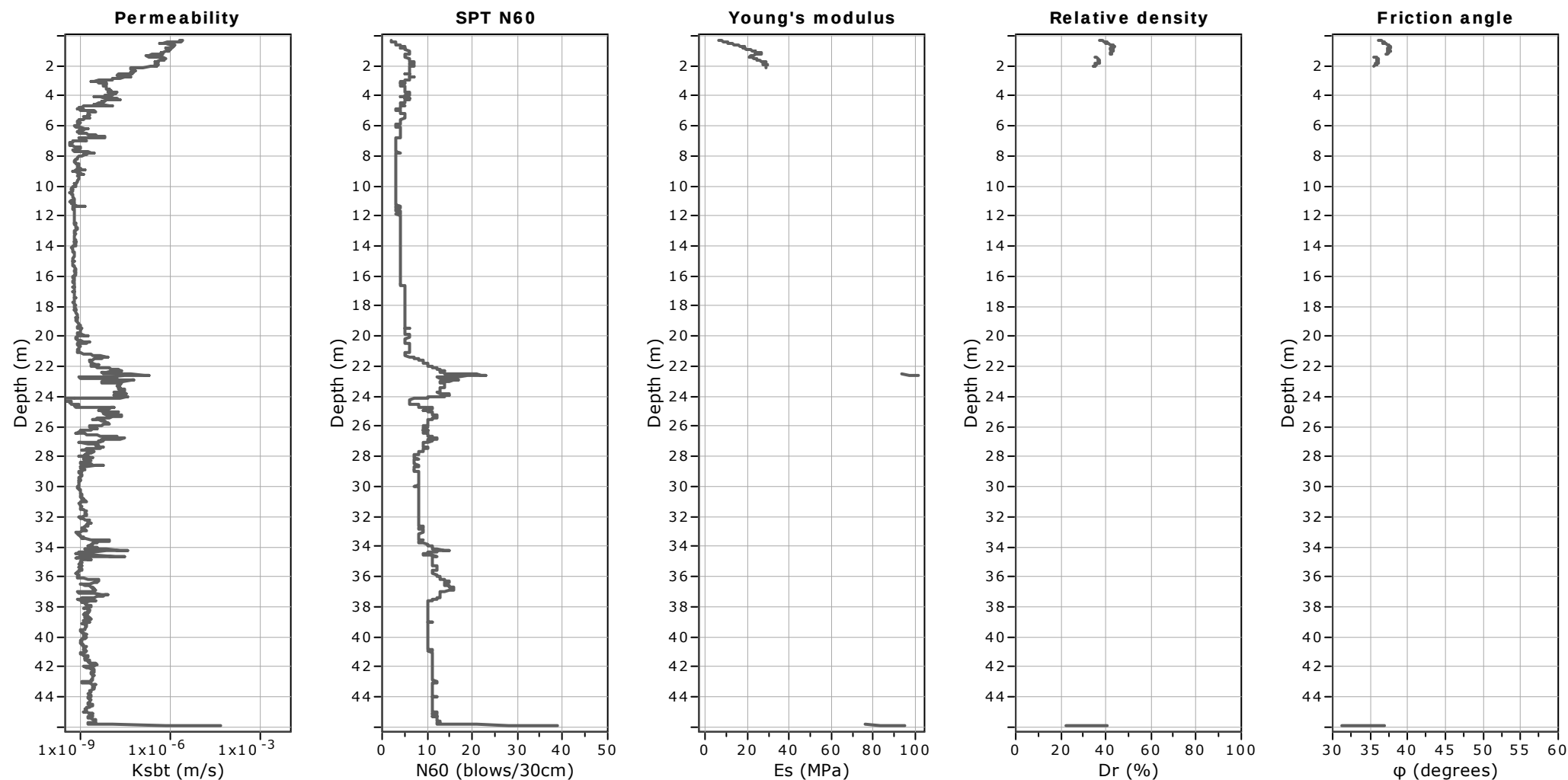
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

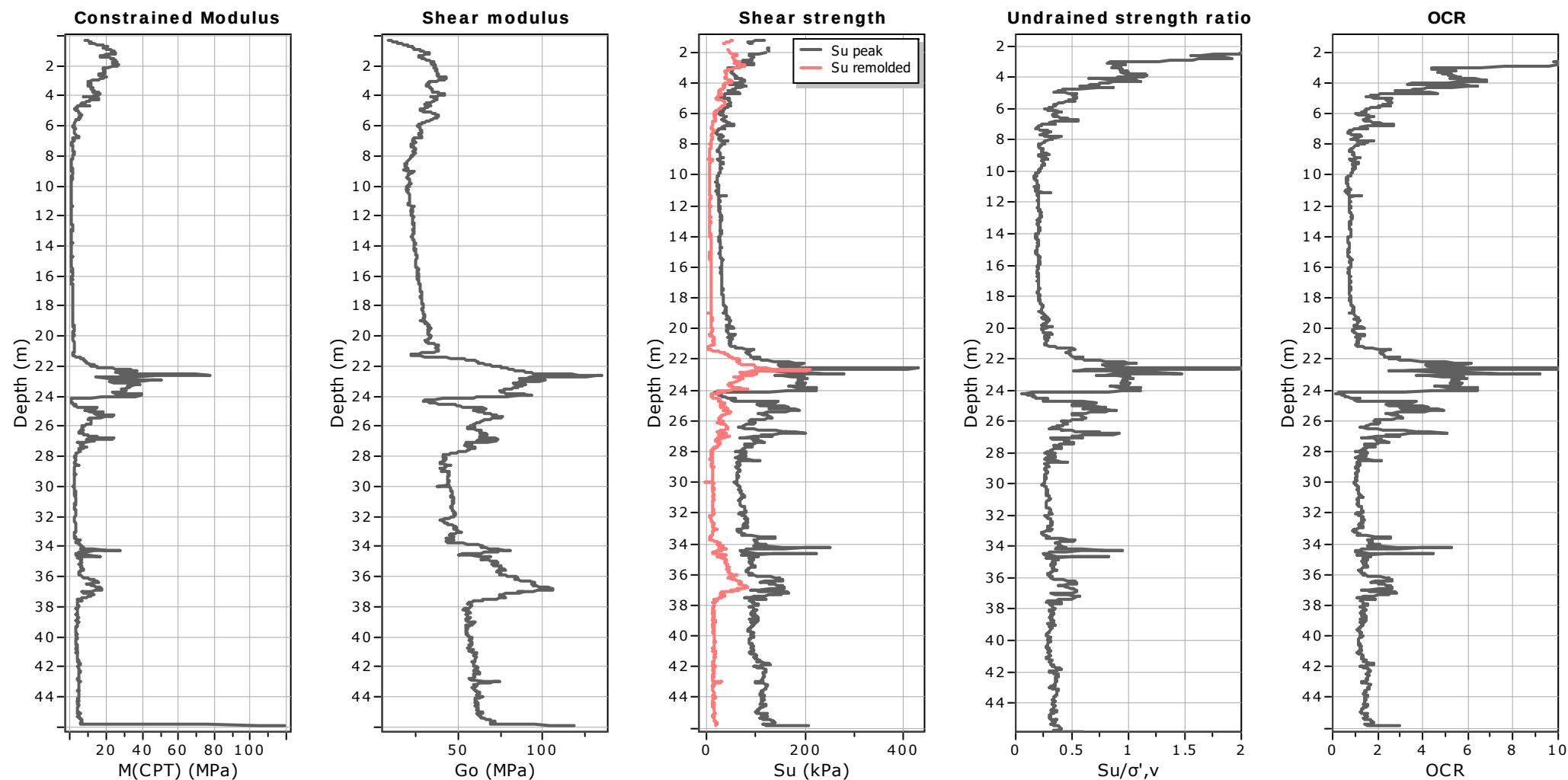
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

—●— User defined estimation data



Calculation parameters

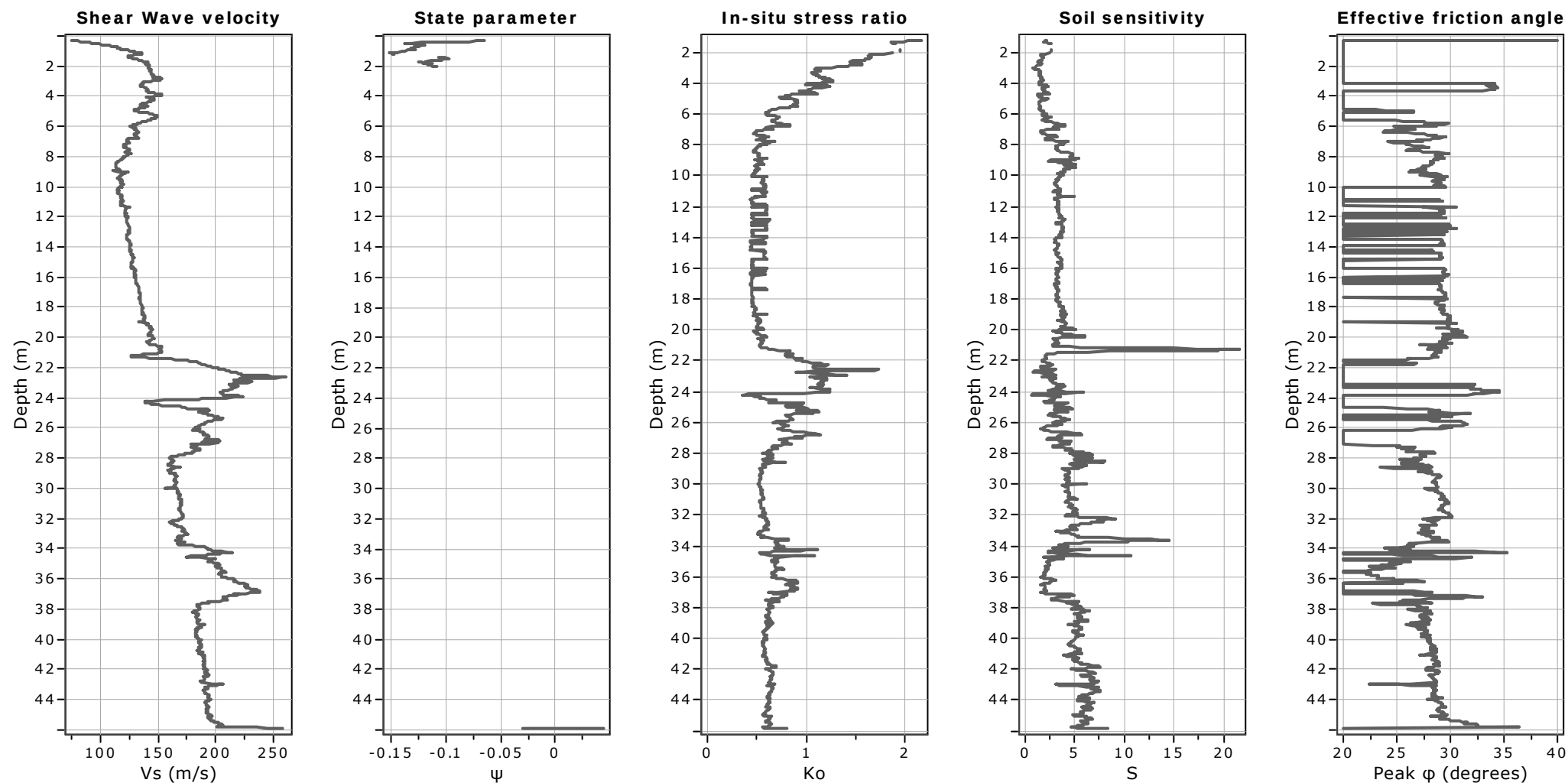
Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : Auto

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

—●— User defined estimation data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data

Dissipation Tests Results

Dissipation tests

Dissipation tests consists of stopping the piezocone penetration and observing porepressures (u) with elapsed time (t). The data are automatic recorded by the field computer and should take place until a minimum of 50% dissipation.

The porepressures are plotted as a function of square root of (t). The graphical technique suggested by Robertson and Campanella (1989), yields a value for t_{50} , which corresponds to the time for 50% consolidation.

The value of the coefficient of consolidation in the radial or horizontal direction c_h was then calculated by Houlsby and Teh's (1988) theory using the following equation:

$$c_h = \frac{T \times r^2 \times I_r^{0.5}}{t_{50}}$$

where:

T : time factor given by Houlsby and Teh's (1988) theory corresponding to the porepressure position

r : piezocone radius

I_r : stiffness index, equal to shear modulus G divided by the undrained strength of clay (S_u).

t_{50} : time corresponding to 50% consolidation

Permeability estimates based on dissipation test

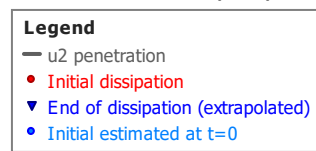
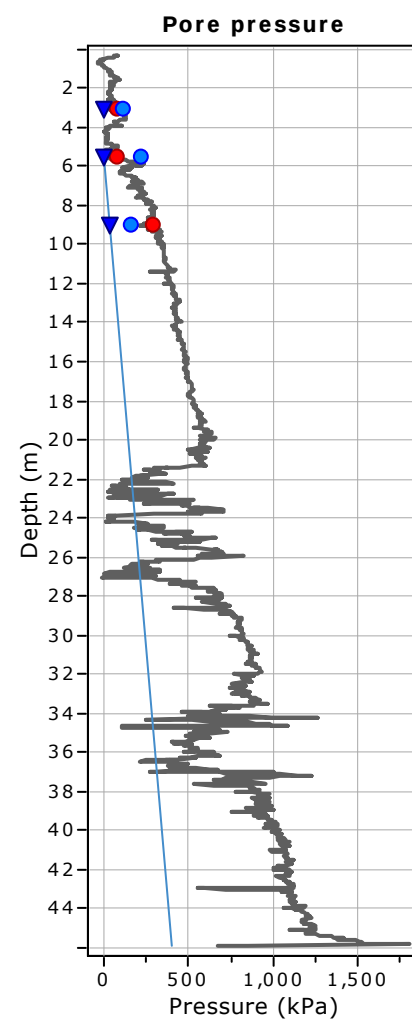
The dissipation of pore pressures during a CPTu dissipation test is controlled by the coefficient of consolidation in the horizontal direction (c_h) which is influenced by a combination of the soil permeability (k_h) and compressibility (M), as defined by the following:

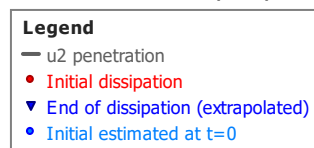
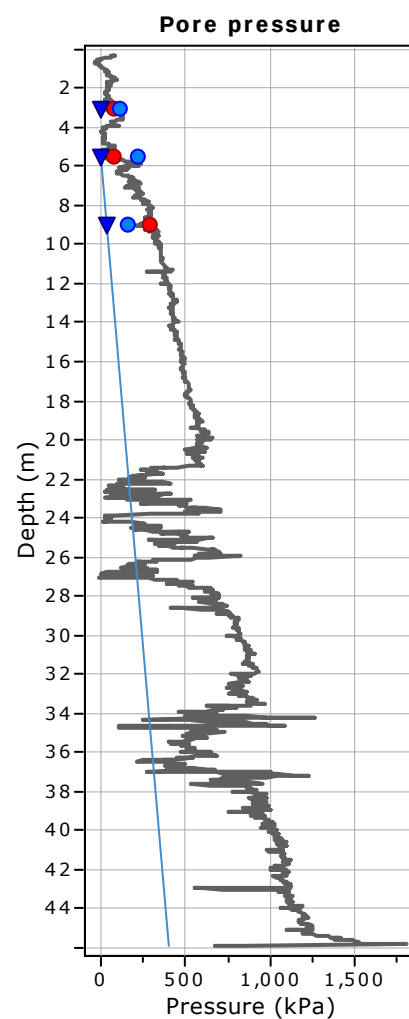
$$k_h = c_h \times \gamma_w / M$$

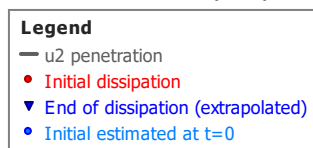
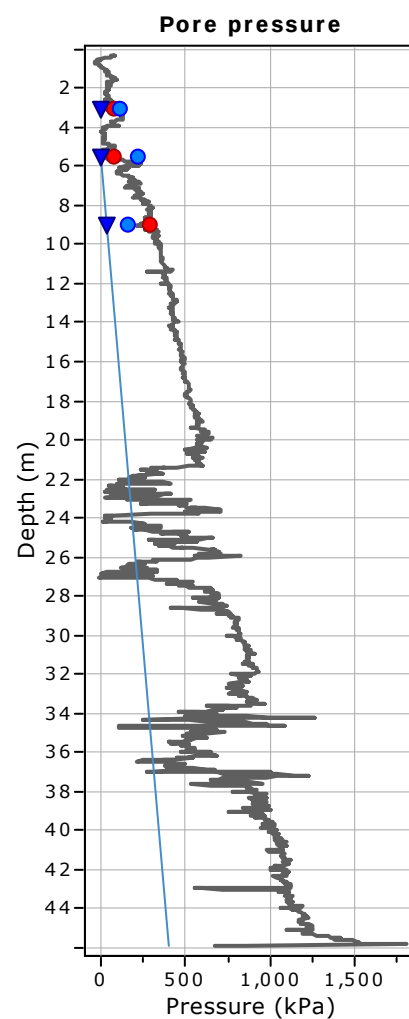
where: M is the 1-D constrained modulus and γ_w is the unit weight of water, in compatible units.

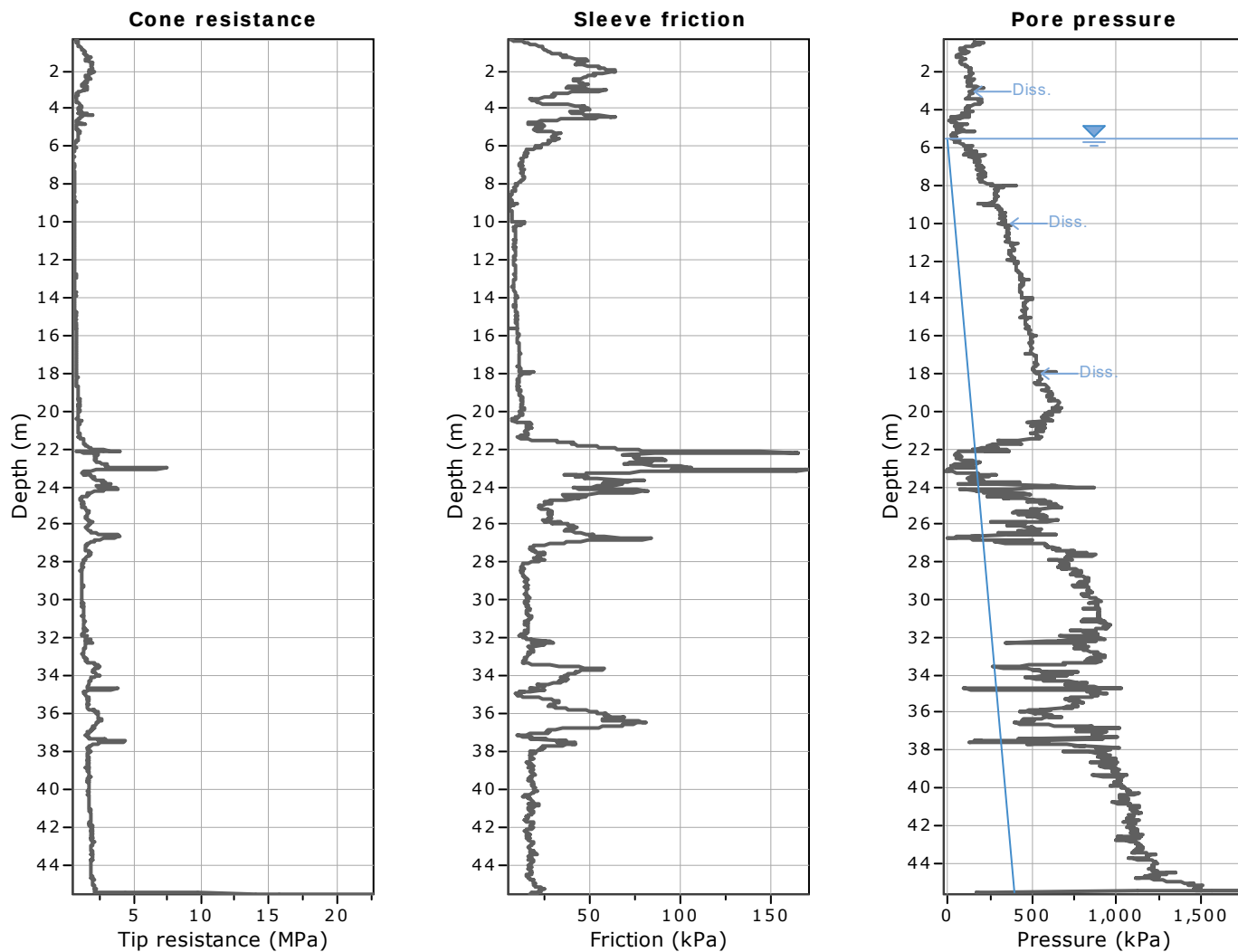
Tabular results

CPTU Borehole	Depth (m)	$(t_{50})^{0.50}$	t_{50} (s)	t_{50} (years)	G/S_u	c_h (m^2/s)	c_h ($m^2/year$)	M (MPa)	k_h (m/s)
P01	3.07	100.2	10031	3.18E-004	681.98	2.14E-007	7	9.88	2.12E-010
P01	5.54	85.5	7312	2.32E-004	745.70	3.06E-007	10	5.68	5.29E-010
P01	9.03	71.3	5080	1.61E-004	1008.82	5.13E-007	16	0.83	6.07E-009

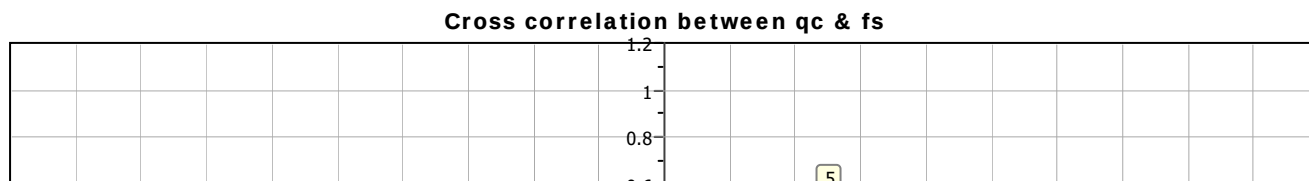




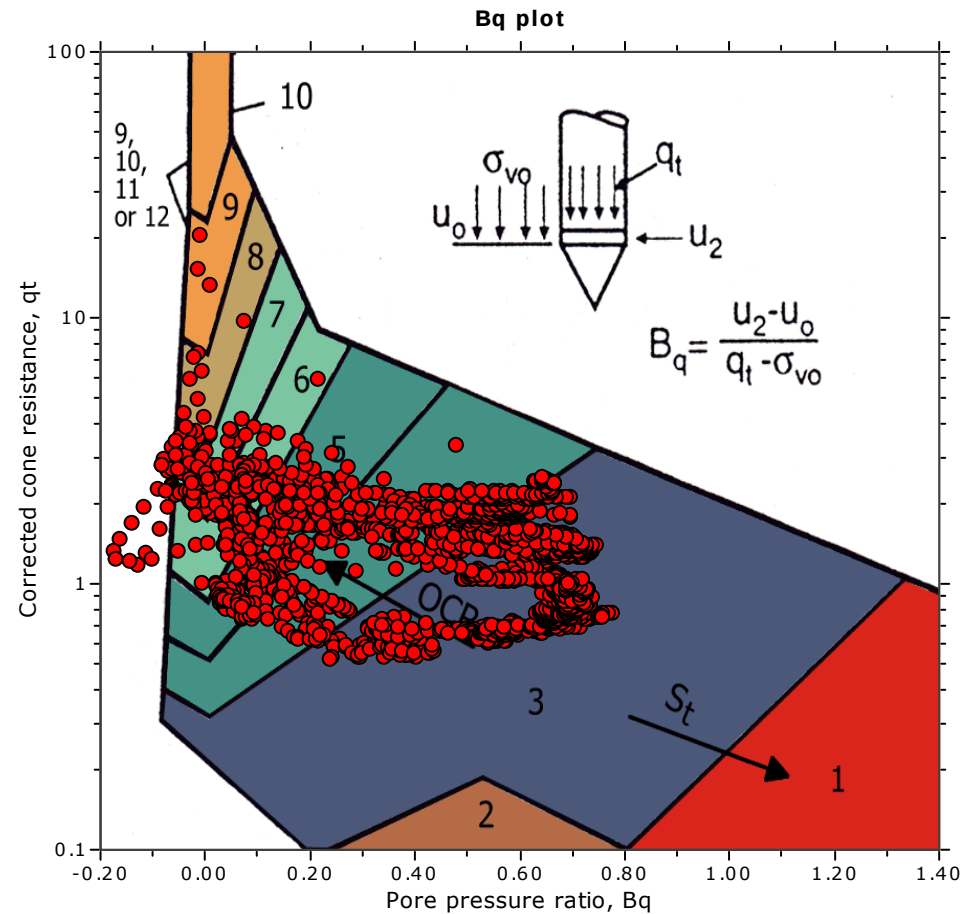
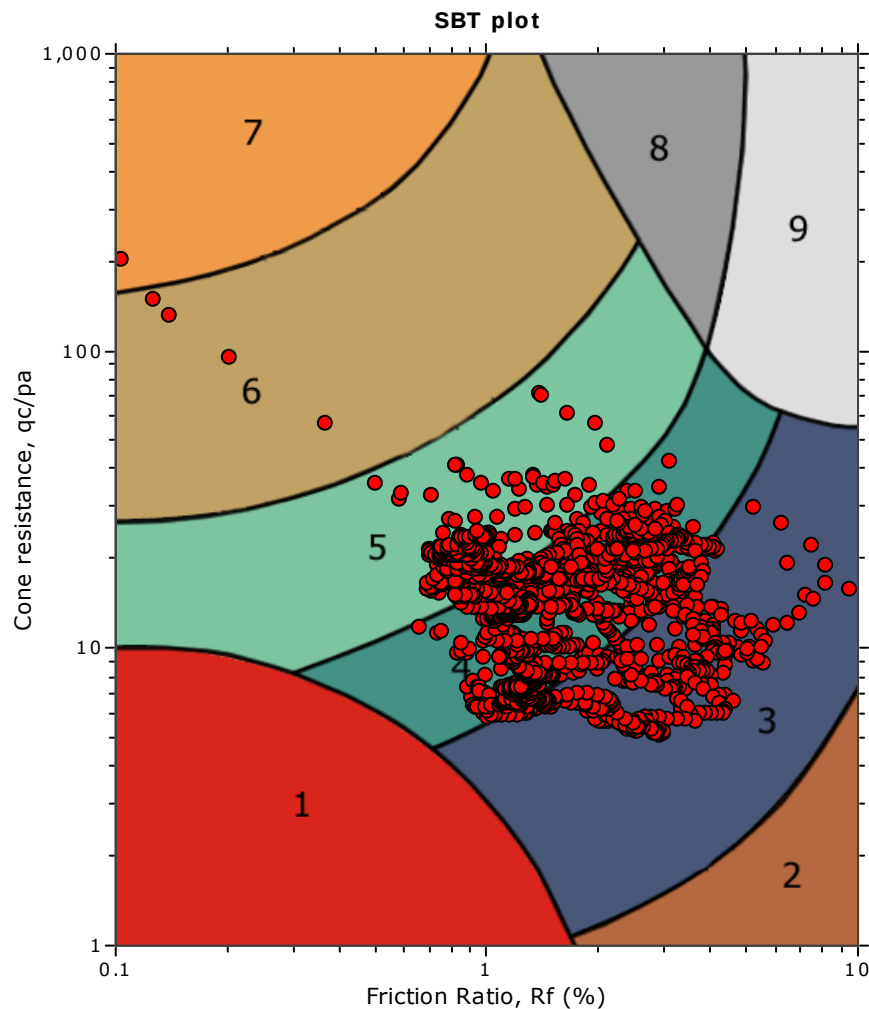




The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



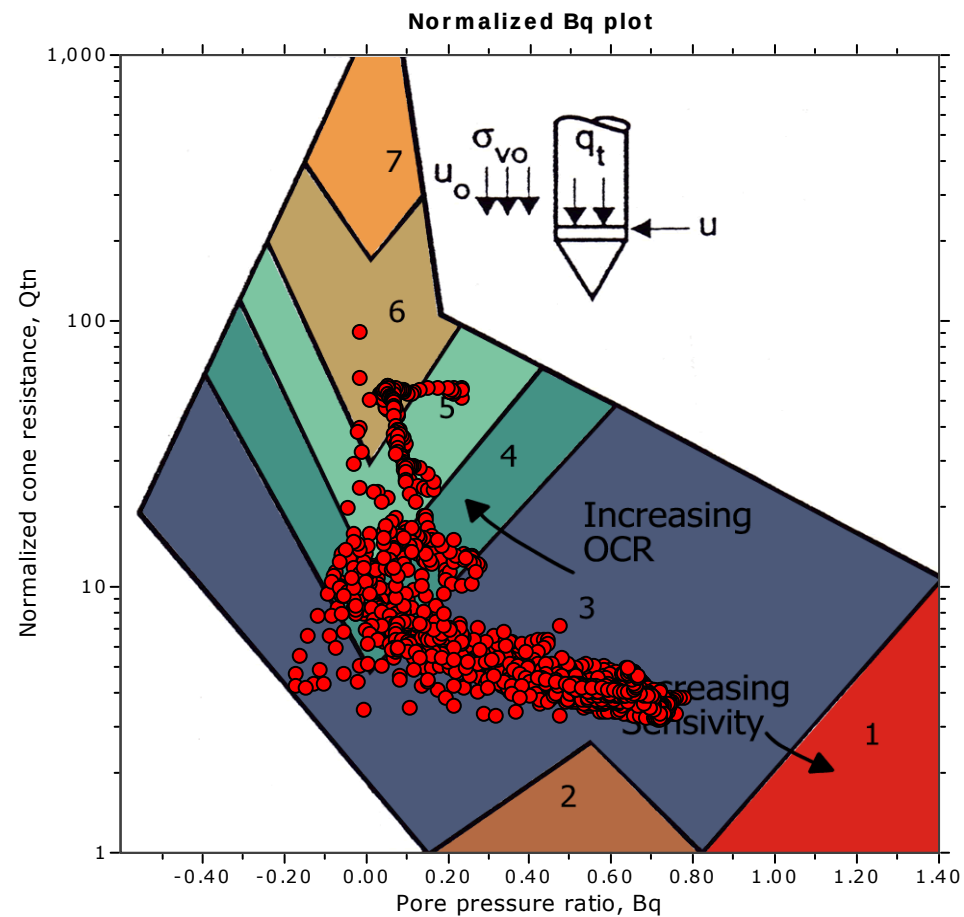
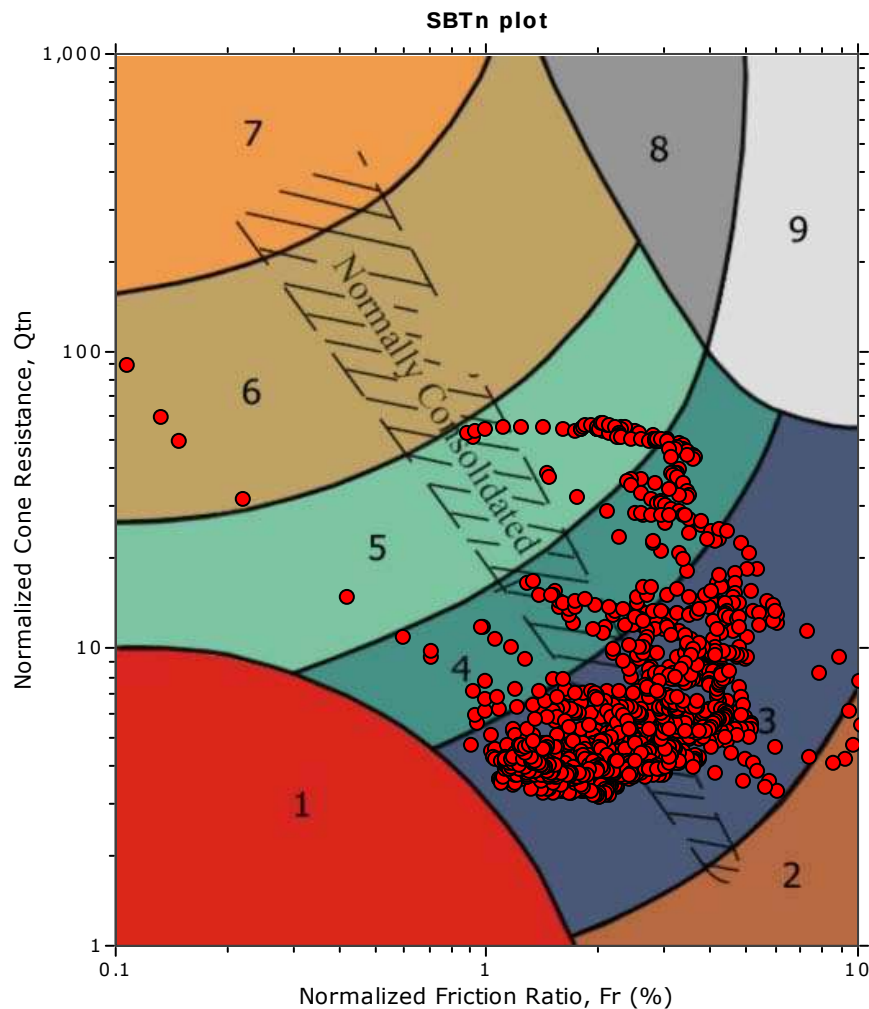
SBT - Bq plots



SBT legend

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

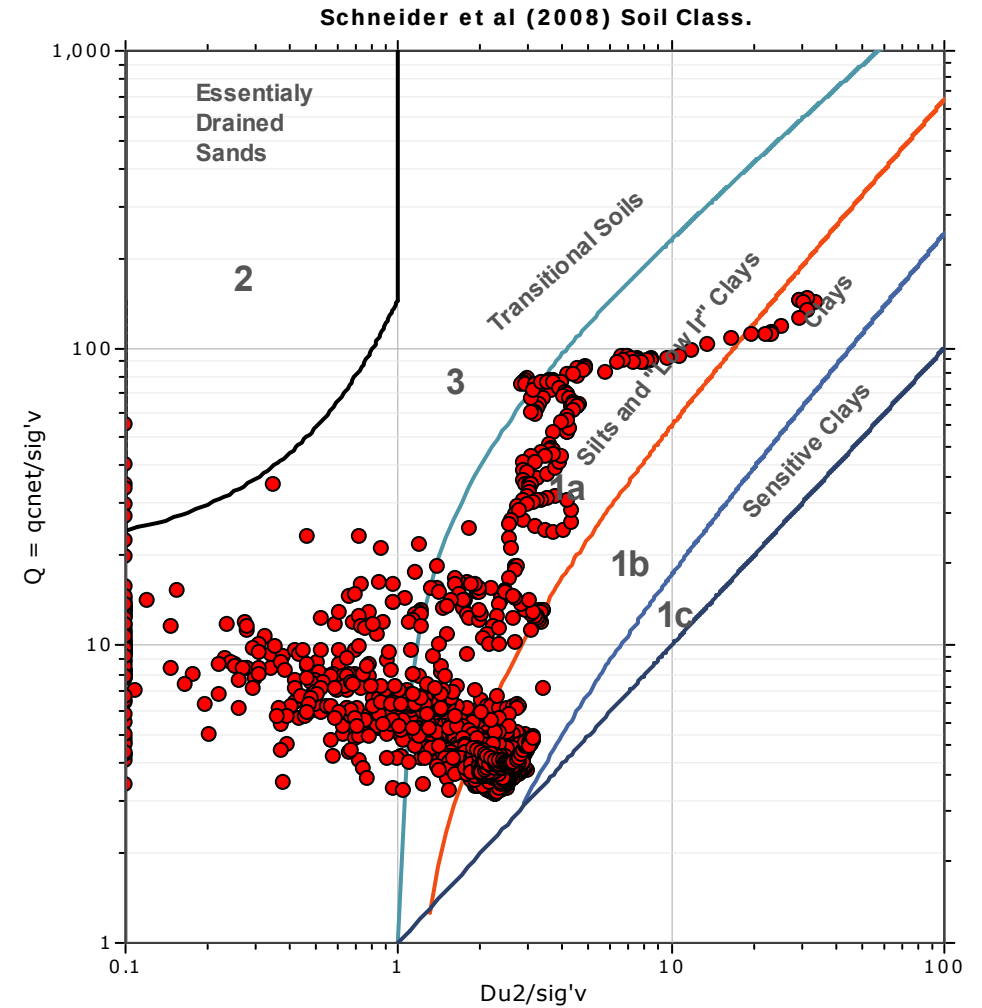
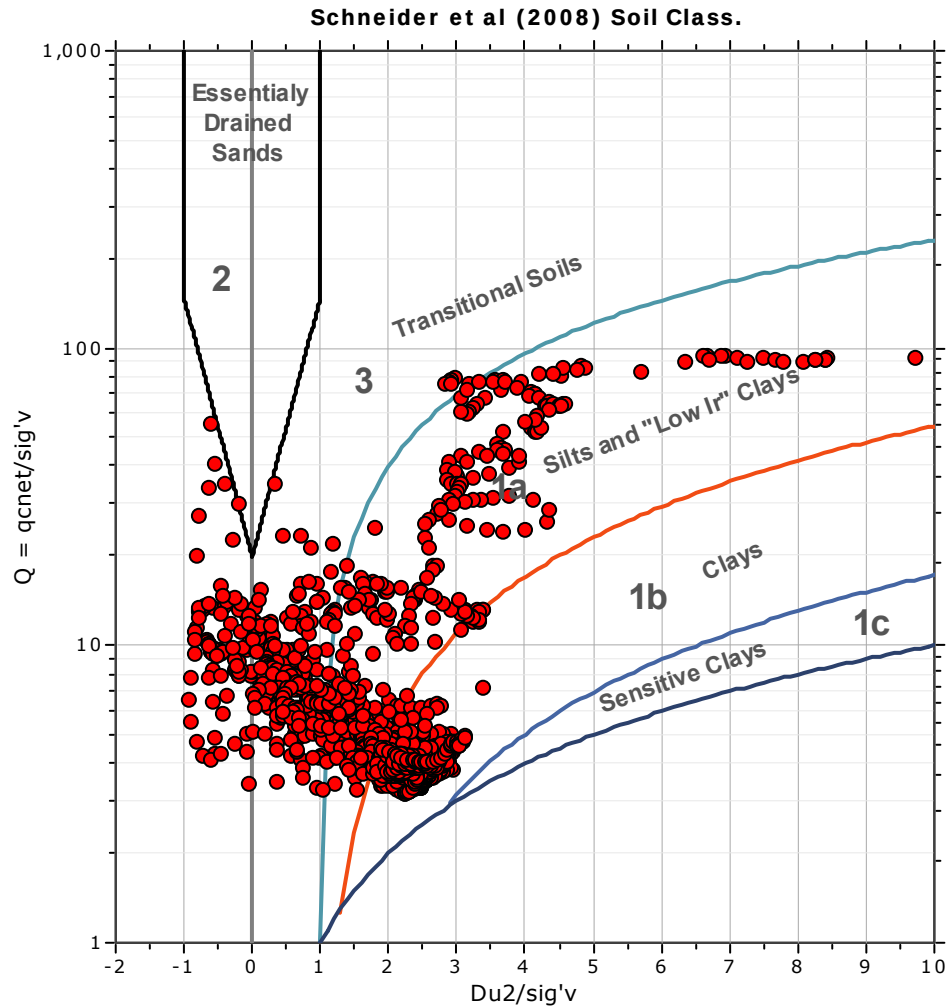
SBT - Bq plots (normalized)

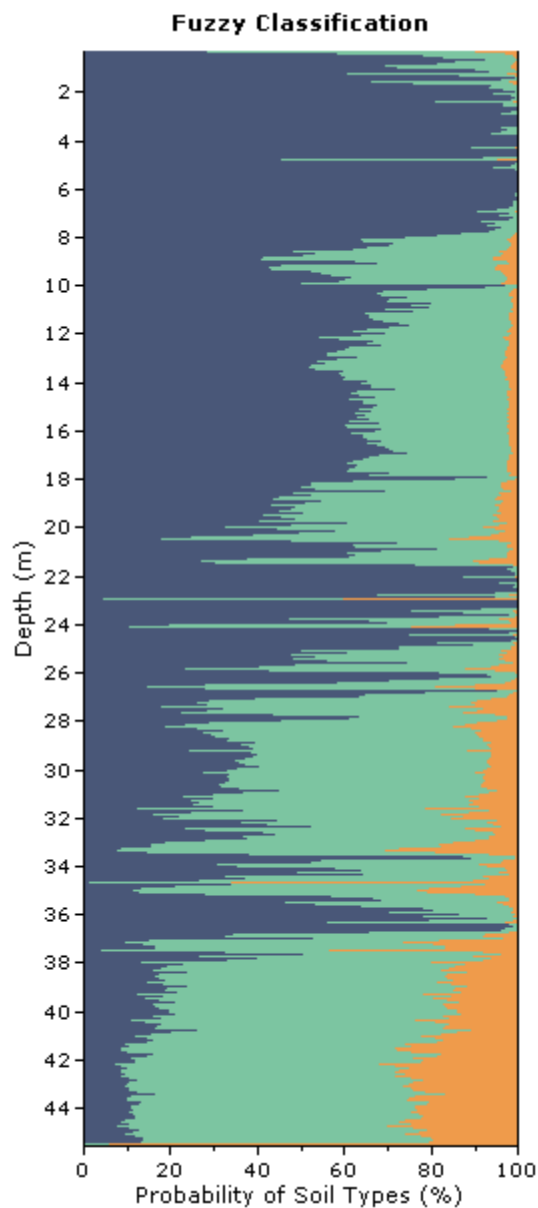
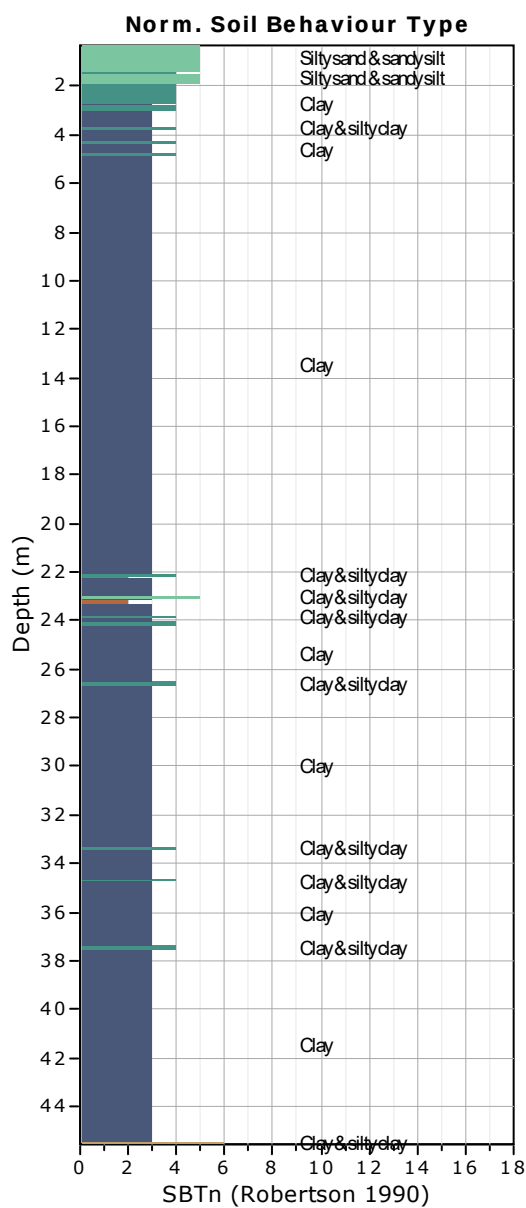


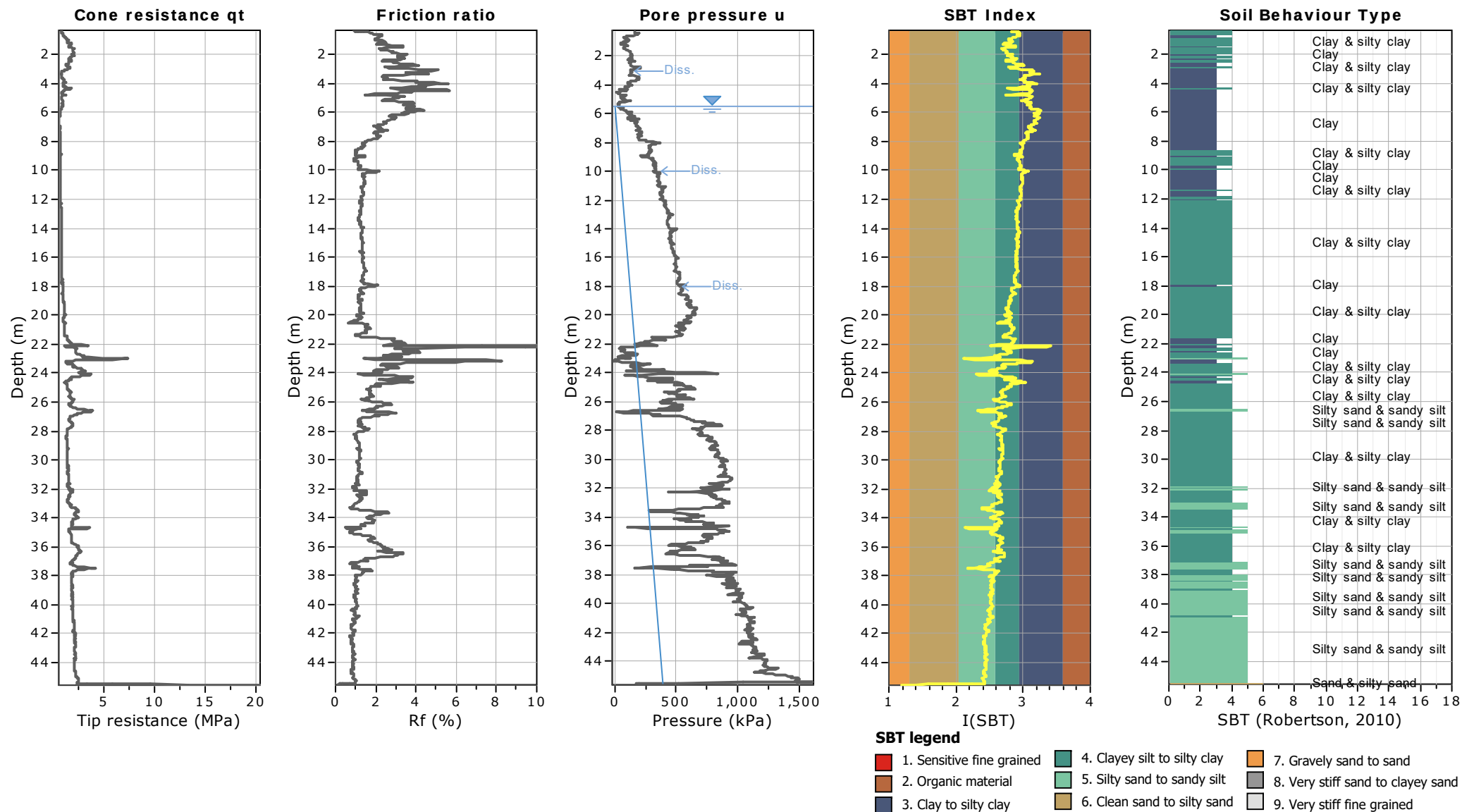
SBTn legend

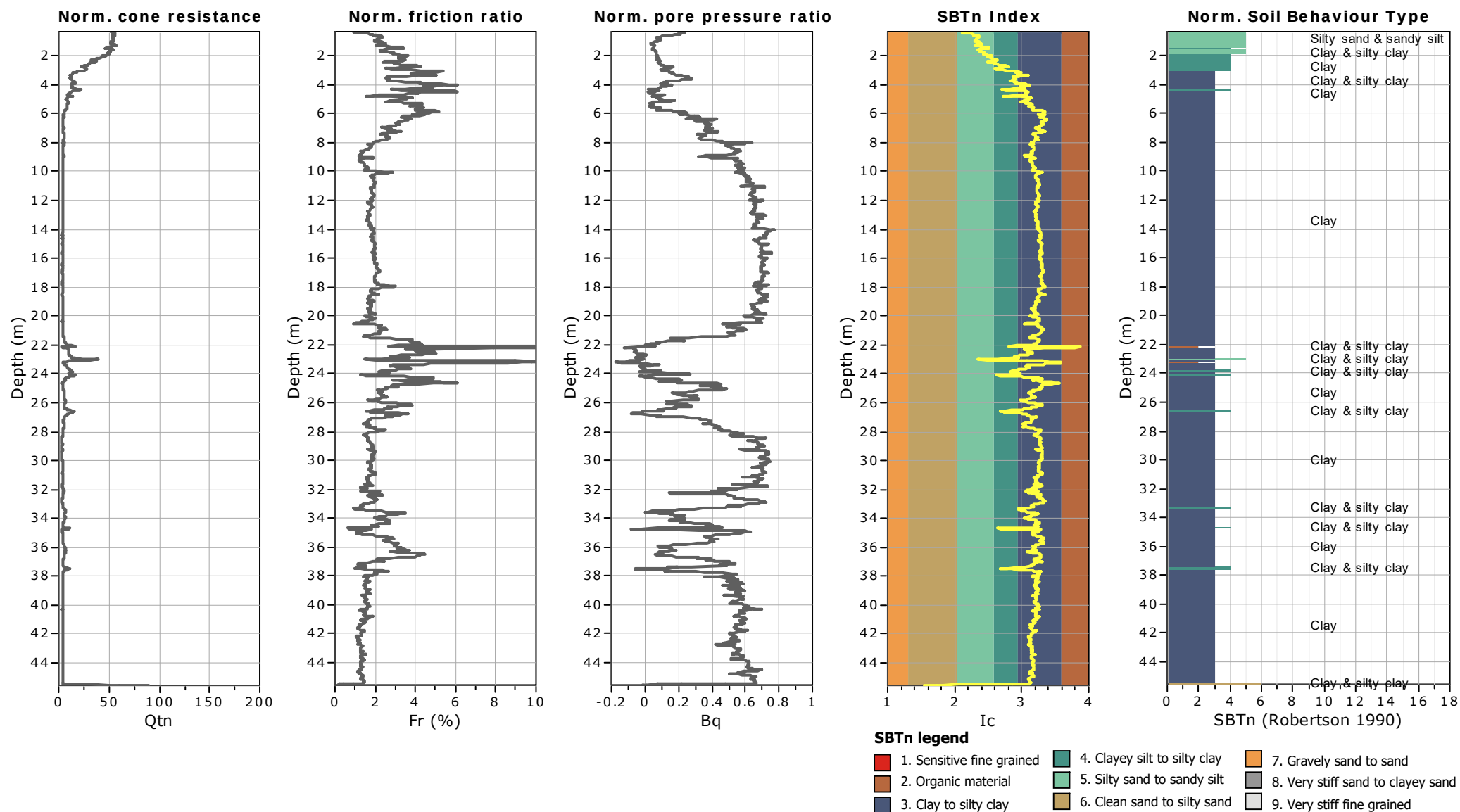
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

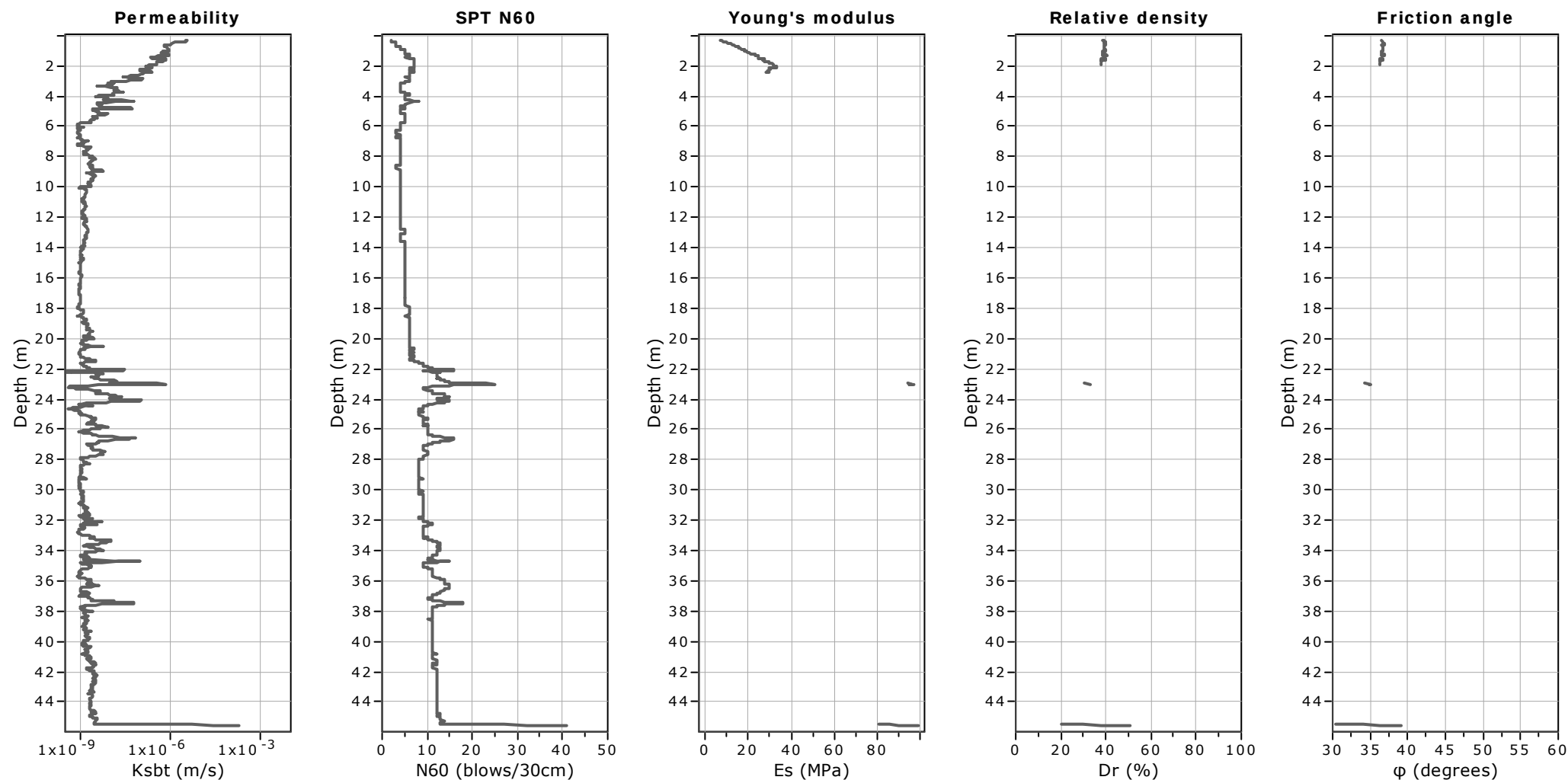
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

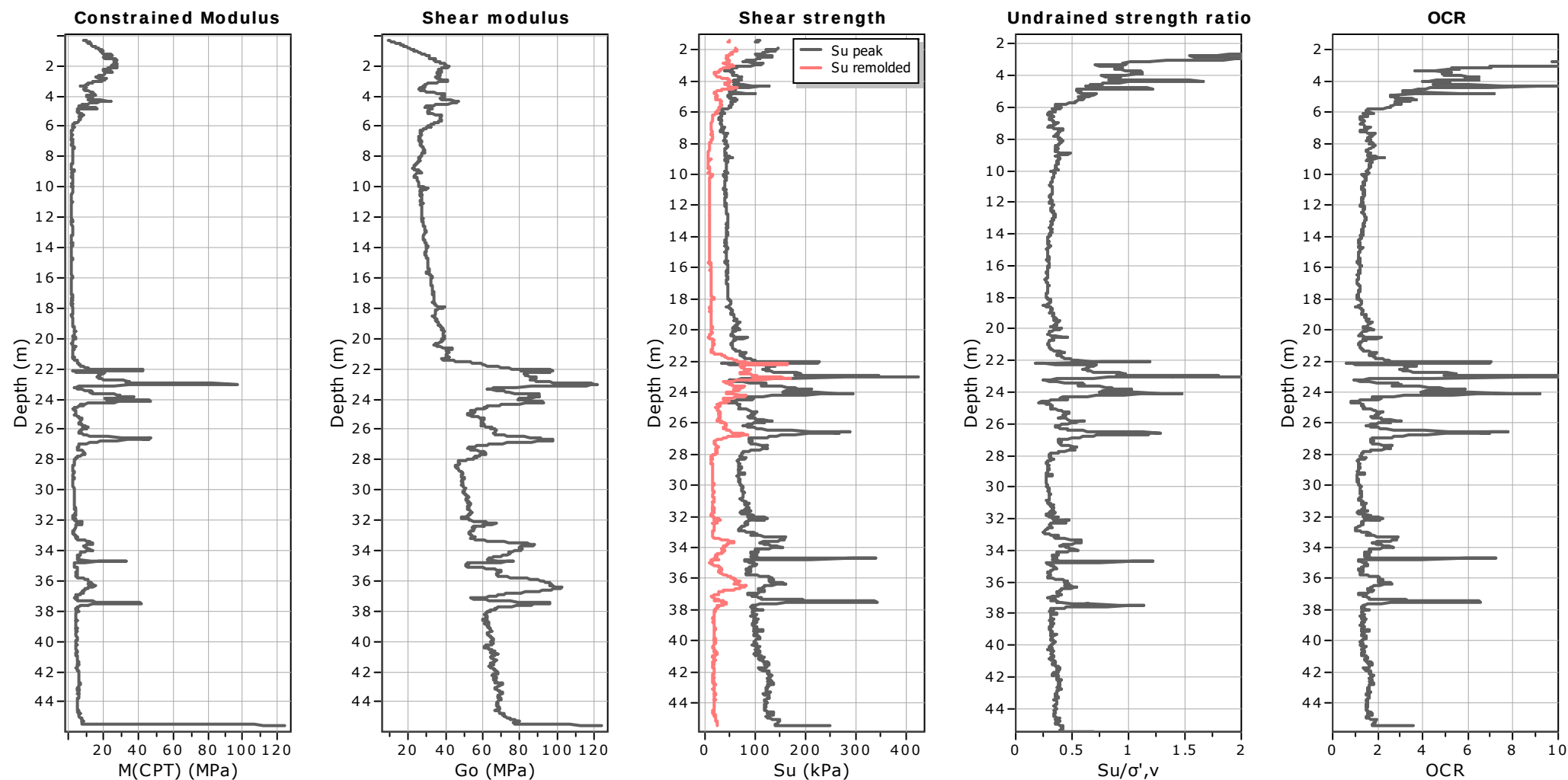
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

—●— User defined estimation data



Calculation parameters

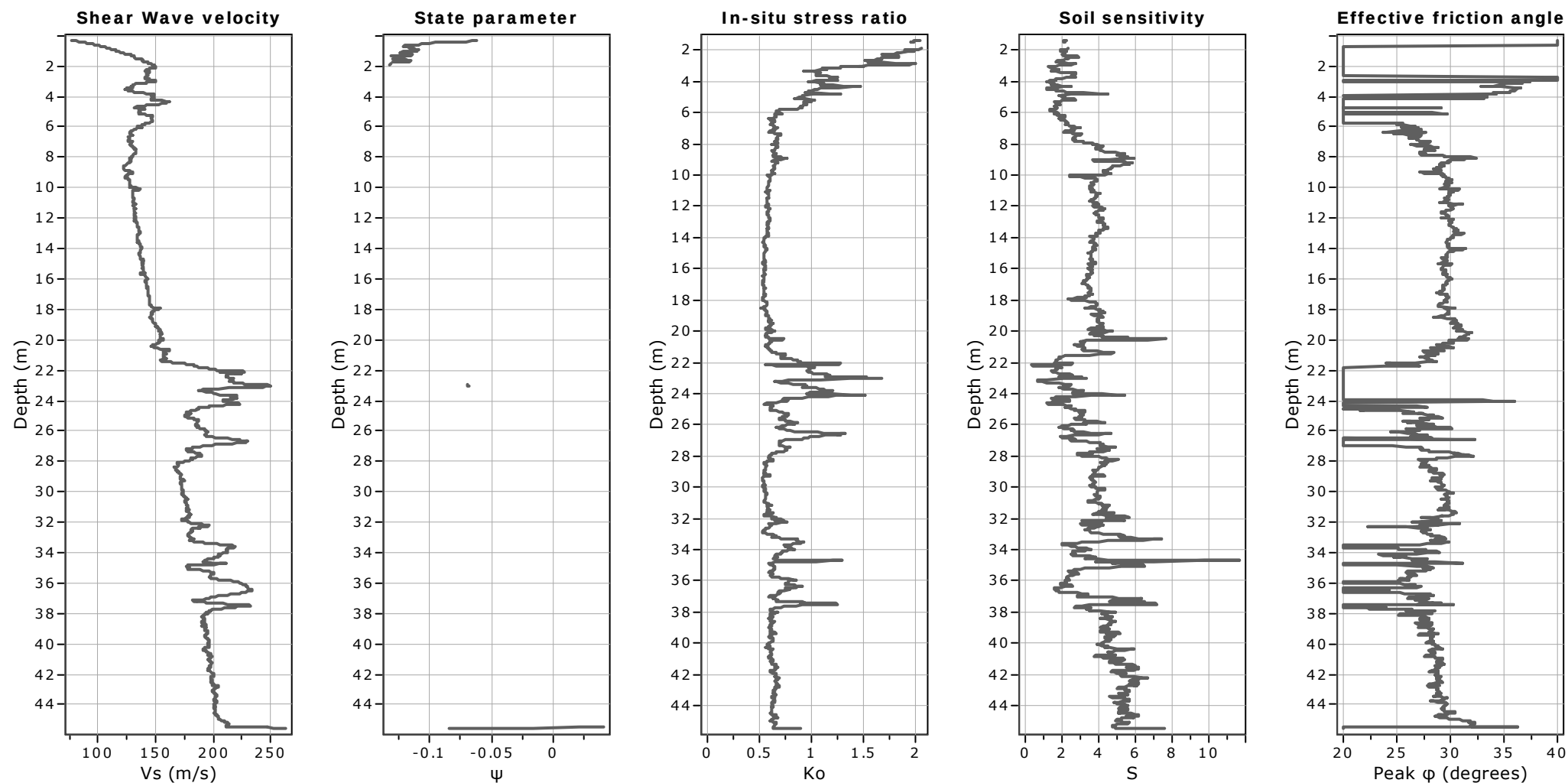
Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : Auto

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

● User defined estimation data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data

Dissipation Tests Results

Dissipation tests

Dissipation tests consists of stopping the piezocone penetration and observing porepressures (u) with elapsed time (t). The data are automatic recorded by the field computer and should take place until a minimum of 50% dissipation.

The porepressures are plotted as a function of square root of (t). The graphical technique suggested by Robertson and Campanella (1989), yields a value for t_{50} , which corresponds to the time for 50% consolidation.

The value of the coefficient of consolidation in the radial or horizontal direction c_h was then calculated by Houlsby and Teh's (1988) theory using the following equation:

$$c_h = \frac{T \times r^2 \times I_r^{0.5}}{t_{50}}$$

where:

T: time factor given by Houlsby and Teh's (1988) theory corresponding to the porepressure position

r: piezocone radius

I_r : stiffness index, equal to shear modulus G divided by the undrained strength of clay (S_u).

t_{50} : time corresponding to 50% consolidation

Permeability estimates based on dissipation test

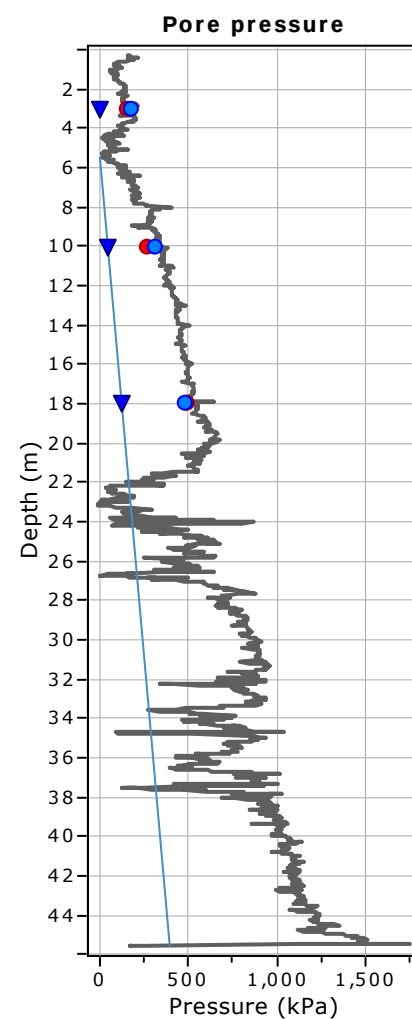
The dissipation of pore pressures during a CPTu dissipation test is controlled by the coefficient of consolidation in the horizontal direction (c_h) which is influenced by a combination of the soil permeability (k_h) and compressibility (M), as defined by the following:

$$k_h = c_h \times \gamma_w / M$$

where: M is the 1-D constrained modulus and γ_w is the unit weight of water, in compatible units.

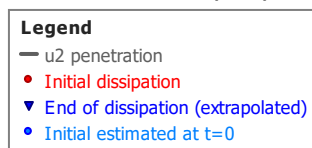
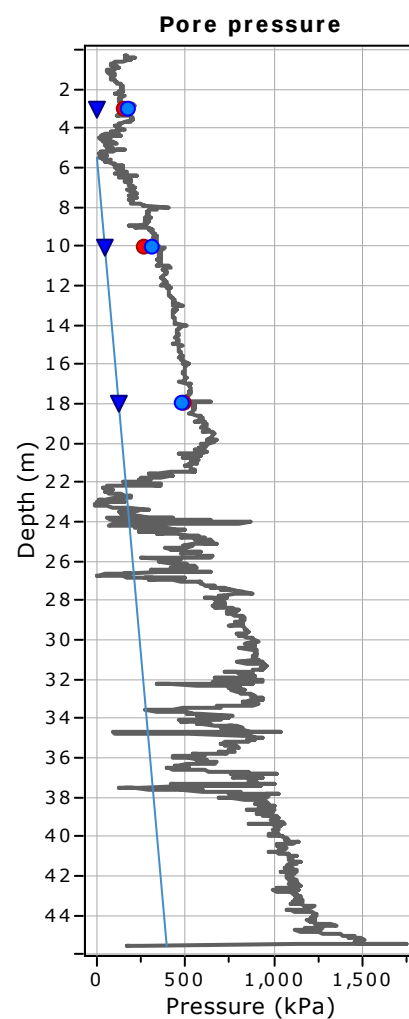
Tabular results

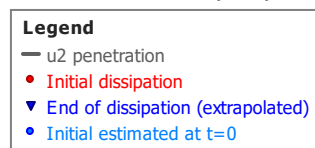
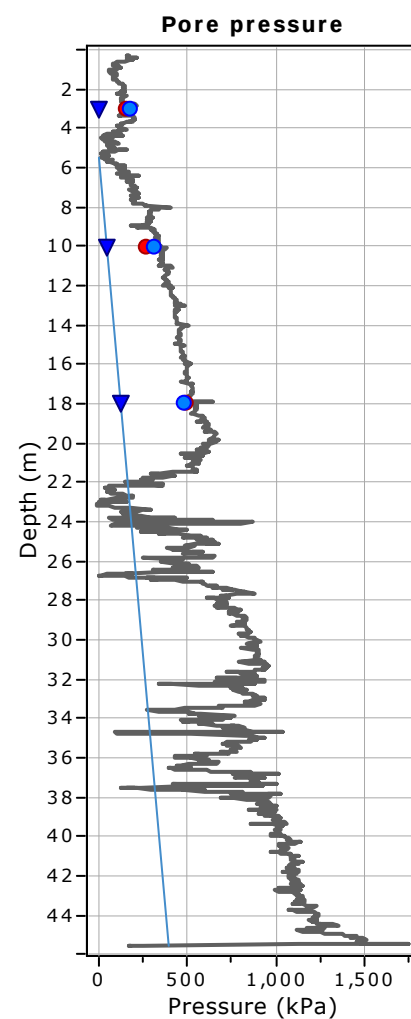
CPTU Borehole	Depth (m)	$(t_{50})^{0.50}$	t_{50} (s)	t_{50} (years)	G/ S_u	c_h (m^2/s)	c_h ($m^2/year$)	M (MPa)	k_h (m/s)
P02	3.04	91.1	8304	2.63E-004	435.17	2.06E-007	7	18.36	1.10E-010
P02	10.03	86.4	7466	2.37E-004	795.17	3.10E-007	10	2.08	1.46E-009
P02	17.97	89.8	8064	2.56E-004	886.79	3.03E-007	10	2.28	1.30E-009



Legend

- u2 penetration
- Initial dissipation
- ▼ End of dissipation (extrapolated)
- Initial estimated at $t=0$





Presented below is a list of formulas used for the estimation of various soil properties. The formulas are presented in SI unit system and assume that all components are expressed in the same units.

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

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

where g_w = water unit weight

:: Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

:: N_{SPT} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

:: Young's Modulus, E_s (MPa) ::

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

:: Relative Density, Dr (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

:: Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

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

(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

If $I_c > 2.20$

$$a = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$a = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = a \cdot (q_t - \sigma_v)$$

:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::

$$V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) ::

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

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

$$k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Soil Sensitivity, S_t ::

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Effective Stress Friction Angle, ϕ' (°) ::

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

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

DOCUMENTAZIONE INDAGINI SISMICHE IN SITO

INDAGINE SISMICA ATTIVA IN FORO CON METODOLOGIA DOWN-HOLE

Via G. Moruzzi – San Giuliano Terme (PI)



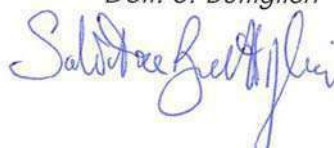
Committente: Scuola Superiore Sant'Anna

RELAZIONE TECNICA

Giugno 2015

S.I.S.M.A. geo
PROSPEZIONI SISMICHE
Studio Associato: via Novelli, 5 - 56124 Pisa
P. IVA: 01961590500

Dott. S. Buttiglieri



Dott. L. Guido



Indice

1 – PREMESSA	3
2 - STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DELLA PROSPEZIONE SISMICA IN FORO	4
4 - ELABORAZIONE DEI DATI	8
5 - INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	10
6 - CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE (D.M. 14/01/2008)	11

1 – PREMESSA

In data 05/06/2015, per conto della Scuola Superiore Sant'Anna, è stata eseguita un indagine geofisica di sismica in foro con metodologia Down-Hole (DH) in via G. Moruzzi nel Comune di San Giuliano Terme (Pi) (Figg. 1a e 1b).

Scopo dell'indagine è quello di definire il parametro Vs30, così come previsto dal O.P.C.M. 3274 e s.m.i, D.M. 14.09.2005 e D.M. 14.01.2008, determinando lo spessore e le velocità sismiche longitudinali (V_p) e trasversali (V_s) dei vari sismostrati incontrati sulla base delle loro proprietà meccaniche elastiche e i relativi parametri (E, G, K e ν) dei terreni presenti.

Il modello sismico monodimensionale (successione stratigrafica delle unità geofisiche) costituisce infatti l'aspetto principale sia nella stima degli effetti sismici di sito che nella definizione dell'azione sismica di progetto, in quanto consente di conoscere l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche nella modifica della pericolosità sismica di base (amplificazioni di natura litologica).

Ciò permette una corretta progettazione strutturale in relazione alle condizioni sitospecifiche, garantendo un adeguato livello di protezione antisismica delle costruzioni (O.P.C.M. 3274 e s.m.i; D.M. 14.09.2005; D.M. 14.01.2008). Nei capitoli successivi verranno descritte le modalità d'esecuzione delle misure sperimentali e l'interpretazione geofisica delle stesse.

Nelle figg. 1a e 1b si riporta l'ubicazione della prospezione sismica eseguita.



Fig. 1a



Fig. 1b

2 - STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DELLA PROSPEZIONE SISMICA IN FORO

Lo scopo della prova consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti (V_P , V_S), fare una stima di massima di alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate. Le indagini sismiche che utilizzano i sondaggi sono utili per avere una sismostratigrafia dettagliata del sottosuolo. Si applicano vari metodi di indagine in foro: Up Hole, Down Hole e Cross Hole.

Sistema di acquisizione

Il metodo Down-Hole prevede la sistemazione della sorgente in superficie e la misura delle onde d'arrivo in foro. La sonda, contenente il geofono a 5 componenti (una verticale e 4 orizzontali disposte a $90^\circ/45^\circ$ tra di loro), si fissa pneumaticamente alle pareti del tubo in PVC all'interno del foro di sondaggio (Fig. 2). Tale tubo in PVC viene preventivamente reso solidale con le pareti del

foro a mezzo di cementazione con opportune malte introdotte nell'intercapedine tra le pareti del foro e il tubo stesso.

Le principali caratteristiche tecniche del geofono da foro e del sismografo sono le seguenti.

Caratteristiche tecniche geofono da foro

- Geofoni con frequenza di 4,5 Hz - Componente verticale n.1 (S3) - Componente orizzontale n.4 (S5) - Sfasamento delle componenti orizzontali: 90 gradi (S3)	- Sfasamento delle componenti orizzontali: 45 gradi (S5) - Bloccaggio ad aria compressa 1,5 bar - Lunghezza: 300 mm - Cavo in dotazione: 60 mt
--	--

Caratteristiche tecniche sismografo

- Risoluzione: 24 bit - Numero canali: 24 - Campioni per canale : 20.000 - Campionamento : da 80 a 13.500 c/s - Analisi del rumore ambientale pre-acquisizione - Test geofoni automatico - Funzioni Trigger e Pre-Trigger - Filtri settabili da software	- Alimentazione: power box esterno 12V - Valigia in copolimeri di polypropylene - Temperatura di funzionamento da 0 a 60°C - Interfaccia USB su pannello interno - Connettore per cavo sismico 1-12 - Connettore per cavo sismico 13-24 - Dimensioni: 30 x 22,5 x 13,2 cm.
--	--

Il geofono da foro a cinque componenti è collegato tramite cavo al sismografo M.A.E., modello SYSMATRACK (Fig. 3), sistema multicanale (24 canali) in grado, insieme ad un pc portatile ed al software di acquisizione, di scaricare, visualizzare ed intervenire sul segnale ricevuto e sul sismogramma risultante dall'energizzazione provocata in superficie.

Sul pannello frontale trovano posto i due connettori 24 poli per i cavi sismici da 12 canali ciascuno, il connettore per lo starter, l'alimentazione esterna 12V e l'interfaccia USB per collegare il notebook necessario alla gestione della strumentazione. Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità al trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger per il quale è stato utilizzato un geofono verticale a 14Hz posto in prossimità della piastra di energizzazione.

I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con appositi programmi per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

Sistema di energizzazione

Il sistema consiste in due parti principali: la parte *energizzante* ed il *trigger*.

Per la parte *energizzante*, a seconda della tipologia di onde da generare, si utilizza una mazza battente da 8Kg impattante verticalmente su una piastra metallica di 20 cm di diametro poggiata a terra, per generare onde compressionali (tipo P) ed impattante orizzontalmente su una traversina in legno, per generare onde di taglio.

La traversina viene sovraccaricata da una massa statica e disposta ortogonalmente alla distanza della stessa con il foro superficiale attrezzato (congiungente shot-boccaforo); essa viene percossa alle due estremità al fine di generare onde di taglio (tipo Sh) polarizzate orizzontalmente (destra DX e sinistra SX). I sismogrammi delle onde trasversali generate, in fase di elaborazione, vengono quindi sommate, $DX + (-SX)$, consentendo l'amplificazione del segnale utile.

Il *trigger* consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato al sensore collegato al sistema di acquisizione dati; questo consente di individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica (Fig. 4).



Fig. 2 – Geofono da foro a 5 componenti



Fig. 3 - Sismografo: modello Sysmatrack

Metodologia di esecuzione dell'indagine

Definita come profondità da indagare quella della lunghezza complessiva del tubo in PVC, è stato calato il geofono a fondo foro, eseguendo l'indagine dal basso verso l'alto.

I profili sismici delle V_p , V_{sx} e V_{sy} sono stati eseguiti energizzando artificialmente il terreno e rilevando la vibrazione prodotta mediante il geofono tridimensionale da foro collegato al sismografo attraverso un cavo multipolare. Questo geofono è stato posto inizialmente alla profondità di 30 metri, fatto aderire alla parete attraverso un sistema pneumatico e dopo le tre registrazioni necessarie (scoppio verticale V_p , scoppio orizzontale destro V_{sx} e scoppio orizzontale sinistro V_{sy} : la posizione destra o sinistra è valutata guardando il lato anteriore della nostra autovettura) è spostato di 1 metro verso il piano campagna e ripetuta la procedura fino a coprire tutti i 30 metri.

L'offset di scoppio (distanza tra gli scoppi e il centro del foro di misura) è stato scelto di 2,00 metri corrispondente alla somma della larghezza delle ruote posteriori dell'autoveicolo in nostro possesso, con l'aggiunta di 40 cm d'ingombro della traversina in legno per gli scoppi orizzontali (Figg. 4 e 5).

Per ogni registrazione si è intervenuti sulla sensibilità dei geofoni in acquisizione, variando il guadagno degli stessi (generalmente crescente con la profondità), cercando di ottenere il giusto compromesso fra il segnale chiaro e il disturbo dovuto al rumore ambientale.



Fig. 4 – Sistema di energizzazione: mazza battente, piastra metallica e traversina in legno

L'acquisizione è stata effettuata utilizzando come durata del sismogramma un tempo di 512 millisecondi e come tempo di campionamento 250 microsecondi per un totale di 2.048 campioni per ogni traccia. Attraverso lo studio dei tempi di percorso delle onde di compressione e di taglio e quindi delle velocità, si può risalire alla disposizione geometrica e alle caratteristiche meccanico-elastiche dei litotipi presenti nell'area di indagine.

Le onde di volume P ed S, che attraversano un mezzo omogeneo e isotropo (condizioni ideali) hanno ben definite equazioni di moto. Note le velocità V_p e V_s che vengono ottenute tramite misure dirette, possono essere ricavate alcune proprietà meccaniche, quali il *modulo di Young* o *modulo elastico* E , il *modulo di taglio* G o *modulo di rigidità* μ , il *coefficiente di Poisson* ν , la *densità* ρ e il *modulo di incompressibilità* o bulk k .

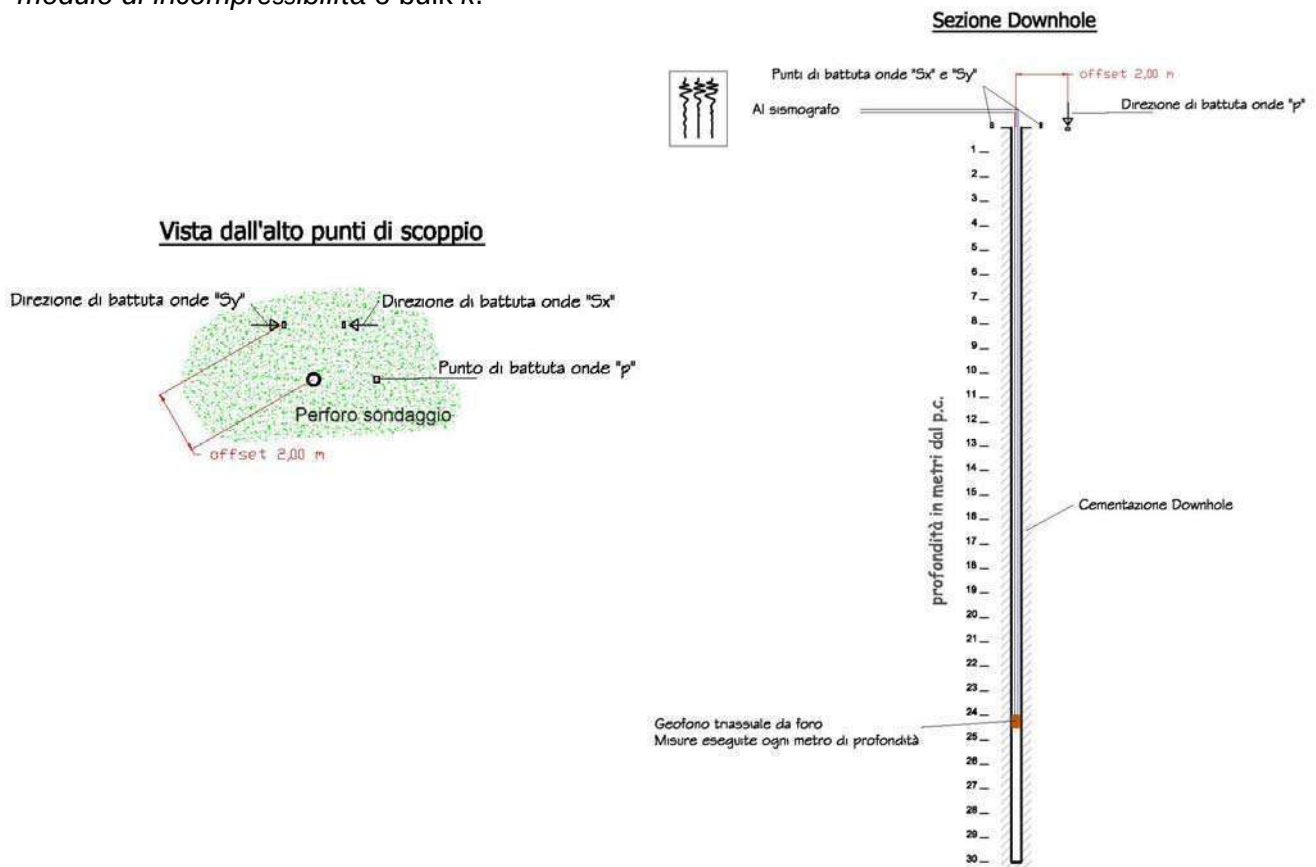


Fig. 5 - Geometria schematica della strumentazione necessaria all'indagine *Down-Hole*

4 - ELABORAZIONE DEI DATI

Una volta visualizzate le tracce abbiamo effettuato, con l'ausilio del software "*Intersism v. 2.1*" della *Geo&Soft International*, il picking dei primi arrivi delle onde P, delle onde Sx e delle onde Sy per ciascuna postazione effettuata (Allegato A - Figg. 6a, 6b e 6c).

I dati relativi ai tempi dei primi arrivi sono stati utilizzati per tracciare le dromocrone su grafici profondità/tempo (Allegato B - Fig. 7a).

Tracciate le dromocrone è stato individuato il numero dei possibili rifrattori (nel nostro caso 3) e quindi il numero di strati (nel nostro caso 4) caratterizzati da una differente velocità di propagazione delle onde sismiche (Allegato B - Fig. 7b). Infine attraverso la valutazione dello spazio intercorrente tra i punti di scoppio e di rilevazione, ed il tempo impiegato dall'onda a percorrerlo, sono state valutate le velocità sismiche delle onde P e delle onde S (sia dello scoppio destro che sinistro). Le velocità così ricavate sono state utilizzate per calcolare alcuni moduli elastici e il parametro Vs30 della successione sismica in esame (Tab. 1).

TABELLA 1
PROFONDITÀ DEI VARI RIFRATTORI INDIVIDUATI E LE RELATIVE VELOCITÀ SISMICHE
DISTANZA DELLO SPARO DA BOCCA FORO = 2.00 [m]

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S (X) [ms]	Onde S (Y) [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (X) (corretti) [ms]	Onde S (Y) (corretti) [ms]
1	1.00	3.50	7.30	9.70	1.57	3.26	4.34
2	2.00	4.50	11.60	13.90	3.18	8.20	9.83
3	3.00	5.50	15.30	17.70	4.58	12.73	14.73
4	4.00	6.50	19.10	21.20	5.81	17.08	18.96
5	5.00	8.00	23.50	25.10	7.43	21.82	23.30
6	6.00	10.30	26.80	30.30	9.77	25.42	28.75
7	7.00	11.70	34.50	39.90	11.25	33.17	38.36
8	8.00	13.20	44.10	47.20	12.81	42.78	45.79
9	9.00	14.40	52.80	53.90	14.06	51.54	52.62
10	10.00	15.60	62.40	64.40	15.30	61.19	63.15
11	11.00	16.80	70.70	72.00	16.53	69.56	70.84
12	12.00	18.00	81.40	81.30	17.76	80.29	80.19
13	13.00	19.20	89.40	88.40	18.98	88.36	87.37
14	14.00	19.60	99.20	96.30	19.40	98.20	95.33
15	15.00	20.90	107.00	104.80	20.72	106.06	103.88
16	16.00	22.70	113.20	112.40	22.52	112.33	111.53
17	17.00	23.70	126.30	120.30	23.54	125.43	119.48
18	18.00	24.50	136.40	129.60	24.35	135.57	128.81
19	19.00	25.60	143.20	137.50	25.46	142.41	136.74
20	20.00	26.50	149.50	144.70	26.37	148.76	143.98
21	21.00	27.30	157.20	150.30	27.18	156.49	149.62
22	22.00	28.50	164.60	155.10	28.38	163.92	154.46
23	23.00	29.30	168.90	159.10	29.19	168.27	158.50
24	24.00	29.70	171.30	163.40	29.60	170.71	162.84
25	25.00	30.30	174.50	167.40	30.20	173.94	166.87
26	26.00	31.20	176.90	170.00	31.11	176.38	169.50
27	27.00	31.60	181.30	172.80	31.51	180.80	172.33
28	28.00	32.10	184.70	176.00	32.02	184.23	175.55
29	29.00	32.90	186.20	179.40	32.82	185.76	178.97
30	30.00	33.60	189.00	182.00	33.53	188.58	181.60

VELOCITA' ONDE P

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]
1	6	613
2	16	786
3	22	1028
4	30	1565

PARAMETRI ONDE SX

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Poisson [-]	Shear [kPa]	Young [kPa]	Bulk [kPa]
1	6	239	0.37	114242..	313023..	401311
2	16	111	0.48	24642.0	72940.0	607833
3	22	120	0.48	28800.0	85247.0	710391
4	30	334	0.46	223112..	651487..	2714529

PARAMETRI ONDE SY

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Poisson [-]	Shear [kPa]	Young [kPa]	Bulk [kPa]
1	6	208	0.40	86528.0	242278..	403796
2	16	119	0.48	28322.0	83833.0	698607
3	22	138	0.48	38088.0	112740..	939499
4	30	310	0.46	192200..	561224..	2338433

VELOCITA' MEDIE VS30

Geofono	VS30 [m/s]
orizzontale Sx	158.6
orizzontale Sy	164.7

5 - INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Sono stati individuati quattro sismostrati caratterizzati da velocità di propagazione delle onde sismiche (P ed S) diverse (Tab. 1). La visualizzazione dei sismogrammi in onde P e onde S fornisce un trend dei sismostrati sostanzialmente in accordo con i risultati della stratigrafia restituita dal sondaggio.

L'interpretazione sismostratigrafica effettuata con le dromocrone delle onde P denota un primo strato di circa 6 metri di spessore, con velocità di 613 m/sec, seguito da un secondo strato con velocità di 786 m/sec fino alla profondità di circa 16 metri, un terzo con velocità di 1028 m/sec fino alla profondità di 22 metri e un quarto con velocità di 1565 m/sec fino alla profondità indagata di 30 metri dal p.c. attuale.

L'analisi delle dromocrone delle onde Sx è in linea con quella delle onde P mettendo in evidenza un primo strato di circa 6 metri di spessore con V_{sx} di 239m/sec, un secondo strato con V_{sx} di 111 m/sec fino alla profondità di 16 metri, un terzo strato con V_{sx} di 120 m/sec fino alla profondità di 22 metri ed infine un quarto strato con V_{sx} di 334 m/sec fino a 30 metri dal p.c. attuale. Anche le velocità delle onde Sy sono simili alle velocità delle onde Sx con valori che si attestano intorno a 208 m/sec per il primo strato, 119 m/sec per il secondo, 138 m/sec per il terzo e 310 m/sec per il quarto.

Questo riscontro è molto importante poiché mette in luce l'omogenea risposta del terreno alle onde di taglio S, la buona esecuzione delle misure di campagna e del foro di sondaggio.

6 - CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE (D.M. 14/01/2008)

A partire dal modello sismico riportato nel capitolo precedente, è possibile calcolare il valore delle V_{s30} , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008), coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 8, propongono l'adozione di un sistema di caratterizzazione geofisica e geotecnica del profilo stratigrafico del sottosuolo, mediante cinque tipologie di suoli (A - B - C - D - E più altri due speciali: S1 e S2), da individuare attraverso la stima dei valori della velocità media delle onde sismiche di taglio mediate, ovvero sul numero di colpi N_{spt} ottenuti in una prova penetrometrica dinamica, ovvero sulla coesione non drenata media C_u .

Dal punto di vista strettamente normativo si fa riferimento al *punto 3.2.2 del D.M. 14/01/2008 (Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche)*.

In base alle grandezze sopra definite si identificano le seguenti Categorie di Sottosuolo:

categoria	descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione 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> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{spt, 30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $C_{u, 30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina)
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{spt, 30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 \text{ kPa} < C_{u, 30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{spt, 30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $C_{u, 30} < 70$ kPa nei terreni a grana fine)
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_{s30} > 800$ m/s).
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di V_{s30} inferiori a 100 m/s (ovvero $10 \text{ kPa} < C_{u, 30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Tabella 3.2.II (NTC) – Categorie di sottosuolo

In base ai risultati dell'indagine sismica eseguita è stato calcolato il parametro Vs30 utilizzando la seguente formula (D.M. 14.09.2005 e nel D.M. 14.01.2008: "Norme Tecniche per le Costruzioni").

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

Sulla base delle indicazioni fornite del progettista, il valore di Vs30 è stato calcolato a partire dal p.c. fino alla profondità di 30 m.

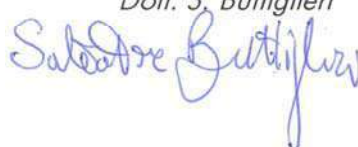
La Vs30 è risultata essere pari a **158 m/s** e a **164 m/s** rispettivamente per le onde Sx e per le onde Sy.

Il parametro Vs30 deve essere accuratamente definito, oltre che sulla base dei dati contenuti nel presente rapporto, anche sulla scorta di ulteriori informazioni quali, in particolare, le caratteristiche geometriche delle opere di fondazione in progetto così da potere determinare l'effettiva categoria di suolo.

Concludendo si ribadisce che i modelli ottenuti dai risultati geofisici non invasivi, in generale, sono utilizzabili ai fini di valutazioni semiquantitative della risposta sismica locale e devono essere accertati mediante indagini dirette di tipo geologico, geotecnico e/o idrogeologico; infatti, le indagini geofisiche non invasive devono considerarsi conoscitive e non esaustive per la definizione della reale situazione litostratigrafica del sottosuolo. In ragione di ciò, la S.I.S.M.A. geo declina ogni responsabilità relativamente alle attività che si basano esclusivamente sui risultati geofisici e poste in essere dal committente o da terzi incaricati sui luoghi oggetto dell'indagine.

Pisa, Giugno 2015

S.I.S.M.A. geo
PROSPEZIONI SISMICHE
Studio Associato: via Novelli, 5 - 56124 Pisa
P. IVA: 01961590500

Dott. S. Buttiglieri


Dott. L. Guido


ALLEGATO A

PICKING DEI PRIMI ARRIVI DELLE ONDE P, Sx e Sy

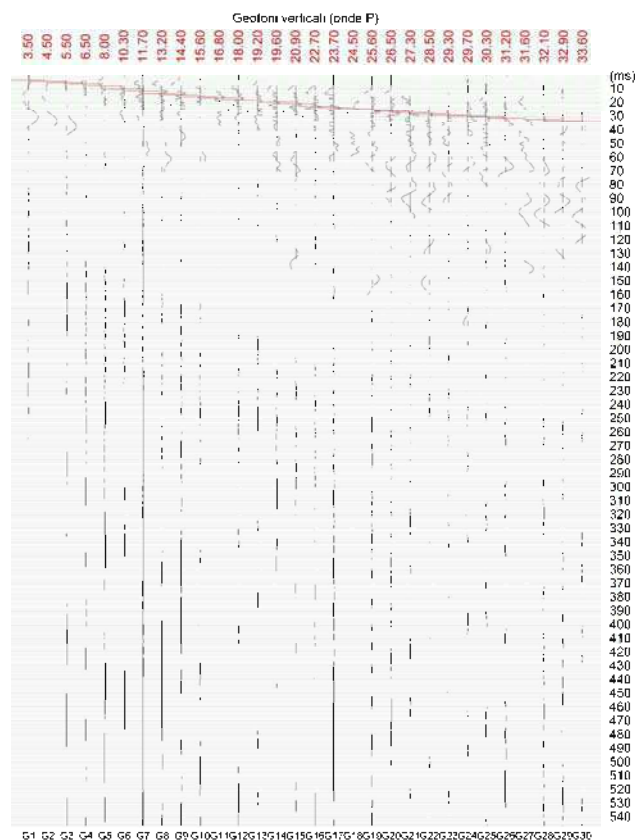


Fig. 6a - Ricerca dei primi arrivi delle onde P

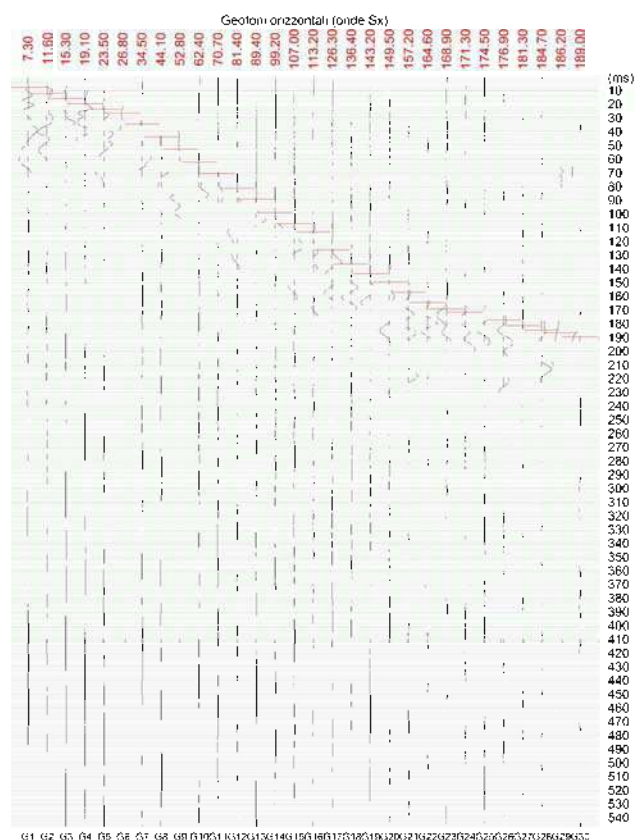


Fig. 6b - Ricerca dei primi arrivi delle onde Sx

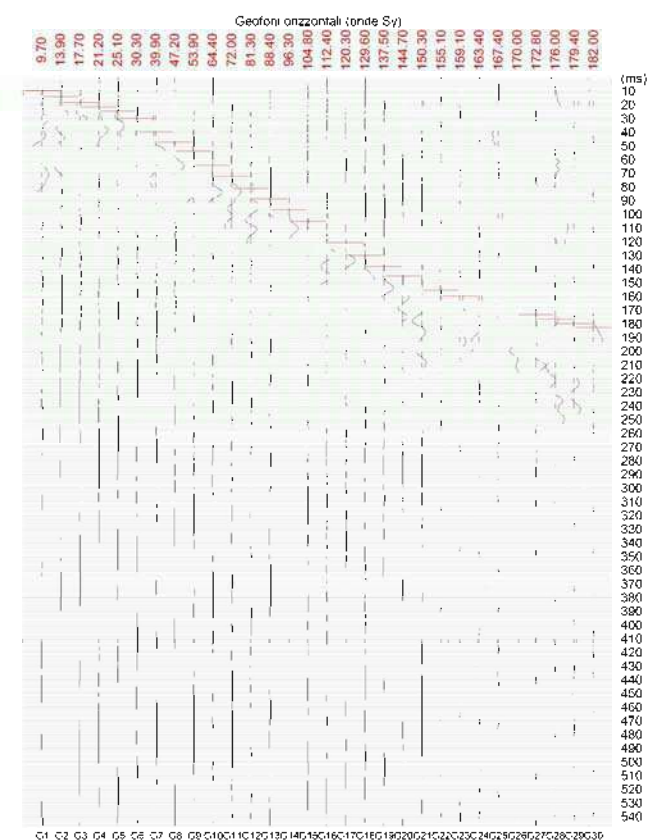


Fig. 6c - Ricerca dei primi arrivi delle onde Sy

ALLEGATO B

Dromocrone (grafici profondità/tempo) delle onde P, Sx e Sy

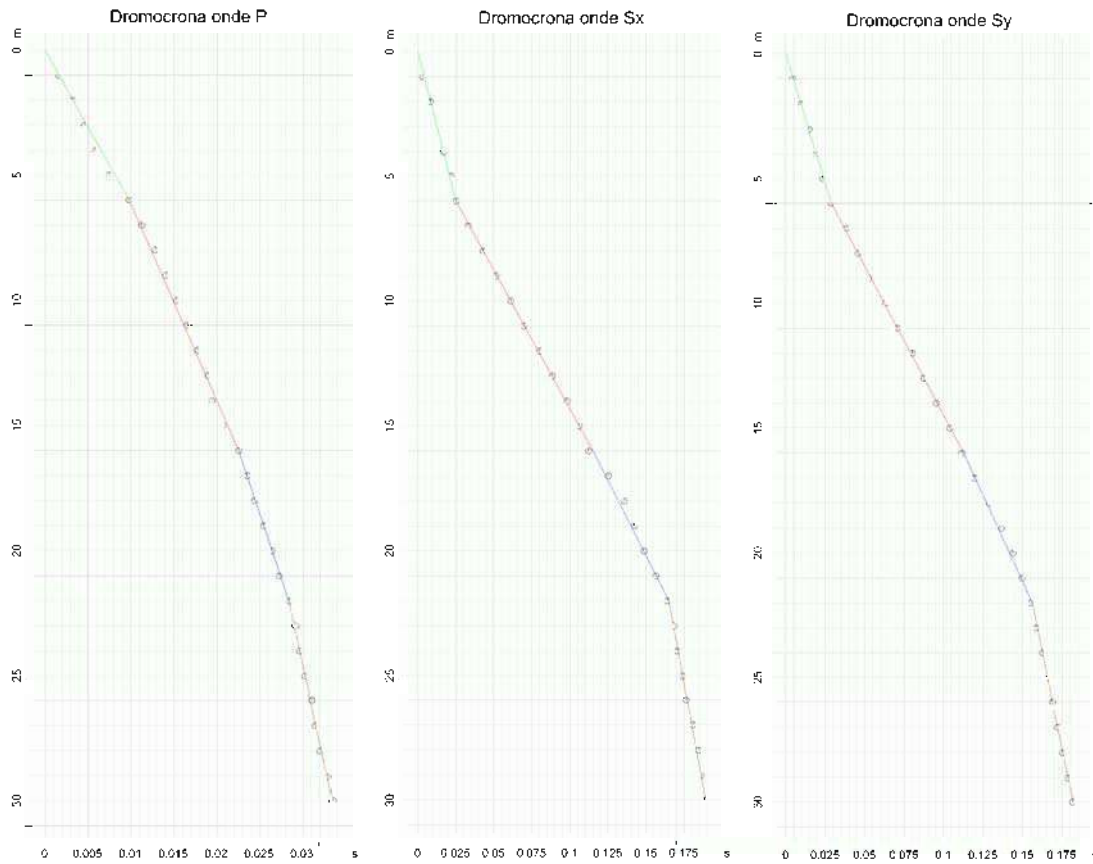
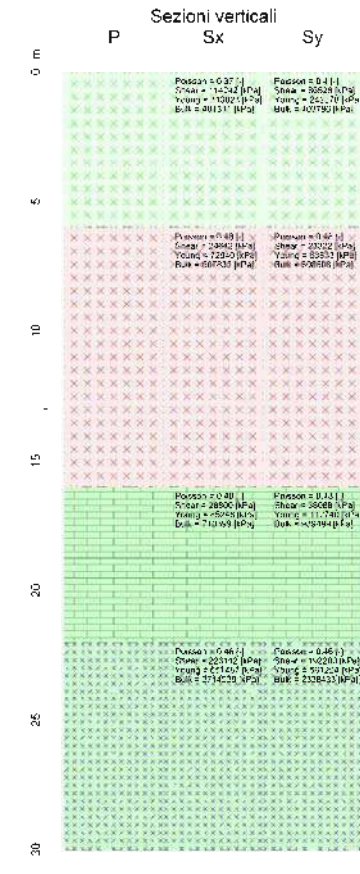


Fig. 7a - Dromocrone delle onde P, delle onde Sx e delle onde Sy

Rifrattori
caratterizzati da una differente
velocità di propagazione delle onde sismiche



P	613 m/s	P	786 m/s	P	1028 m/s	P	1565 m/s	Vs30
Sx	239 m/s	Sx	111 m/s	Sx	120 m/s	Sx	334 m/s	158.6 m/s
Sy	208 m/s	Sy	119 m/s	Sy	138 m/s	Sy	310 m/s	164.7 m/s

Fig. 7b - Sezioni verticali delle onde P, Sx e Sy

RELAZIONE TECNICA

Committente: Scuola
Universitaria Superiore Sant'
Anna

Località: San Giuliano Terme –
Via Berchet

Data Indagine: 02/04/2020

Codice lavoro: 200402a

INDAGINI SISMICHE HVSR

Dott. Jacopo Martini

GAIA Servizi S.n.c.

Via Lenin, 132 - 56017 San Giuliano
Terme (PI)

Tel./Fax: 050 9910582

e-mail: info@gaiaservizi.com

p. IVA 01667250508

Data elaborazione: 24/04/2020

GAIA Servizi S.n.c.
di Massimiliano Vannozzi & C.
Via Lenin 132 - 56017 S. Giuliano T. (PI)
P. IVA 01667250508 N. REA PI - 145167



Sommario

PREMESSA	3
INDAGINI DI SISMICA PASSIVA TIPO HVSR	4
GENERALITA'	4
SISTEMA DI ACQUISIZIONE – INDAGINI EFFETTUATE.....	7
ELABORAZIONE DEI DATI HVSR	7
MODELLAZIONE DEL RAPPORTO SPETTRALE HVSR.....	10

PREMESSA

Per incarico della Scuola Universitaria Superiore Sant' Anna, sono state eseguite indagini geofisiche in Via Berchet, nel Comune di San Giuliano Terme.

Tali indagini sono finalizzate alla ricostruzione della distribuzione e dell'andamento delle velocità sismiche nel sottosuolo, per determinare le principali caratteristiche sismo-stratigrafiche ed elastiche dei terreni.

Al fine di caratterizzare il sito in esame dal punto di vista della velocità delle onde di taglio (VS), sono state eseguite una serie di misure di microtremori atte ad analizzare il rapporto spettrale H/V (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio - HVSR).

Le presenti note illustrano la metodologia delle indagini ed i risultati conseguiti.

INDAGINI DI SISMICA PASSIVA TIPO HVSR

GENERALITA'

La tecnica di acquisizione ed analisi dei rapporti spettrali o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

Le conoscenze e le informazioni che si possono ottenere dall'analisi ed interpretazione di una registrazione di questo tipo sono:

- ove esistente, la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale ai fini dell'individuazione di adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- ove determinabile, la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso, a seguito di analisi correlate sarà possibile confrontare le frequenze di sito e dell'edificio, e valutare se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la stratigrafia del sottosuolo con un ampio range di profondità di indagine, e secondo il principio che in termini di stratigrafia del sottosuolo, uno strato è inteso come unità distinta, in termini di contrasto d'impedenza sismica.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti.

La forma di un'onda registrata in un sito oggetto di indagine è funzione di:

- dalla forma dell'onda prodotta dall'insieme delle sorgenti s dei microtremiti;
- dal percorso dell'onda dalle sorgenti s fino alla posizione x del sito oggetto di indagine e funzione dei processi di attenuazione, riflessione, rifrazione e canalizzazione di guida d'onda;
- dalla modalità di acquisizione dello strumento in funzione dei parametri e delle caratteristiche strumentali.

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre.

Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni con ampiezze minime, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il segnale da acquisire non è generato con strumenti o tecniche attive, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di origine sismiche che dovute al microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, canalizzazioni per fenomeni di guida d'onda ed attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato.

Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte di informazioni correlata al contenuto frequenziale del segnale che può essere estratta e che permette di ottenere informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore.

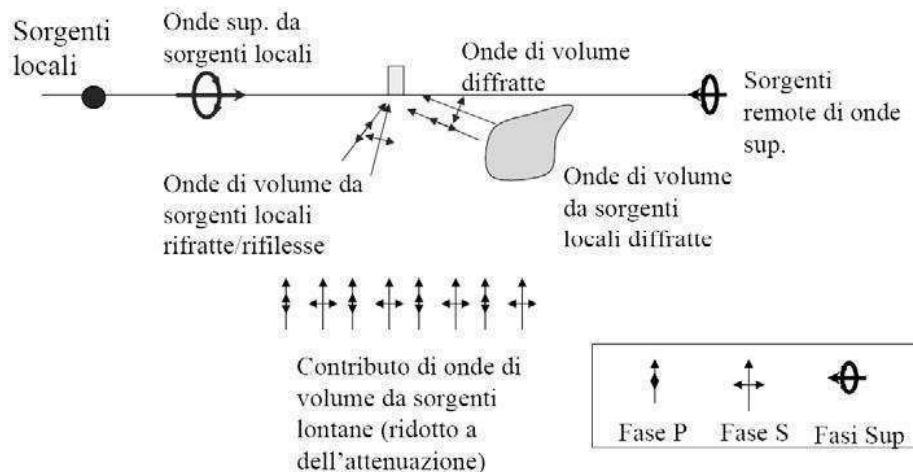


Figura 1: Modalità di generazione e propagazione di microtremore

Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartato dalla sismologia classica, contiene informazioni.

Questa informazione è però correlata alle caratteristiche frequenziale e spettrali del cosiddetto "rumore casuale" o microtremore, e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la tecnica di analisi dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili sul comportamento frequenziale dei sottosuoli, informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

L'ottenimento di una stratigrafia sismica da indagini a stazione singola, deriva dai primi studi di Kanai (1957) in poi, per cui diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito.

Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970).

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

Inizialmente, alcuni ricercatori, proposero di utilizzare anche l'ampiezza del picco come indicatore sintetico dell'amplificazione sismica locale, direttamente utilizzabile per la microzonazione.

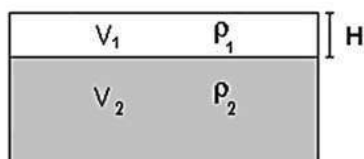
Purtroppo, esiste abbondante letteratura comprovante il fatto che l'ampiezza del picco H/V, pur essendo legata all'entità del contrasto di impedenza tra strati, non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice (cfr. Mucciarelli e Gallipoli, 2001; SESAME, 2005 e referenze ivi contenute).

Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere, in linea di principio, usato come strumento stratigrafico.

Le basi teoriche del metodo HVSR sono relativamente semplici in un mezzo del tipo strato + bedrock (o strato assimilabile al bedrock) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato (1-D).

Consideriamo il sistema della figura seguente in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità e le diverse velocità delle onde sismiche.

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'interfaccia che separa i due strati.



L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato.

La frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde S (o P) è pari a (equazione 1):

$$(f_r) = V_s / 4H$$

$$(f_r) = V_p / 4H$$

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh.

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume, poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1.

Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione 1.

L'utilità delle misure H/V risiede quindi nella possibilità di ricavare empiricamente la frequenza di sito e, a fianco di curve di dispersione date da misure *MASW*, a vincolare il modello V_s specie in profondità.

SISTEMA DI ACQUISIZIONE – INDAGINI EFFETTUATE

La misura prevede la registrazione del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di geofono tridimensionale.

La strumentazione di acquisizione utilizzata per la presente indagine è un prospettore sismico SARA “SR04 GeoBox” a 3 canali completo di geofono 3D da superficie, che presenta le seguenti specifiche:

- trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (2 Hz);
- amplificatori;
- digitalizzatore;
- frequenza di campionamento: 300 Hz;
- convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit;

Lo strumento di misura è stato orientato secondo le direzioni geografiche (E e W).

Sono state eseguite n°1 registrazioni della durata di circa 20 minuti.

ELABORAZIONE DEI DATI HVSR

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si possono ricavare il valore di frequenza caratteristica del sito.

Sapendo che ad ogni picco in frequenza corrisponde una profondità dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza si può estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

L'elaborazione dei dati raccolti impiega il software *winMASW Academy* in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (*Site effects assessment using ambient excitations*, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale.

In fase di elaborazione vengono seguite le seguenti operazioni:

1. la registrazione viene suddivisa in intervalli della durata di qualche decina di secondi ciascuno,
2. per ogni segmento viene eseguita un'analisi spettrale del segmento nelle sue tre componenti,
3. per ciascun segmento si calcolano i rapporti spettrali fra le componenti del moto sui piani orizzontale e verticale,
4. vengono calcolati i rapporti spettrali medi su tutti i segmenti.

Per considerare la misura ottenuta come una stima dell'ellitticità delle onde di Rayleigh è necessario che i rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano “stabili” ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato, che gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano state sorgenti “dominanti” e che la misura non contenga errori sistematici (per es. dovuti ad un cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno).

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di f_0 – Frequenza/e di risonanza e la sua deviazione standard.

Viene riportata anche la check-list proposta dalla procedura SESAME per l'ottenimento di una curva H/V affidabile.

HVSR 1

Dataset: MT_20200422_091953.SAF

Sampling frequency (Hz): 300

Window length (sec): 20

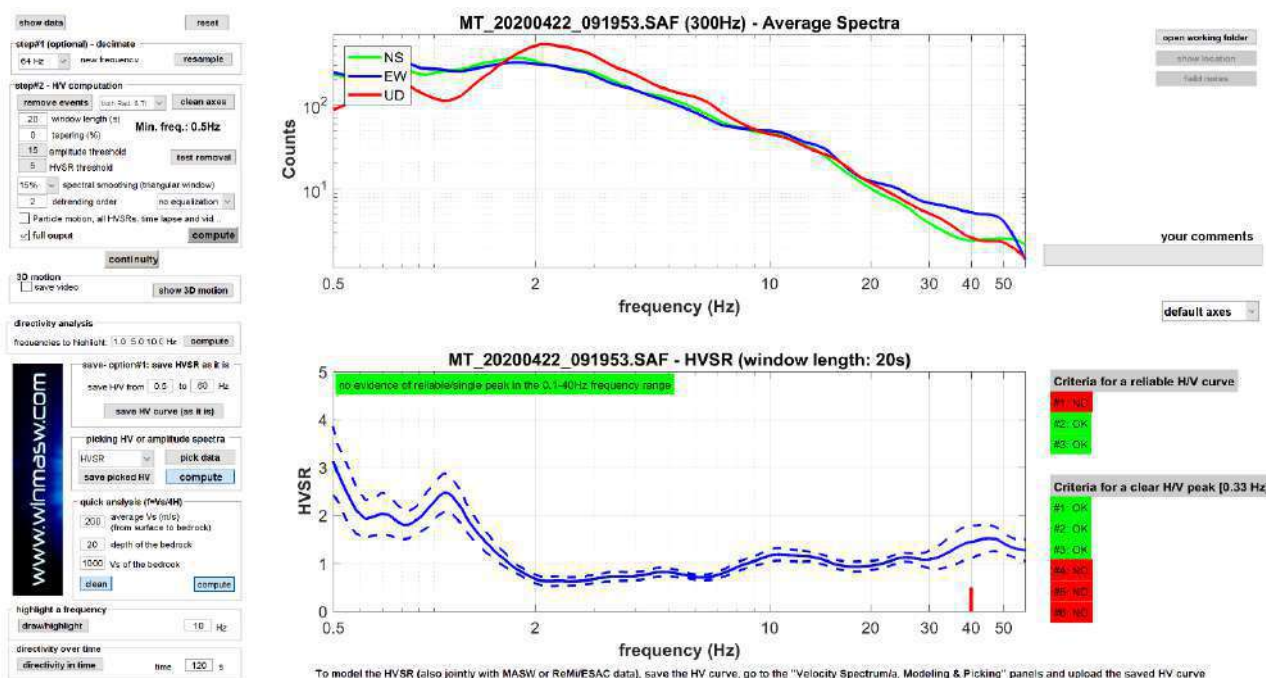
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz

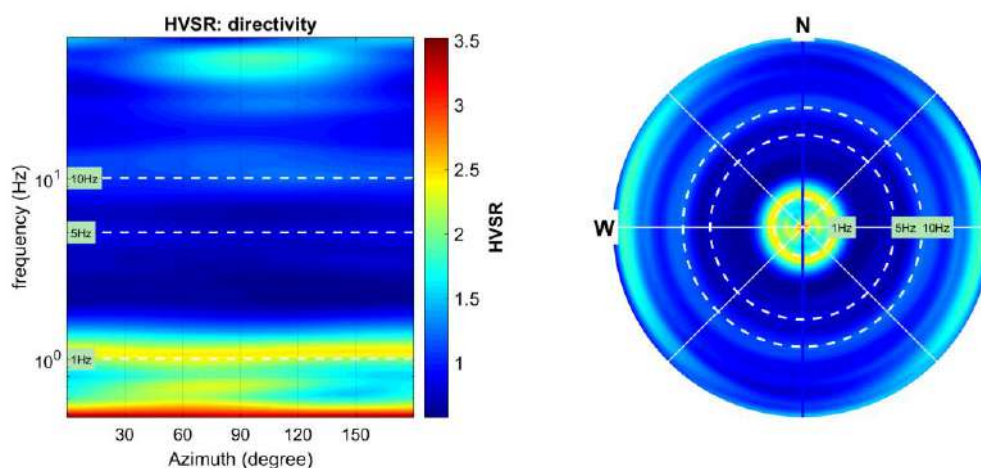
Length of analysed dataset (min): 20.0

Tapering (%): 0

Smoothing (%): 15

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



DIREZIONALITA' H/V

In the following the results considering the data in the 0.1-60.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 0.3

Peak HVSr value: 6.8

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

- #1. [$f_0 > 10/L_w$]: $0.330 < 0.5$ (NO)
- #2. [$n_c > 200$]: $771 > 200$ (OK)
- #3. [$f_0 < 0.5\text{Hz}$; $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$] (OK)

=== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f_- in the range $[f_0/4, f_0]$ | $AH/V(f_-) < A_0/2$]: yes, at frequency 0.1Hz (OK)
- #2. [exists f_+ in the range $[f_0, 4f_0]$ | $AH/V(f_+) < A_0/2$]: yes, at frequency 0.5Hz (OK)
- #3. [$A_0 > 2$]: $6.8 > 2$ (OK)
- #4. [$f_{\text{peak}}[A_h/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)
- #5. [$\sigma_A(f) < \epsilon(f_0)$]: $0.098 > 0.066$ (NO)
- #6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $4.415 < 2.5$ (NO)

Please, be aware of possible industrial/man-induced peaks or spurious peaks due to meaningless numerical instabilities. Remember that SESAME criteria should be considered in a flexible perspective and that if you modify the processing parameters they can change.

MODELLAZIONE DEL RAPPORTO SPETTRALE HVSR

Il Programma winMASW consente di modellare il rapporto spettrale H/V sia dalle onde di corpo (Herak, 2008) che dalle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009).

La curva H/V dipende dai valori della VS e spessori, dai valori dei fattori di qualità (Q), dalle onde di Rayleigh e Love, dal numero di modi da utilizzare, da una certa componente legata alle onde di corpo ecc.

Modellare un H/V può rivelarsi allora una cosa piuttosto complessa e ricavare le VS avendo a disposizione solamente una curva H/V è piuttosto “arduo” ma risulta altresì estremamente utile sfruttare la sensibilità delle curve H/V rispetto la profondità di taluni orizzonti quando le VS della parte più superfiale sono note da misure MASW.

Il risultato è sintetizzato in Figura 2 dove in alto è riportato il Profilo verticale della VS e in basso sono riportate in verde le misure HVSR effettuate e in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009).

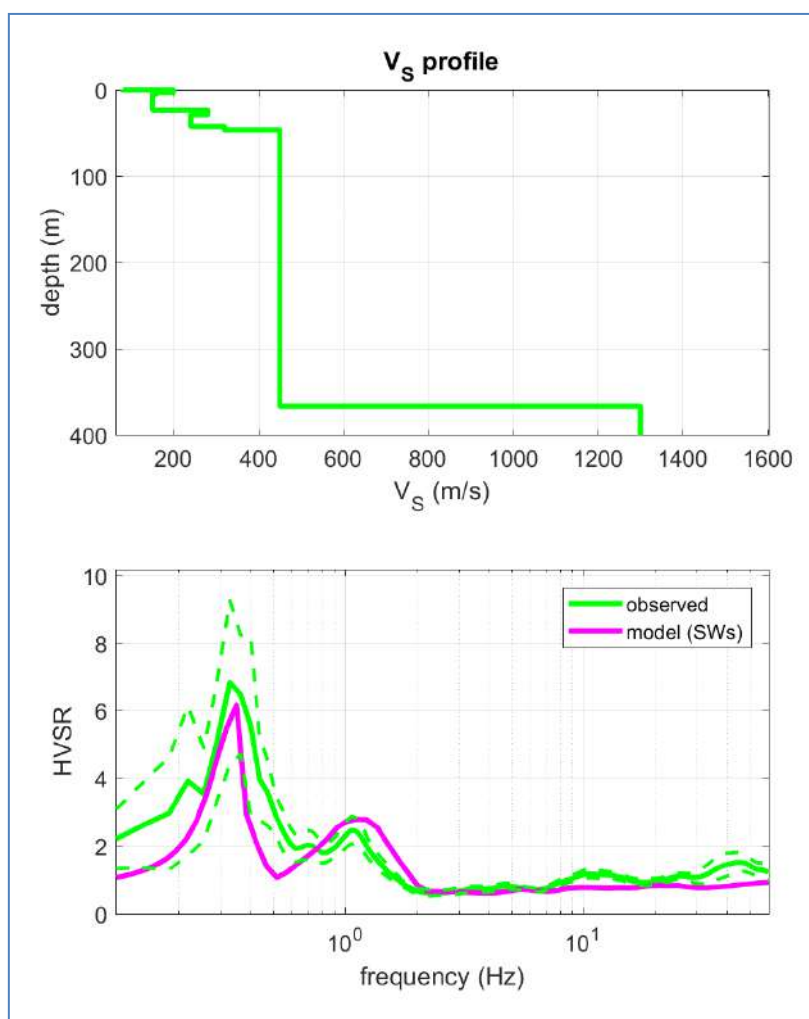


Figura 2: Elaborazione congiunta: Profilo verticale della Vs - Curva HVSR misurata (verde) e modellata (Viola)

Mean model

Vs (m/s): 80, 200, 160, 150, 280, 240, 320, 450, 1300

Thickness (m): 0.2, 3.0, 2.0, 18.0, 6.0, 13.0, 4.0, 320.0

Vs model (Vs30 & VsE: 172 172 m/s)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	80	0.2000	0.2000
2	200	3	3.2000
3	160	2	5.2000
4	150	18	23.2000
5	280	6	29.2000
6	240	13	42.2000
7	320	4	46.2000
8	450	320	366.20...
9	1300	0	0

Density (gr/cm3) (approximate values): 1.61 1.84 1.79 1.77 1.92 1.89 1.96 2.01 2.25

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 10 74 46 40 151 109 200 407 3805

Estimated static shear modulus (MPa) (approximate values): 0 0 0 0 0 0 0 0 1135

Analyzing Phase velocities

Analysis: Rayleigh Waves

Approximate values for Vp and Poisson

Vp (m/s): 158 417 333 313 584 500 667 842 2251

Poisson: 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.30 0.25

Vs30 and VsE (m/s): 172 172

San Giuliano Terme (PI),

24 aprile 2020

GAIA Servizi S.n.c.**Dott. Jacopo Martini**

GAIA Servizi S.n.c.
 di Massimiliano Vannozzi & C.
 Via Lenin 132 - 56017 S. Giuliano T. (PI)
 P. IVA 01667250508 N. REA PI - 145167