

## INDAGINI GEOGNOSTICHE Relazione Tecnica

**COMMITTENTE:** GEO CONSULTING RS

**OGGETTO:** "ESECUZIONE DI PROVE CPTu (Cone Penetration Test with Porewater Pressure) A SUPPORTO DELLA STESURA DEL PIANO PER L'UTILIZZO DEGLI ARENILI"

**CANTIERE:** Arenili Bagno Firenze, Principe di Piemonte, Piazza Mazzini, Bagno Flora - Viareggio (LU)



**RAPPORTO RELATIVO ALLA CAMPAGNA D'INDAGINE  
ESEGUITA MARTEDI' E MERCOLEDI' 13-14 LUGLIO 2021**

**BIERREGI s.r.l.**  
IL RESPONSABILE TECNICO  
Dott. Geol. Francesco Rossi

## INDICE

1. - Premessa.....	2
2. - Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu).....	2
2.1 - <i>Modalità di esecuzione, caratteristiche ed acquisizione dei dati</i> .....	3
2.2 - <i>Elaborazione dei dati</i> .....	4
3. - Conclusioni.....	8

Fig. 1 : COROGRAFIA (CTR Regione Toscana - Foglio 260120)

Fig. 2a : UBICAZIONE INDAGINE Bagno Firenze (CTR Regione Toscana - Foglio 20E41)

Fig. 2b : UBICAZIONE INDAGINE Principe di Piemonte (CTR Regione Toscana - Foglio 20E49)

Fig. 2c : UBICAZIONE INDAGINE Piazza Mazzini (CTR Regione Toscana - Foglio 20E58)

Fig. 2d : UBICAZIONE INDAGINE Bagno Flora (CTR Regione Toscana - Foglio 20E58)

## ALLEGATI

AII. A : PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON PIEZOCONO (CPTu)

BASIC RESULTS

AII. B : PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON PIEZOCONO (CPTu)

ESTIMATED PARAMETERS

AII. C : PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON PIEZOCONO (CPTu)

ELABORATI GRAFICI

AII. D : CERTIFICATI DI TARATURA DEL PIEZOCONO

## 1. - Premessa

Per incarico ricevuto dalla **GEO CONSULTING RS** e su richiesta del *Geol. Riccardo Vagli*, sono state eseguite prove penetrometriche statiche con Piezocono (CPTu) presso gli arenili del Bagno Firenze - Principe di Piemonte - Piazza Mazzini - Bagno Flora, a Viareggio (LU). Nelle aree sopra indicate sono state eseguite le seguenti indagini:

- n° 4 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu).

Lo scopo delle indagini geognostiche in sito è quello di fornire i dati necessari per la caratterizzazione geotecnica dei terreni indagati ad un livello di approfondimento consono alle necessità del progetto. La caratterizzazione geotecnica è intesa come l'insieme delle informazioni e dei dati ricavati dalle indagini svolte sul terreno, in modo tale da fornire un'adeguata e affidabile valutazione dei parametri geotecnici da impiegare nei calcoli di progetto. In sostanza, possiamo osservare che gli obiettivi primari delle indagini geotecniche sono:

- determinare la stratigrafia e la variabilità spaziale dei depositi in modo tale da poter tracciare i profili stratigrafici;
- determinare le principali caratteristiche fisiche e meccaniche medie di ciascun strato.

L'area e la relativa ubicazione delle indagini sono riportate rispettivamente in figura 1 (*Corografia*) e nelle figure 2a, 2b, 2c, 2d (*Ubicazione delle indagini*).

## 2. - Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)

Mediante le prove penetrometriche statiche con piezocono è possibile ottenere un maggior dettaglio nel rilievo stratigrafico e nella identificazione del tipo di terreno. Le variazioni della pressione nei pori colte dal sottile filtro poroso, non risentono infatti, al contrario di come avviene per la resistenza alla punta, della natura e consistenza degli strati anche prima che la punta li raggiunga. Lo spessore dei livelli più o meno permeabili viene quindi definito con notevole precisione dai valori della pressione nei pori, sempre che il filtro sia ben saturo (*Ferruccio Cestari - Prove geotecniche in sito 3° edizione 2009*).

Le prove sono state effettuate utilizzando un Penetrometro modello statico/dinamico TG-63/200 da 20 tonn di spinta della PAGANI GEOTECHNICAL EQUIPMENT S.R.L. di Piacenza, con maglio di 63,5 Kg.

Come accennato in premessa sono state eseguite n° 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu), di cui a seguire si riporta una tabella di sintesi delle specifiche tecniche:

Prova n°	Data di esecuzione	Profondità (m)	Quota (m s.l.m.)	Coordinate Gauss-Boaga	
				X	Y
CPTu 01	13/07/2021	15,96	+1,70	1598830,7321	4860072,4706
CPTu 02	13/07/2021	15,18	+2,30	1599152,2258	4859377,2952
CPTu 03	13/07/2021	15,18	+2,00	1599743,6150	4858190,2473
CPTu 04	14/07/2021	15,48	+2,00	1599872,4166	4857648,6933

Le quote delle prove sono state ricavate dai fogli C.T.R. (2000) della Regione Toscana. Considerato che non è stato possibile effettuare misure di falda all'interno dei perfori delle prove, vista la vicinanza del mare, la falda è stata considerata alla profondità del livello del mare rispetto alla quota altimetrica indicata nella tabella soprastante.

Per le caratteristiche tecniche del penetrometro utilizzato e la visione dei tabulati, diagrammi e grafici delle prove si rimanda ai relativi allegati (All.A-B-C-D).

### *2.1 - Modalità di esecuzione, caratteristiche ed acquisizione dei dati*

Le prove penetrometriche statiche con piezocono, ad ogni centimetro di profondità permettono di acquisire, durante il movimento continuo di spinta, le grandezze: qc (resistenza di punta) ed fs (attrito laterale). In aggiunta, mediante la collocazione di un filtro poroso posto subito dopo il cono ( $U_2$ ), viene misurata la sovrappressione dell'acqua nei pori presente nel terreno durante la penetrazione. La pressione dei pori misurata è costituita dalla somma della pressione idrostatica preesistente la penetrazione e delle pressioni nei pori positive o negative che sono dovute alla compressione e/o dilatazione del terreno a seguito dell'infissione del cono. La scelta della posizione del filtro immediatamente sopra la base del cono ( $U_2$ ) concorda con l'idea della maggioranza dei costruttori. Le prove CPTu rispetto alle prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPTm) presentano una migliore precisione di: lettura, frequenza di campionamento e definizione della litologia.

Durante l'esecuzione delle prove penetrometriche con piezocono i dati vengono acquisiti mediante il sistema d'acquisizione **TGAS07B** fornito dalla PAGANI GEOTECHNICAL EQUIPMENT S.R.L. di Piacenza. I dati vengono registrati istantaneamente sulla centralina integrata, collegata al penetrometro. Tale sistema è costituito dai seguenti componenti:

- ✓ TGAS07B → sistema d'acquisizione;
- ✓ ENCODER → misura la profondità e la velocità d'infissione;
- ✓ ALIMENTAZIONE → il sistema viene alimentato elettricamente dalla batteria del penetrometro, tramite una presa montata di serie.

Durante l'infissione vengono visualizzati, acquisiti e calcolati i seguenti parametri:

- ✓  $q_c$  (Cone tip stress) - resistenza alla punta;
- ✓  $f_s$  (Sleeve resistance) - resistenza unitaria di attrito laterale locale;
- ✓  $u_2$  (Porewater pressure) - pressione di poro;
- ✓ Inclinazione (tilt);
- ✓ Velocità;
- ✓ Distanza (scostamento dalla verticale).

Le caratteristiche del piezocono sono le seguenti (All.D - Certificati di taratura):

<b>Canali di misura:</b>		<b>Dimensioni:</b>	
Resistenza di punta ( $q_c$ ):	10; 50 o 100 MPa	Angolo di apertura cono:	60°
Attrito laterale ( $f_s$ ):	0,5 MPa	Diametro:	36 mm
Pressione nei pori (U):	2,5 MPa	Sezione di spinta:	10 cm <sup>2</sup>
Inclinazione:	0 - 40°	Superficie laterale:	150 cm <sup>2</sup>

La saturazione della punta è stata realizzata mediante l'utilizzo del grasso siliconico.

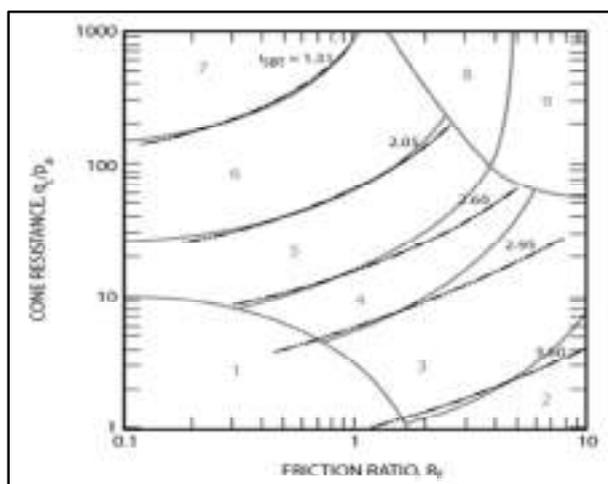
## 2.2 - Elaborazione dei dati

Il ruolo più importante delle prove CPTu (CPT) è quello di fornire profili stratigrafici dei suoli investigati e la loro classificazione. Tipicamente la resistenza totale alla punta corretta ( $q_t$ ) è alta nelle sabbie e bassa nelle argille, mentre il rapporto di attrito ( $R_f$ ) è basso nelle sabbie e alto nelle argille. La classificazione non pretende di fornire previsioni accurate del tipo di terreno in base alla distribuzione granulometrica, ma cerca di fornire una guida alle caratteristiche meccaniche del terreno. I dati forniti dalla prova CPTu forniscono il comportamento del suolo attraversato nelle immediate vicinanze della punta. Quindi al tipo di suolo investigato viene associato il suo comportamento durante la penetrazione.

Esistono numerosi metodi di classificazione di indagini CPTu tra cui i più noti sono quello di Begemann (1965), Schmertmann (1978) e Robertson (1986; 1990). Bisogna tenere presente che i primi due metodi utilizzano i parametri ottenuti da prove penetrometriche statiche meccaniche ( $q_c$  e  $f_s$ ), mentre l'ultimo utilizza i parametri ottenuti da prove CPTu ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$ ).

### **Robertson et al. 1986**

Uno tra i diagrammi più diffusi per la classificazione dei terreni investigati, che utilizza i tre parametri rilevati con il piezocono ( $q_t$ ,  $f_s$ ,  $u_2$ ), è quello SBT (Soil Behavior Type - Comportamento del tipo di terreno) suggerito da P. K. Robertson et al. (1986) mostrato in **Fig. A**, che prevede l'utilizzo sull'asse delle ordinate del rapporto  $q_c/p_a$  o  $q_t/p_a$  e sull'asse delle ordinate l'utilizzo di  $R_f$  (Rapporto d'attrito %) entrambi su scala logaritmica:



**Fig.A:** Robertson et al. 1986 (SBT plot)

dove i campi individuati nel grafico sono i seguenti:

1. Sensitive fine-grained (Argille sensitive);
2. Clay - Organic Soil (Terreni organici, torbe);
3. Clays: clay to silty clay (Argille - argille limose);
4. Silt mixtures: clayey silt & silty clay (Limi argillosi, argille limose);
5. Sand mixtures: silty sand to sandy silt (Sabbie limose, limi sabbiosi);
6. Sands: clean sands to silty sands (Sabbie limose, sabbie pulite);
7. Dense sand to gravelly sand (sabbie, sabbie ghiaiose);
8. Stiff sand to clayey sand (Sabbie cementate, sabbie argillose)\*;
9. Stiff fine-grained (Terreni a grana fine, molto rigidi)\*.

\*Nota: le classi 8 e 9 rappresentano terreni sovraconsolidati o cementati.

### **Robertson 1990**

Nella realtà bisogna però tenere conto delle tensioni geostatiche, totali ed efficaci, presenti alla profondità delle misure, in quanto potrebbe portare a degli errori nella valutazione sul tipo di terreno attraversato. Infatti, i valori di resistenza tendono ad aumentare con la profondità anche nel medesimo deposito, in quanto aumentano le tensioni che agiscono sull'elemento di terreno. Per tenere conto di questo, ovvero delle tensioni geostatiche verticali, occorre normalizzare i valori di  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  introducendo la pressione idrostatica ed il peso di volume dei vari strati. È stato così realizzato un grafico più affidabile rispetto al precedente (*P. K. Robertson et al. 1990 - SBTn*) nel quale vengono utilizzati i parametri normalizzati di  $q_t$ ,  $f_s$  e  $u_2$  in termini di pressioni effettive ottenendo valori normalizzati (**Fig. B**) di seguito riportati:

- **Q (o  $Q_{t1}$  o  $Q_t$ )** - Normalized Cone Resistance (Resistenza alla punta normalizzata):

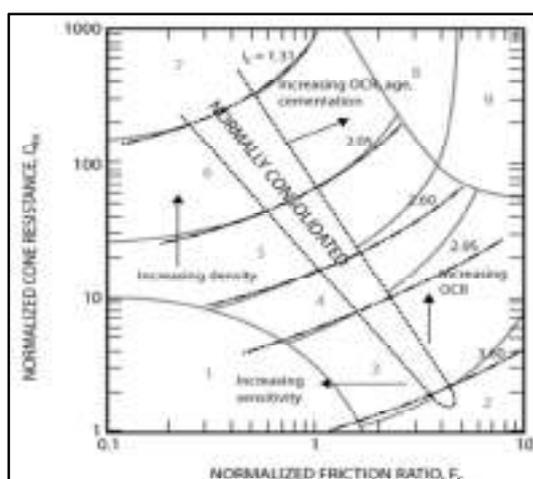
$$Q(\text{o } Q_{t1} \text{ o } Q_t) = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$

- **F (o  $F_r$ )** - Normalized Friction Ratio (Rapporto di attrito normalizzato):

$$F(\text{o } F_r) = \left( \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \right) \cdot 100\%$$

- **$B_q$**  - Normalized Pore Pressure Ratio (Rapporto della pressione nei pori normalizzato):

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_n}$$



**Fig. B:** Soil Behavior Type normalizzato - SBTn (Robertson 1990)

Per utilizzare il grafico sopra riportato, sulla base dei dati ricavati dalla prova, e determinare in quale classe viene identificato il tipo di terreno attraversato, viene definito il seguente indice che si basa, a differenza dell'indice  $I_{SBT}$  (non-normalizzato), sui parametri della prova normalizzati (tengono conto delle pressioni effettive):

$I_c$  - Soil Behaviour Type Index normalized (Indice di comportamento del terreno normalizzato):

$$I_c = I_{SBTn} = \sqrt{\left[ \left( 3,47 - \log(Q_{t1}) \right)^2 + \left( \log(F_r) + 1,22 \right)^2 \right]}$$

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left( \frac{\sigma'_{v2}}{p_a} \right) - 0,15 \quad n \leq 1 \text{ (Robertson 2009)}$$

$Q_{tn}$  - Normalized Cone Resistance - Resistenza alla punta normalizzata (n varia con  $I_c$ ):

$$Q_{tn} = \left[ \left( \frac{q_t - \sigma'_{v2}}{p_a} \right) \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v2}} \right)^n \right]$$

I dati acquisiti in campagna sono stati elaborati con il programma **CPeT-IT v.1.7.6.42 della Geologismiki Geotechnical Software**. Il software, a partire dai valori di  $q_c$  (cone resistance - resistenza alla punta),  $f_s$  (sleeve friction - attrito laterale) e delle sovrappressioni interstiziali ( $u_2$  - pore pressure), permette di ricavare i dettagli stratigrafici dei terreni attraversati e i parametri principali del terreno. Per la stratigrafia dei terreni viene riportato il grafico di P.K. Robertson et al. 1986 che utilizza i valori non-normalizzati ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$ ) e il grafico di P.K. Robertson et al. 1990 che utilizza i valori normalizzati ( $Q_t$ ,  $F_s$  e  $B_q$ ) in quanto quest'ultimo tiene conto delle tensioni geostatiche totali ed efficaci. Di seguito si riportano i dati di output ricavati dal software di elaborazione CPeT-IT:

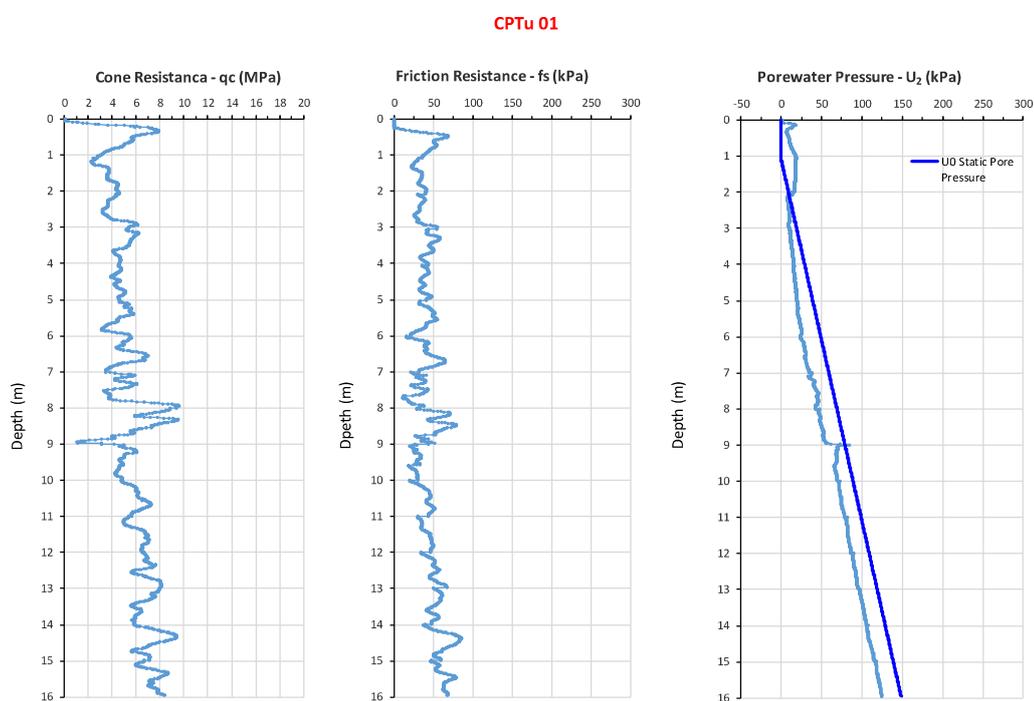
- ✓ grafici delle resistenze;
- ✓ grafici di Robertson (SBT plot e SBTn plot) e relativi grafici ausiliari che utilizzano in ascissa il parametro  $B_q$  (per poter prendere in considerazione anche pressioni di poro negative);
- ✓ grafici delle resistenze e classificazione SBT;
- ✓ grafici dei parametri normalizzati e classificazione SBTn;
- ✓ grafici dei parametri geomeccanici del terreno;
- ✓ formulario;
- ✓ basic output data (parametri di base per l'elaborazione);
- ✓ estimations (parametri geomeccanici ricavati).

Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del software reperibile all'indirizzo internet <http://www.geologismiki.gr/>.

### 3. - Conclusioni

Sulla base dei dati raccolti sul campo e le elaborazioni eseguite, è stato possibile evidenziare quanto segue:

- Le prove penetrometriche hanno permesso di ricostruire indirettamente la stratigrafia e di ricavare i parametri geomeccanici del terreno investigato;
- Le prove penetrometriche indicano una sostanziale omogeneità dal punto di vista litologico e dei valori registrati (Fig. C-D-E-F-G).



**Fig. C:** Prova CPTu 01 - Andamento dei parametri  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u_2$  registrati durante l'infissione del piezocono

CPTu 02

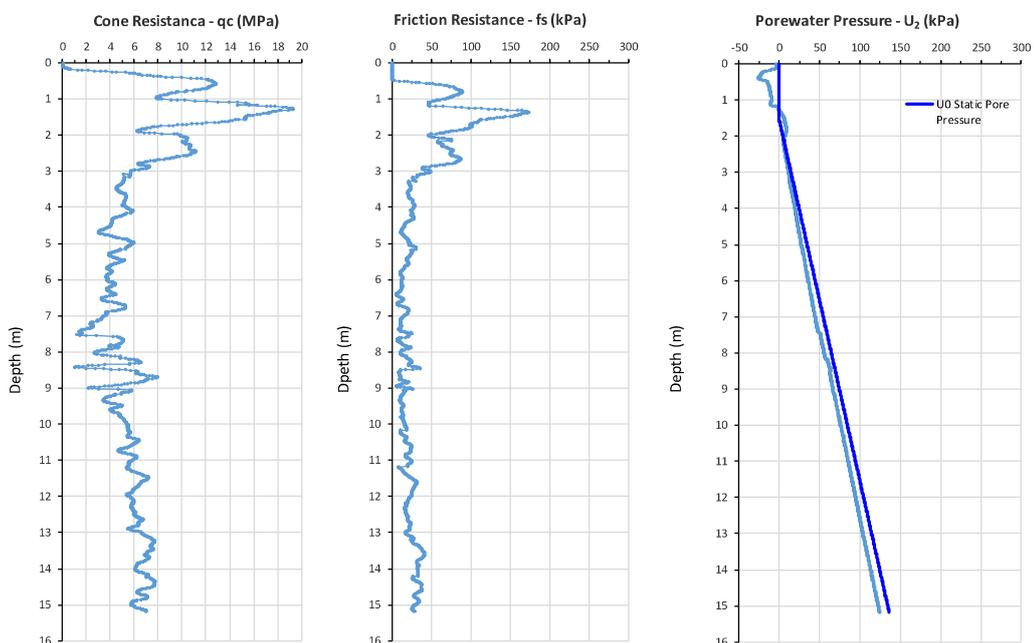


Fig. D: Prova CPTu 02 - Andamento dei parametri  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u_2$  registrati durante l'infissione del piezocono

CPTu 03

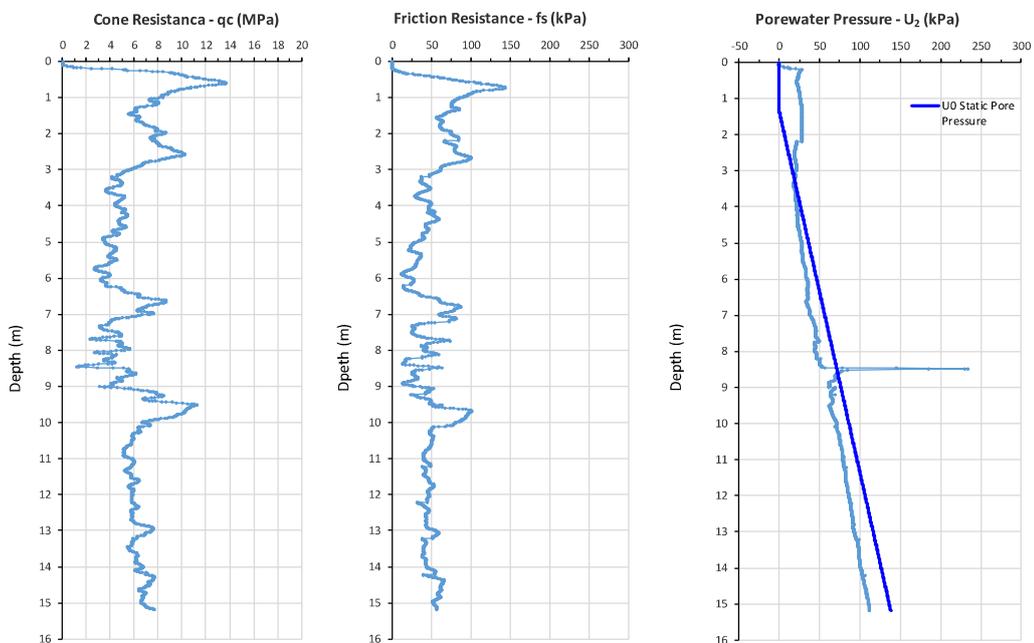
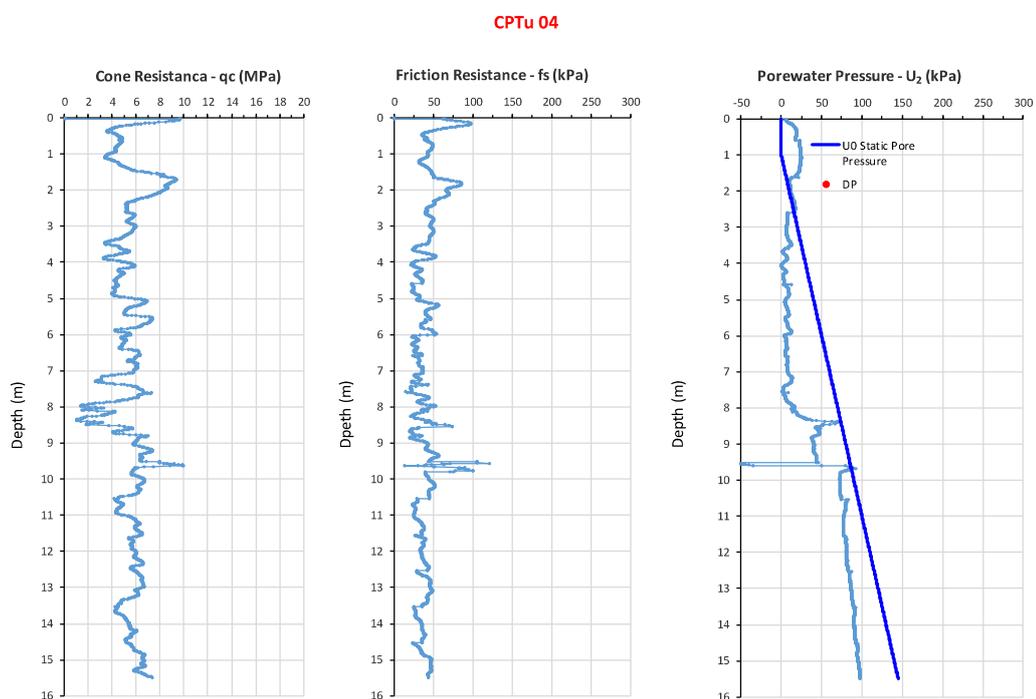
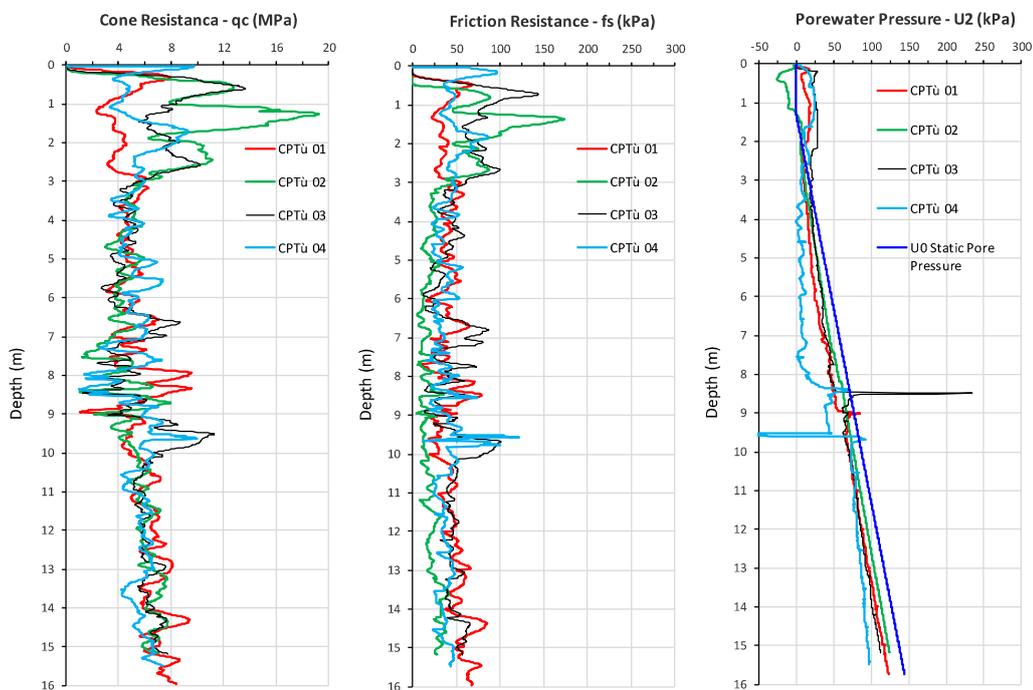


Fig. E: Prova CPTu 03 - Andamento dei parametri  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u_2$  registrati durante l'infissione del piezocono



**Fig. F:** Prova CPTu 04 - Andamento dei parametri  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u_2$  registrati durante l'infissione del piezocono



**Fig. G:** Raffronto dei parametri rilevati relativi alle cinque prove eseguite



**Postazione Prova CPTu 01**



**Postazione Prova CPTu 02**



**Postazione Prova CPTu 03**



**Postazione Prova CPTu 04**

Infine, nell'allegato D sono riportati i rapporti di taratura relativi ai sensori del piezocono, ovvero resistenza alla punta ( $q_c$ ), resistenza laterale ( $f_s$ ), pressione interstiziale ( $u_2$ ) e inclinazione (tilt).

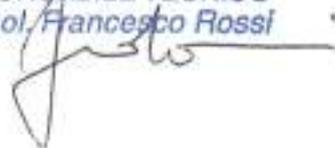
L'analisi specifica dei dati elaborati rimane comunque a carico del "geologo/ingegnere" responsabile delle indagini; le considerazioni sopra si devono intendere come mera interpretazione dei risultati ottenuti.

Per ulteriori dettagli sulle indagini svolte si rimanda ai relativi allegati (All.A - B - C - D).

*Lucca, Luglio 2021*

**BIERREGI srl**  
*Il Responsabile Tecnico*  
*Dott. Geol. Francesco Rossi*

**BIERREGI s.r.l.**  
IL RESPONSABILE TECNICO  
*Dott. Geol. Francesco Rossi*



# FIG.1 - COROGRAFIA

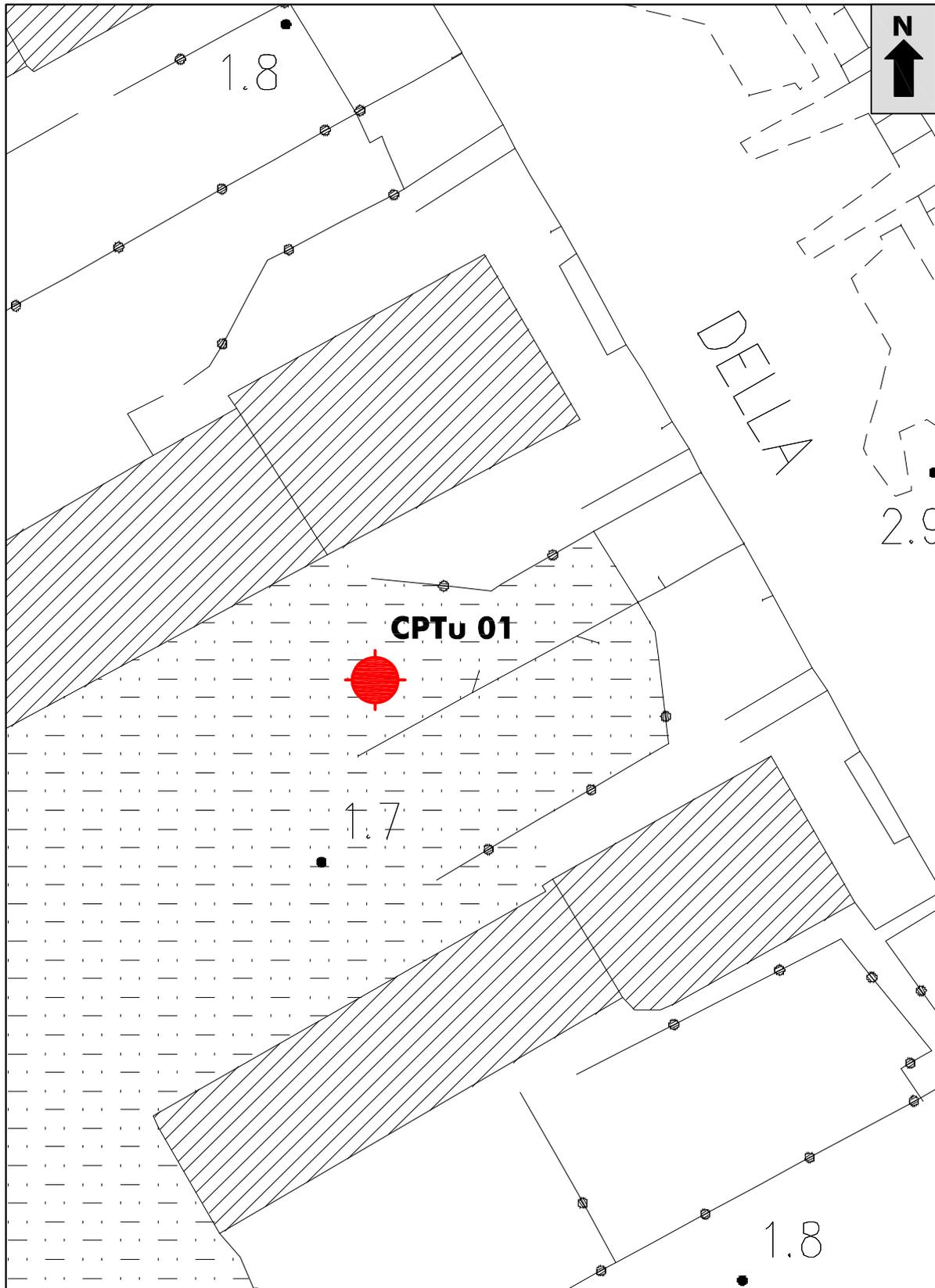
(C.T.R. Regione Toscana - Foglio 260110 - Scala 1:20'000)



 - Aree oggetto d'indagine

# FIG.2a - UBICAZIONE INDAGINE BAGNO FIRENZE

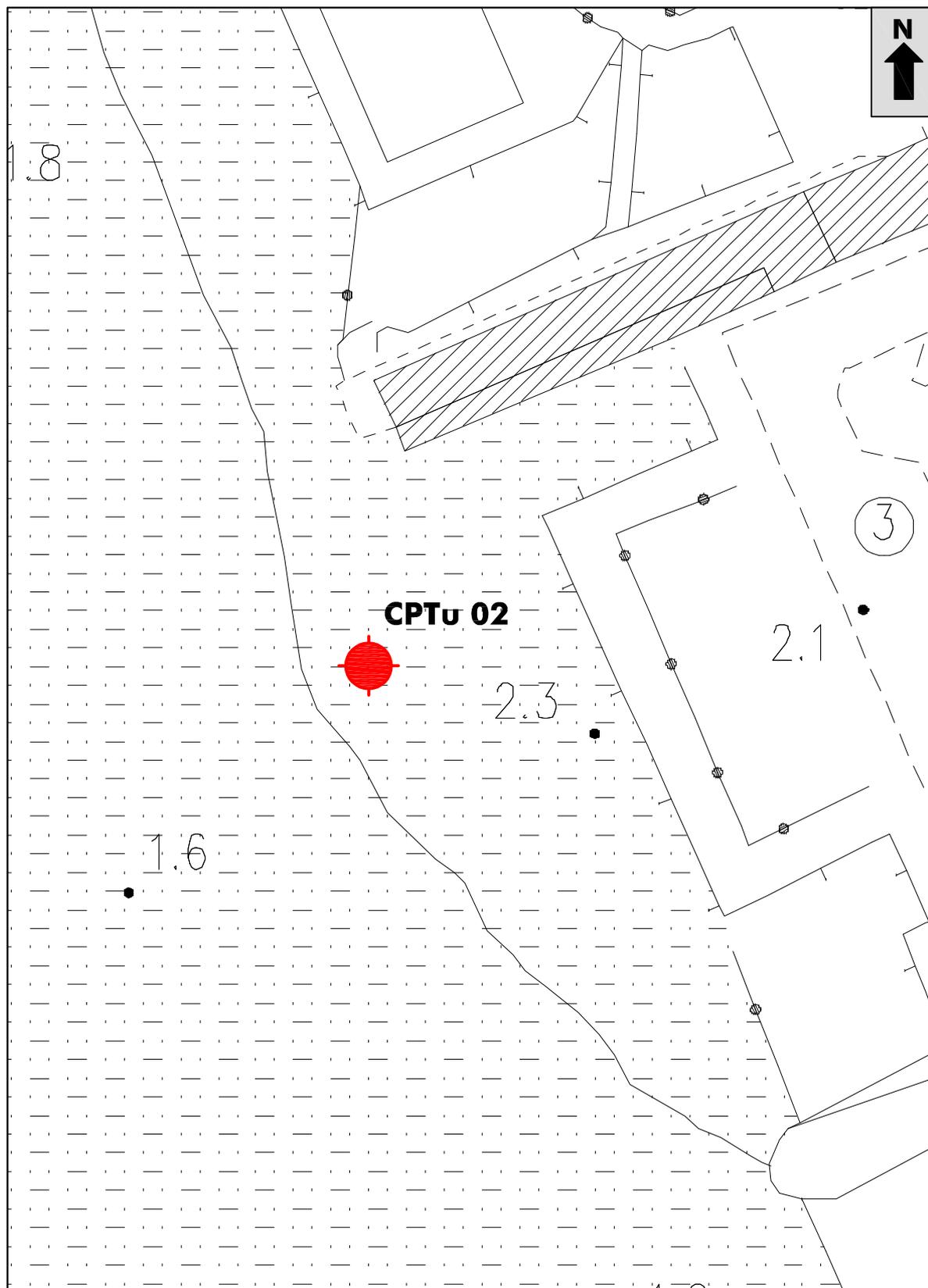
(C.T.R. Regione Toscana - Foglio 20E41 - Scala 1:500)



**CPTu-01**  
 - Prova statica  
con piezocono

# FIG.2b - UBICAZIONE INDAGINE PRINCIPE DI PIEMONTE

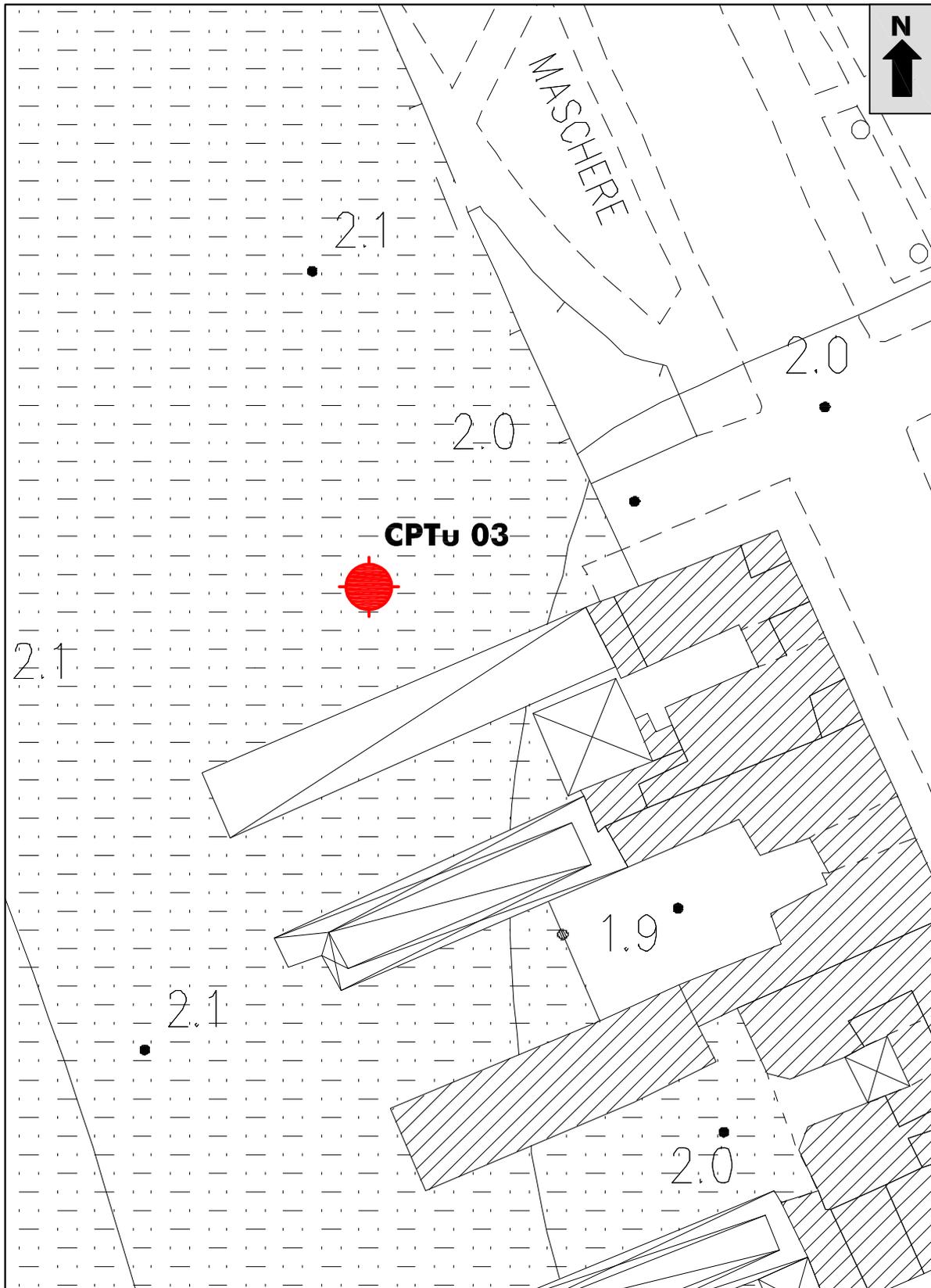
(C.T.R. Regione Toscana - Foglio 20E49 - Scala 1:500)



**CPTu-02**  
- Prova statica  
con piezocono

## FIG.2c - UBICAZIONE INDAGINE PIAZZA MAZZINI

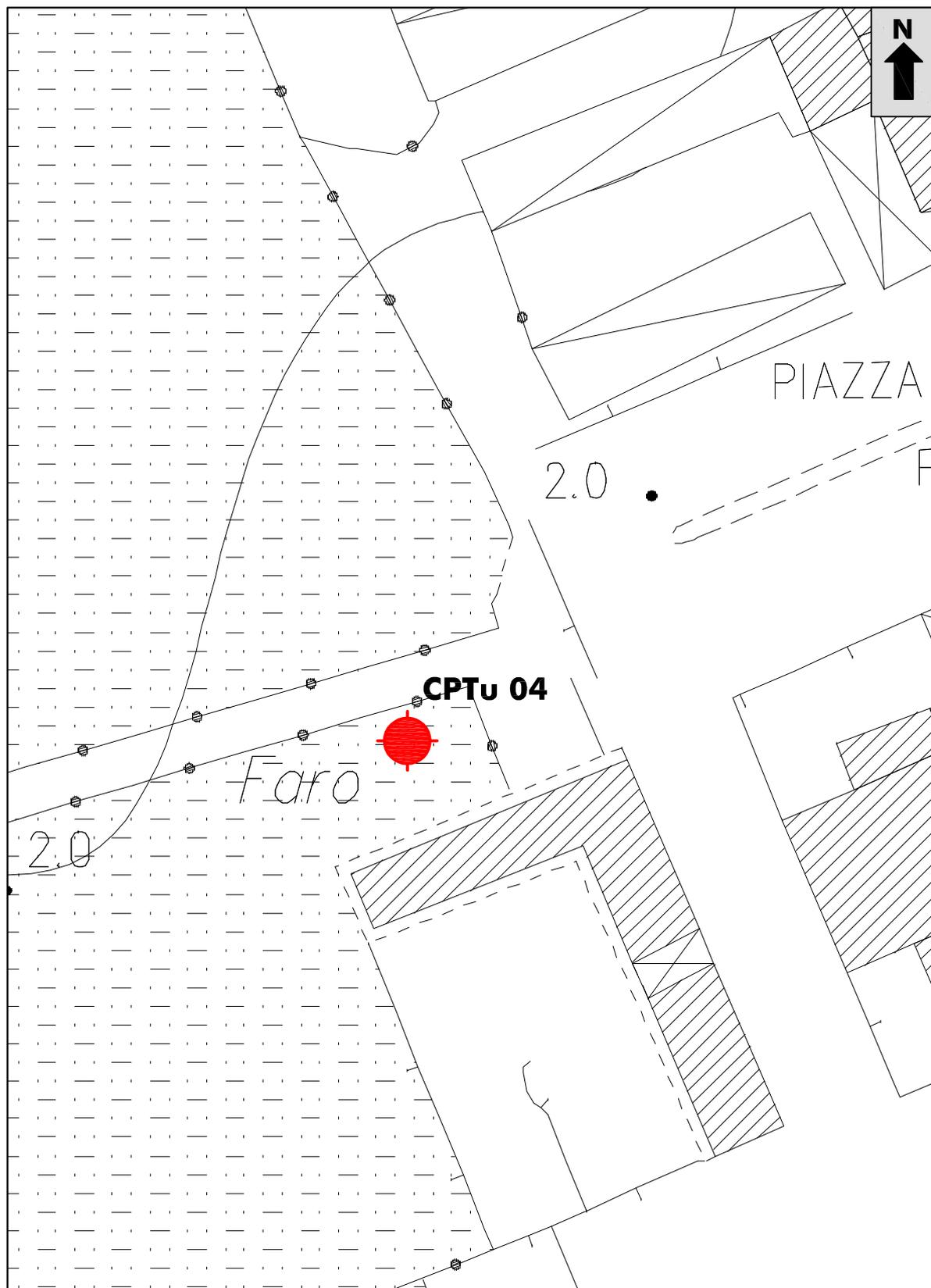
(C.T.R. Regione Toscana - Foglio 20E58 - Scala 1:500)



**CPTu-03**  
- Prova statica  
con piezocono

## FIG.2d - UBICAZIONE INDAGINE BAGNO FLORA

(C.T.R. Regione Toscana - Foglio 20E58 - Scala 1:500)



**CPTu-04**  
- Prova statica  
con piezocono