



**OGGETTO : PIANO CIMITERIALE**

**COMMITTENTE : COMUNE DI POGGIO RUSCO**

Piazza 1° Maggio – Poggio Rusco (MN)

**RELAZIONE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E  
SULLA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

ai sensi di

Allegato 1 del Regolamento Regionale n. 6 del 9 novembre 2004

D.M. 14.01.2008

Reg. Int.:  
Prt. 1241

Data : 30 Novembre 2012





Via G. Matteotti 178 46025 Poggio Rusco (MN)

tel.fax 0386.740284 cell. 333.4273452

e.mail [geostudiocalzolari@gmail.com](mailto:geostudiocalzolari@gmail.com)

## INDICE GENERALE

|  |         |
|--|---------|
| 1. PREMESSA .....  | Pag. 1  |
| 2. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA.....                                 | Pag. 2  |
| 2.1. Inquadramento climatico.....  | Pag. 3  |
| 2.2. Rete idrografica.....   | Pag. 4  |
| 2.3. Vincoli.....  | Pag. 5  |
| 3. PIANO DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE.....                                | Pag. 5  |
| 3.1. Prove penetrometriche statiche elettriche con Piezocono – CPTu..... | Pag. 7  |
| 3.2. Prova di dissipazione.....  | Pag. 7  |
| 3.3. Sondaggio geognostico.....  | Pag. 8  |
| 3.4. Trincea esplorativa e pozzetto per prova di permeabilità.....       | Pag. 8  |
| 4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....  | Pag. 8  |
| 4.1. Lineamenti geologici e geomorfologici.....                          | Pag. 8  |
| 4.2. Litologia di superficie.....  | Pag. 9  |
| 4.3. Successione stratigrafica.....                                      | Pag. 9  |
| 4.4. Analisi granulometrica del suolo.....                               | Pag. 12 |
| 5. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....                                      | Pag. 12 |
| 5.1. Vulnerabilità degli acquiferi.....                                  | Pag. 13 |
| 5.2. Assetto idrogeologico del sito – Livello di falda.....              | Pag. 15 |
| 5.3. Morfologia della superficie piezometrica.....                       | Pag. 16 |
| 6. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E GEOTECNICA.....                     | Pag. 17 |
| 6.1. Coefficiente di permeabilità dei terreni.....                       | Pag. 17 |
| 6.2. Modello geotecnico.....   | Pag. 20 |
| 7. VERIFICHE GEOTECNICHE.....  | Pag. 21 |
| 7.1. Parametri geotecnici di progetto.....                               | Pag. 22 |
| 7.2. Verifiche geotecniche in condizioni statiche (SLU).....             | Pag. 22 |
| 7.3. Verifiche geotecniche in condizioni dinamiche.....                  | Pag. 24 |
| 8. ANALISI SISMICA DEL SITO.....   | Pag. 25 |
| 8.1. Spettro di risposta sismica locale.....                             | Pag. 27 |
| 8.2. Modello sismico locale.....   | Pag. 28 |
| 8.3. Verifica alla liquefazione.....                                     | Pag. 29 |
| 9. CONCLUSIONI.....  | Pag. 31 |

## ALLEGATI

DIAGRAMMI DI PROVA

RAPPORTO DI ANALISI GRANULOMETRICA

## 1. PREMESSA

La Legge Regionale n. 22 del 18 novembre 2003 recante "Norme in materia di attività e servizi necroscopici, funebri e cimiteriali" dispone che "ogni comune, nell'ambito della pianificazione urbanistica e territoriale, prevede aree cimiteriali in grado di rispondere alla necessità di sepoltura, nell'arco dei venti anni successivi dall'adozione degli strumenti urbanistici" art. 9 comma 2).

Il Regolamento Regionale n. 6 del 9 novembre 2004 "Regolamento in materia di attività funebri e cimiteriali", in attuazione degli articoli 9, comma 5, e 10, comma 1, della legge regionale 18 novembre 2003, n. 22 stabilisce, che "ogni comune è tenuto a predisporre uno o più piani cimiteriali, per i cimiteri esistenti o da realizzare, al fine di rispondere alle necessità di sepoltura nell'arco dei vent'anni successivi all'approvazione dei piani stessi".

In ottemperanza alle disposizioni normative L'Amministrazione Comunale di Poggio Rusco (MN), in previsione dell'ampliamento e rivisitazione dell'area cimiteriale provvederà a dotarsi del piano cimiteriale.

Per la redazione del piano cimiteriale, così come riportato nell'Allegato 1 al Regolamento Regionale n. 6, è necessario produrre una relazione geologico-geotecnica ed idrogeologica finalizzata alla definizione dell'assetto geologico ed idrogeologico, e delle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati dalle opere strutturali e/o dalle inumazioni.

Relativamente alla componente geotecnica dello studio, riguardante la progettazione di opere edili, quali loculi, cappelle funerarie od altro, si fa riferimento al vigente D.M. 14 Gennaio 2008 "Norme Tecniche per le costruzioni", nonché alla normativa sismica vigente, Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 Aprile 2006, che inserisce il Comune di Poggio Rusco (MN) in Zona Sismica 3. Per tale ragione, in riferimento al paragrafo "2.4 Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento" del D.M. 14.01.2008, essendo il fabbricato in progetto classificabile come "Tipo di costruzione 2 – Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale" e di "Classe d'Uso I – Costruzioni con presenza occasionale di persone, edifici agricoli", le verifiche di sicurezza dovranno essere condotte agli Stati Limite, sia in condizioni statiche che dinamiche.

Al fine di produrre la caratterizzazione geologica, idrogeologica e geotecnica, nel presente documento verranno descritti i risultati delle indagini geologiche svolte in corrispondenza dei terreni posti a sud dell'odierna area cimiteriale ed all'interno della medesima.

La fase di indagine e di analisi dell'assetto geologico, idrogeologico e geotecnico del comparto di interesse, è stata condotta sulla base di prove in sito consistite nella esecuzione di n. 3 prove penetrometriche statiche con Piezocono (CPTu), eseguite in data 23 ottobre 2012, utilizzando sonda cingolata semovente PAGANI TG63-200 conforme alle norme contenute nel testo della Direttiva Machine, nonché alle Direttive Comunitarie, esecuzione di un pozzetto superficiale della profondità di 1,10 metri da p.c. mediante mezzo escavatore, con prelievo di campione di terreno per analisi granulometrica di laboratorio ed esecuzione di prova di permeabilità a carico variabile, messa in opera di n. 2 piezometri aventi diametro di 1/2" per una profondità di 3,20 metri da p.c., per il monitoraggio del livello di falda.

Sulla scorta delle indagini ed operazioni di situ, lo studio è stato così articolato:

- inquadramento geologico e geomorfologico del comparto;
- ricostruzione della successione stratigrafica del comparto;
- primo monitoraggio della soggiacenza e delle escursioni del livello della falda freatica, con posa di specifici piezometri, in relazione alla verifica della possibilità di predisporre fosse per inumazione (necessità di un franco falda-piano campagna non inferiore a 2,50 m);
- ricostruzione del modello idrogeologico locale;
- determinazione delle caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali mediante prova in pozzetto disperdente, e dei terreni profondi mediante prove di dissipazione con piezocono e correlazioni empiriche su dati penetrometrici;
- studio geotecnico dei terreni di fondazione del cimitero mediante esecuzione di prove penetrometriche statiche con piezocono.

Nella stesura del presente documento, le valutazioni effettuate fanno riferimento alla quota del piano di campagna.

## **2. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA**

Il comparto territoriale in studio è situato nella porzione orientale della Bassa Pianura Mantovana, a Sud del Fiume Po; l'area in oggetto è ubicata nel settore centrale del territorio comunale di Poggio Rusco e si localizza nella porzione meridionale del centro urbano, tra Via Carnevale e Via Palazzone.

L'altimetria media dell'area è di 12,5 metri sul livello del mare, con pendenza verso est sudest ed un assetto generale del territorio nei dintorni dell'area in argomento, a fisiografia sub-pianeggiante.

Le coordinate geografiche sono rilevabili nell'Elemento F8a3 "Poggio Rusco" Scala 1:10.000 della Carta Tecnica Regionale; il punto che localizza l'area in studio presenta queste coordinate nel Sistema UTM 32T: Lat. 4981865 mN Long. 666985 mE.

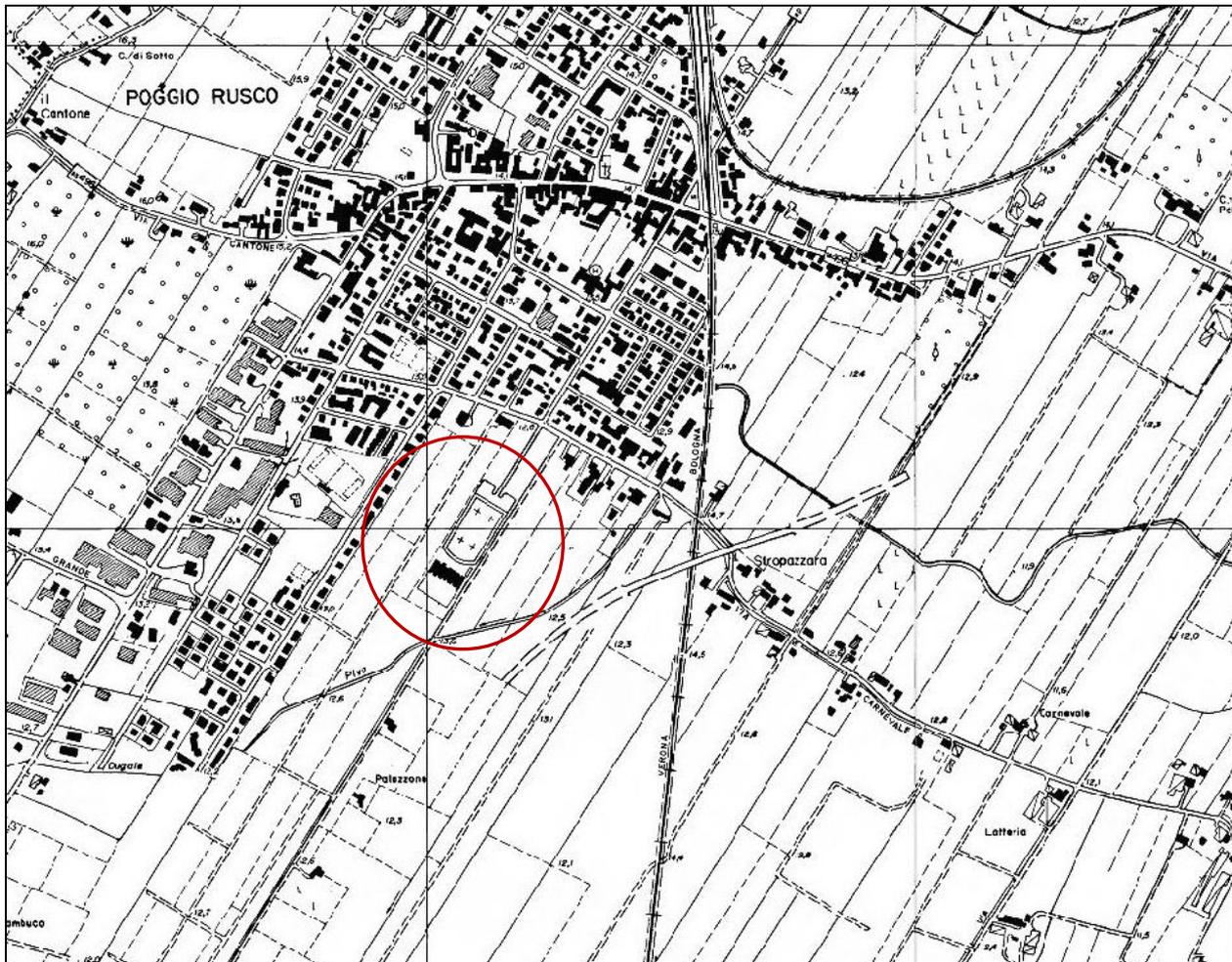


Fig. 1 - Inquadramento corografico - Stralcio C.T.R. Scala 1:10.000 Elemento F8a3 "Poggio Rusco"

In riferimento al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.), adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 1 in data 11.05.1999, il Comune di Poggio Rusco è classificato in zona a rischio totale 1 "rischio idraulico ed idrogeologico moderato", in cui la principale tipologia di dissesto componente il rischio è rappresentata dall'evento di esondazione.

Con particolare riferimento al "Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" (P.A.I.), come si evince nel Foglio 184 – Mirandola alla Scala 1:50.000 delle Tavole di delimitazione delle fasce fluviali, il comparto oggetto di studio è collocato al di fuori delle fasce A e B, mentre viene a ricadere all'interno della fascia C, come "Area di inondazione per piena catastrofica".

## 2.1 Inquadramento climatico

Dal punto di vista climatico il comparto in esame appartiene al tipo di clima padano; esso è caratterizzato da condizioni climatiche di tipo continentale, con inverni rigidi ed estati abbastanza calde, con elevata umidità, piogge piuttosto limitate (<700 mm/anno), relativamente ben distribuite durante l'anno, ventosità ridotta e frequenti episodi temporaleschi.

Per l'individuazione delle principali caratteristiche climatiche dell'area oggetto di studio sono stati utilizzati i dati termopluviometrici della stazione di Revere, per l'ampia disponibilità di dati; i dati medi mensili riportati in tabella sono stati rilevati nel volume pubblicato dall'E.R.S.A.L. e Provincia di Mantova nel Progetto Carta Pedologica – "I suoli dell'Oltrepo mantovano – Destra Secchia",

(1991).

La precipitazione media annuale, stimata per il trentennio 1965-1995, è risultata di 676 mm; le precipitazioni hanno maggiori intensità nei mesi di Maggio, Ottobre e Novembre; i valori minimi si registrano nei mesi di Febbraio e Marzo; in Luglio si registra il valore più alto di evapotraspirazione potenziale (156,1 mm) che determina condizioni più o meno prolungate di indisponibilità di acqua per le piante.

La temperatura media annua dell'aria è di 13,3 °C, con il minimo in Gennaio (1,3° C) ed un massimo nel mese di Luglio (24,7°C).

Dal punto di vista climatico l'area rientra all'interno di una regione climatica uniforme di tipo "da sub-umido a sub-arido", con modesta eccedenza idrica nelle stagioni autunno-inverno.

Tra le condizioni climatiche più rilevanti ai fini della valutazione della potenzialità di ricarica idrica superficiale degli acquiferi vanno considerate innanzitutto la temperatura media annua e la piovosità.

Il primo parametro permette di determinare la quantità di acque meteoriche che viene diffusa per evapotraspirazione, inteso come il volume d'acqua consumato nell'unità di tempo dalla attività vegetale di traspirazione e della evapotraspirazione del suolo, e, che quindi, non concorre all'alimentazione diretta dei livelli acquiferi. Il valore precedentemente attribuito a tale zona è di 13,3° C; la piovosità media annua può essere assunta in ragione di 676 mm. L'evapotraspirazione media, calcolata con la formula di TURC (1954), qui di seguito riportata, risulta pari a 516,0 mm.

$$E.T.P. = \frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}}$$

dove : ETP = evapotraspirazione media annua in mm

P = piovosità media annua in mm (676 mm)

L = 300 + 25 T + 0,05 T<sup>3</sup>

T = Temperatura media annua (13,3° C)

Pertanto, la parte di pioggia efficace all'alimentazione delle falde e dei corsi d'acqua, stimata nell'arco di un anno, risulta pari a 160 mm.

In riferimento ai singoli mesi, gli effetti della evapotraspirazione potenziale sono massimi da maggio a settembre, con massimo a luglio; combinando tali osservazioni con la distribuzione della precipitazione si ottiene una situazione caratterizzata da deficit del bilancio idrologico massimo nel periodo da giugno ad agosto.

## 2.2. Rete idrografica

Il territorio del comune di Poggio Rusco è interessato da un reticolo idrografico piuttosto semplice. Gli elementi idrografici che si rinvergono sul territorio sono identificabili come secondari, e sono rappresentati dai collettori principali della rete di alimentazione e di drenaggio dei suoli. Tale rete

secondaria è costituita da una serie di Canali e Dugali che presentano un orientamento generale da ovest verso est, e da nordovest verso sudest, con direzione di deflusso delle acque verso oriente.

Il loro andamento è pressoché parallelo al corso del Po ed oltre a fungere da raccoglitori delle acque territoriali, fungono anche da collettori per le zone poste al confine occidentale.

I corsi d'acqua riconosciuti sulla base topografica che possono interessare l'area in esame sono:

- il Dugale Piva che scorre a sudest dell'area cimiteriale con orientamento sudovest – nordest, e funge sostanzialmente da drenaggio del comporta dell'area urbana meridionale del capoluogo

### **2.3. Vincoli**

A completamento si è considerata l'eventuale esistenza dei vincoli di tipo geologico ambientale che potrebbero interessare le tre aree cimiteriali.

Per tale scopo sono stati consultati i seguenti documenti:

- PTCP della Provincia di Varese;
- il P.R.G. vigente del Comune di Poggio Rusco
- Il sistema informativo beni ambientali della Regione Lombardia – SIBA.

dalla cui consultazione risulta che l'area sulla quale sono ubicati i tre cimiteri in oggetto non sono soggetti a vincoli ambientali ed urbanistico - territoriali ed in particolare a vincoli di tipo paesistico.

## **3. PIANO DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE**

La campagna di indagine geognostica è stata predisposta con lo scopo di definire l'assetto stratigrafico, la natura e granulometria dei terreni, di determinare il livello della falda freatica nel sito, di definire i valori del coefficiente di permeabilità dei sedimenti fini e la caratterizzazione geotecnica dei terreni presenti al disotto del piano di fondazione.

Al fine di ottenere quanto sopra, è stata predisposta la campagna di indagine geognostica consistita nella esecuzione di:

- n. 3 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu), la cui profondità d'indagine è stata tra 15,80 ÷ 16,10 metri
- n. 4 prove di dissipazione per la determinazione del coefficiente di permeabilità, a differenti profondità
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo per una profondità di -3,20 metri da p.c.
- n. 1 trincea esplorativa con realizzazione di pozzetto quadrato per esecuzione di prova di permeabilità in superficie

L'ubicazione delle indagini è riportata nella figura seguente, ed è stata approntata in relazione alle previsioni del piano cimiteriale.

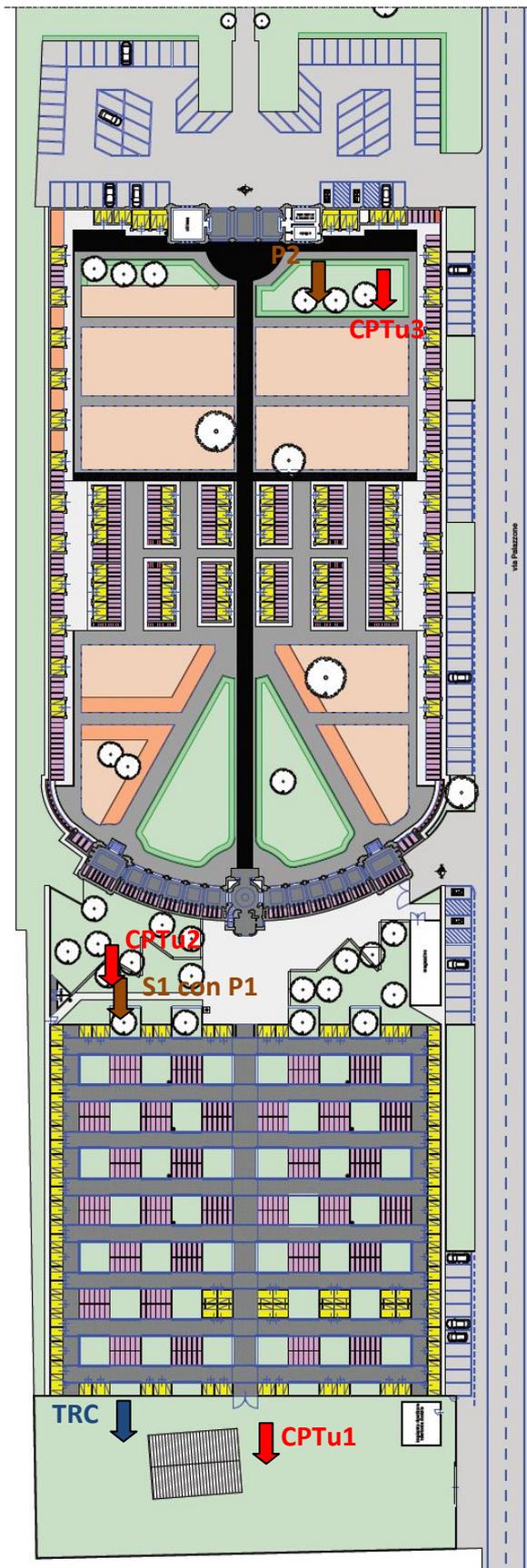


Fig. 3 - Ubicazione indagini geognostiche : CPTu – prova penetrometrica statica con piezocono; TRC – trincea esplorativa con pozzetto; S – sondaggio; P - piezometro

### 3.1. Prove penetrometriche statiche elettriche con piezocono - CPTu

La prova penetrometrica è stata realizzata utilizzando un penetrometro statico Pagani, con spinta massima nominale di 20 ton, mediante infissione nel terreno di una punta conica strumentata con sensori elettrici che collegata tramite cavo ad un PC, trasmette in superficie i segnali relativi ai seguenti parametri:

- Resistenza alla punta ( $q_c$  – cone resistance): forza assiale misurata ( $Q_c$ ) agente sul cono, divisa per l'area totale della base del cono ( $A_c$ )
- Attrito laterale locale unitario ( $f_s$  – local unit side friction): forza di attrito misurata ( $Q_s$ ) agente sul manicotto di attrito (sleeve), divisa per l'area laterale del manicotto stesso
- Pressione dei pori in penetrazione ( $u$  – penetration pore pressure): pressione nei pori misurata durante la penetrazione in corrispondenza della parte cilindrica del cono, appena sopra la parte conica del cono
- Pressione dei pori generata ( $\Delta u = u - u_0$  - generated pore pressure): dove  $u_0$  è la pressione nei pori esistente nel terreno alla profondità del cono, prima della prova di penetrazione
- Resistenza alla punta totale corretta ( $q_t$  – total corrected cone resistance):  $q_t = q_c + u(1-a)$

La punta elettrica utilizzata Mh297 presenta le seguenti caratteristiche: diametro della punta  $\emptyset = 36,0$  mm, angolo di apertura  $60^\circ$ , area della punta  $1000 \text{ mm}^2$ ; manicotto laterale di frizione con diametro  $\emptyset = 36,0$  mm, lunghezza  $133,7$  mm, area laterale  $15000 \text{ mm}^2$ .

L'infissione della punta è avvenuta ad una velocità costante di  $1,5 \text{ cm/sec}$  e i dati sono stati registrati per ogni  $1 \text{ cm}$  di avanzamento.

La registrazione dei valori delle resistenze di punta, dell'attrito laterale e delle sovrappressioni interstiziali viene gestita automaticamente dal sistema di acquisizione dati TGSW07 fornito dalla ditta PAGANI Geotechnical Equipment. I dati delle letture, registrati in tempo reale, vengono visualizzati sullo schermo del sistema di acquisizione con la possibilità di verificare istantaneamente il comportamento della strumentazione di misura.

### 3.2. Prova di dissipazione

La prova di dissipazione è stata effettuata durante l'esecuzione della prova penetrometrica statica con Piezocono, arrestando l'avanzamento ad una profondità prestabilita o valutata durante l'infissione della punta strumentata. Il Piezocono utilizzato è dotato di un setto poroso (pietra porosa) posto immediatamente a ridosso della punta ( $U_2$ ), saturato in olio siliconico, che consente di rilevare le pressioni dei fluidi nei pori dei terreni attraversati.

La prova di dissipazione consiste nella misura delle pressioni interstiziali, la cui velocità di dissipazione dipende dal coefficiente di consolidazione del terreno attorno alla punta il quale, a sua volta, dipende dalla compressibilità e dalla permeabilità del terreno stesso.

La prova viene eseguita in automatico dal sistema di acquisizione TGWS07, una volta interrotto l'avanzamento della punta strumentata e dato il comando di rilevamento della pressione interstiziale massima ( $U_{max}$ ) e del suo decadimento in funzione del tempo. Con lo scorrere del tempo le pressioni interstiziali tendono a dissipare sino a giungere al valore della pressione

idrostatica (U0) esistente alla profondità di esecuzione della prova.

### **3.3. Sondaggio geognostico**

Il sondaggio è stato realizzato mediante attrezzatura di perforazione di tipo Pagani TG 63-200, munita di testa di rotazione e degli accessori idonei ad espletare correttamente l'indagine prevista.

Il sondaggio, spinto alla profondità di 3,20 metri da piano campagna e denominato S1, è stato realizzato con perforazione continua a distruzione di nucleo, mediante l'utilizzo di coclea e batteria d'aste elicoidali ( $\varnothing$  100 mm), con intervalli di carotaggio di 80 cm ed estrazione del campione per la successiva fase di analisi visiva e manuale, che ha permesso di determinare le caratteristiche litologiche e granulometriche dei terreni campionati.

Per il sondaggio eseguito è stata compilata una scheda stratigrafica contenente tutti gli elementi riscontrati durante la fase di perforazione e analisi.

### **3.4. Trincea esplorativa e pozzetto per prova di permeabilità**

La trincea esplorativa è stata eseguita con mezzo meccanico dotato di pala escavatrice; la trincea della profondità di circa 1,10 metri ha permesso di campionare una quantità di terreno sufficiente da sottoporre ad analisi di laboratorio per la definizione della natura litologica e della granulometria.

Contestualmente alla trincea si è realizzato il pozzetto superficiale per la realizzazione della prova di permeabilità superficiale. Siccome la falda è risultata essere piuttosto profonda, si è optato di realizzare un pozzetto ad una profondità che potesse rappresentare verosimilmente la profondità di inumazione.

Il pozzetto di prova è stato realizzato ad una profondità di 1,20 metri per le dimensioni B x L = 75 x 75 cm. La prova è stata eseguita riempiendo d'acqua il pozzetto per un'altezza di 20 cm e successivamente si è misurata la velocità di abbassamento del livello.

## **4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO**

### **4.1. Lineamenti geologici e geomorfologici**

Il comparto si sviluppa nella fascia centrale della Pianura Padana, in un ambiente di pianure alluvionali inondabili con dinamica prevalentemente deposizionale, costituite da depositi recenti o attuali (olocene recente ed attuale).

L'azione morfogenetica dominante, è imputabile all'evoluzione del reticolo idrografico di superficie, ed in particolare al Fiume Po ed in minor misura al Fiume Secchia; il Fiume Poche ha interessato l'area durante la sua migrazione verso nord nel Quaternario continentale. Attualmente la morfogenesi prevalente è da relazionarsi all'attività antropica, in particolar modo agli interventi edilizi ed infrastrutturali ed alle attività agricole di rimodellazione della superficie topografica.

Le caratteristiche evolutive concordano con le strutture geomorfologiche osservate nel territorio comunale di Poggio Rusco e dei territori circostanti.

Limitatamente al settore in studio, l'assetto topografico presenta una conformazione pianeggiante priva di ondulazioni evidenti, con leggera degradazione verso le aree delle Valli Mirandolesi, in direzione sud e sudest; dall'osservazioni di campagna e dai dati geotematici del S.I.T. della Regione Lombardia si deduce che il sito sia connesso ad ambienti di valle deposizionale distale dai canali attivi e/o di recente abbandono dei principali corsi d'acqua. L'area in esame rientra nell'Unità di Paesaggio VA3 delle superfici modali subpianeggianti della piana alluvionale a meandri e di tracimazione, facente transizione tra le aree più rilevate di dossi e quelle più depresse di valle, legate a processi di tracimazione (overbank) e di rotta (crevasse), imputabili prevalentemente all'azione alluvionale del Fiume Po.

Attualmente, nei limiti del territorio, non si osservano processi naturali di tipo alluvionale ancora attivi, poiché i corsi d'acqua che hanno contribuito all'evoluzione geomorfologica del territorio, risultano compresi all'interno di arginature di origine antropica che ne impediscono la naturale esondazione dall'alveo. L'area, dal punto di vista dell'evoluzione geomorfologica, attualmente si presenta conservativa e quiescente.

## **4.2. Litologia di superficie**

Al fine di definire l'assetto litologico di superficie si è fatto riferimento alle indagini eseguite in sito ed alla Carta Litologica del Sistema Cartografico informatizzato della Regione Lombardia.

Dai dati di campagna si è potuto constatare la presenza in superficie di terreni a tessitura fine, di natura prevalentemente argilloso limosa e limoso argillosa, nei primi 2,0 metri da p.c. e di sedimenti prevalentemente argillosi sino a 3,0 metri., nella porzione dell'area cimiteriale posta a sud, mentre nella porzione a nord nei primi 2,0 metri superficiali si riscontrano termini limoso sabbiosi intercalati ai sedimenti argilloso limosi. Tali dati concordano con la cartografia tematica sia per quanto concerne la Carta litologica regionale, che indica Argille con sabbia nella porzione centro-sud dell'area cimiteriale e limi sabbiosi nella porzione a nord, che in parte per la Carta Pedologica nella quale viene segnalato che il sito rientra nell'Unità Pedologica CNO1 che presenta morfologia a lievi ondulazioni poste alla quota media di 13 m s.l.m. e con pendenza media pari a 0.7%, il cui assetto tessiturale è dato da depositi alluvionali calcarei disposti in strati alterni e a tessitura diversa (medio-fine su media su argilloso-limosa), mentre il substrato è formato principalmente da limi con sabbia calcarei, ma ciò discorderebbe in parte con quanto desunto della indagini di situ, in quanto coinciderebbe con i terreni della porzione nord, mentre per la porzione sud meglio si accordano i suoli dell'Unità Pedologica FAL 1 che presenta superfici con morfologia pianeggiante poste alla quota media di 13 m. s.l.m. e con pendenza media di 0.4%, il cui assetto tessiturale è costituito da depositi alluvionali calcarei limosi e argillosi mentre il substrato è formato principalmente da argille calcaree.

## **4.3. Successione stratigrafica**

Oltre alla descrizione della litologia di superficie viene fornita la successione stratigrafica dell'area, desunta dalle prove penetrometriche CPTu; l'interpretazione stratigrafica della sezione di sottosuolo investigata è stata condotta facendo riferimento al parametro "SBT" quale indice del Tipo di Comportamento del Suolo (Soil Behaviour Type, SBT, Robertson et al. 1986). Questo

parametro è stato correlato ad un Indice di comportamento "Ic" da Jefferies & Davies (1993) in funzione dei valori normalizzati QT, FR e Bq, che dipendono della resistenza alla punta qt, dell'attrito laterale fs e delle pressioni di poro u<sub>2</sub>, normalizzate rispetto alle tensioni geostatiche totali ed efficaci. Robertson (1990) definisce 12 zone di appartenenza del litotipo in una carta di classificazione, attualmente ridotte a 9, in relazione al valore di Ic.

Nel presente lavoro per l'interpretazione litologica, ai fini della ricostruzione della stratigrafia del sito, si fa riferimento alla metodologia proposta da Robertson (2009) e Robertson (2010), assumendo i limiti tra i litotipi in funzione di Ic, come proposti da Robertson (1990) che ne ha correlato il contenuto di fine.

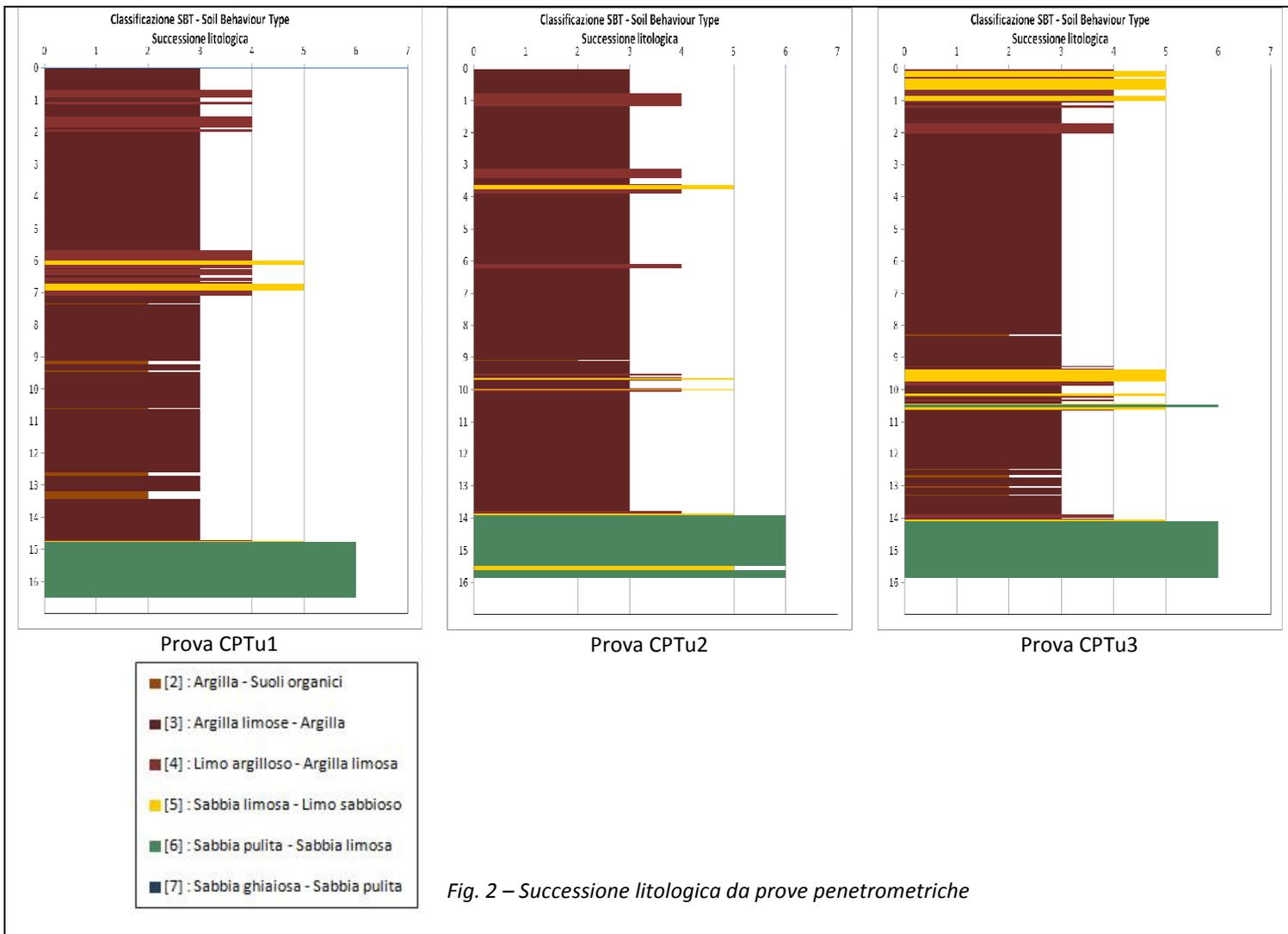
In base alle scelte interpretative fatte, il Modello geologico (Fig. 2) identificativo del sottosuolo indagato presenta una parziale omogeneità, in quanto si evidenzia sostanzialmente che vi è un intervallo superficiale presente sino alla profondità di circa 13,90 ÷ 14,70 metri costituito prevalentemente da sedimenti a tessitura fine, quali argilla, argilla limosa e limo argilloso, con intercalazioni di strati di spessore medio – sottile di limo sabbioso ed argilla organica. Al banco di sedimenti fini seguono sedimenti a tessitura media e medio-fine di natura sabbiosa e sabbioso limosa.

Nel dettaglio si riscontra una differenza nell'intervallo superficiale entro il primo metro, tra le prove 1-2 e la prova 3, in quanto nelle prime due si riscontrano sedimenti argilloso limosi e limoso argillosi, come si è potuto constatare anche dallo scavo eseguito con pala meccanica sino alla profondità di circa 1,20 metri nell'area della prova 1, mentre nella prova 3, dalle elaborazioni dei dati emergono sedimenti con prevalente componente limoso sabbiosa. Tale diversità pare confermare i dati bibliografici che indicano una unità pedologica a componente limoso sabbiosa nella porzione nord ed una unità pedologica a componente argilloso limosa nella porzione sud.

Ulteriori indicazioni sulla stratigrafia superficiale si sono ottenute dall'esecuzione del sondaggio S1 per la messa in opera del piezometro P1. Dall'analisi tattile e visiva eseguita in fase di esecuzione, la successione litologica pare confermare i dati già indicati. Infatti, sino alla profondità di 3,40 metri da p.c., si trovano prevalentemente sedimenti a tessitura fine di natura argillosa, argilloso limosa e limoso argillosa, con intercalazioni di strati di spessore medio a tessitura moderatamente fine di natura limosa e limoso sabbiosa.

Nel dettaglio si è riscontrato il seguente profilo litologico:

- da 0,00 m a -1,50 m : Argilla marrone e Argilla nocciola-grigio calcarea
- da -1,50 m a -2,20 m : Limo argilloso e Argilla limosa debolmente sabbiosi, nocciola-grigio
- da -2,20 m a -2,30 m : Limo sabbioso argilloso nocciola
- da -2,30 m a -2,60 m : Limo argilloso sabbioso nocciola
- da -2,60 m a -2,90 m : Limo sabbioso nocciola
- da -2,90 m a -3,40 m : Limo argilloso nocciola-grigio



Nella tabella sottostante si riporta il modello geologico di riferimento del sito.

**Tabella 1 - Successione litologica del sito**

| Unità litologica | Profondità strato (in metri da p.c.) |      | Descrizione Unità  |
|------------------|--------------------------------------|------|--|
|                  | Testa                                | Base |  |
| A1<br>Cptu 1 e 2 | 0,00                                 | 1,20 | <b>Argilla limosa, Argilla e Limo argilloso;</b> strato spesso costituito da sedimenti a tessitura fine di natura argilloso limosa e limoso argilloso  |
| A2<br>Cptu 3     | 0,00                                 | 1,20 | <b>Limo sabbioso e Limo argilloso;</b> strato spesso costituito da sedimenti a tessitura moderatamente fine di natura limosa   |
| B                | 1,20                                 | 5,70 | <b>Argilla, Argilla limosa e Limo argilloso;</b> è uno strato molto spesso costituito in prevalenza da sedimenti a tessitura fine di natura argillosa, con intercalazioni di strati sottili di limo      |
| C1<br>Cptu 1     | 5,70                                 | 7,10 | <b>Limo argilloso e Limo sabbioso;</b> è uno strato spesso costituito da sedimenti a tessitura moderatamente fine di natura limosa, in alternanza di strati medio sottili in prevalenza limoso argillosi |
| C2<br>Cptu 2 e 3 | 5,70                                 | 7,10 | <b>Argilla;</b> è uno strato spesso costituito da sedimenti a tessitura fine di natura argillosa   |

|                  |       |       |  |
|------------------|-------|-------|--|
| D                | 7,10  | 9,40  | <b><u>Argilla</u></b> ; è uno strato spesso costituito da sedimenti a tessitura fine di natura argillosa   |
| E1<br>Cptu 1 e 2 | 9,40  | 10,60 | <b><u>Argilla limosa e Argilla</u></b> ; è uno strato spesso costituito da sedimenti a tessitura fine di natura argillosa, con intercalazioni di strati sottili argilloso limosi                           |
| E2<br>Cptu 3     | 9,40  | 10,60 | <b><u>Limo argilloso e Sabbia limosa</u></b> ; è uno strato spesso costituito da sedimenti a tessitura moderatamente fine di natura limoso argillosa, con intercalazioni di strati sottili sabbioso limosi |
| F                | 10,60 | 14,70 | <b><u>Argilla e Suoli organici</u></b> ; è uno strato molto spesso costituito da sedimenti a tessitura fine di natura argillosa, con intercalazioni di strati sottili di argille organiche                 |
| G                | 14,70 | 16,10 | <b><u>Sabbia e Sabbia limosa</u></b> ; banco costituito da sedimenti a tessitura media di natura sabbiosa  |

#### 4.4. Analisi granulometrica suolo

La definizione litologica dei terreni superficiali ottenuta dall'estrapolazione interpretativa mediante le prove penetrometriche statiche con piezocono ed il sondaggio a carotaggio continuo sono confermate dall'analisi granulometrica del campione di terreno prelevato in corrispondenza della trincea TRC.

Infatti, il sedimento campionato alla profondità tra -1,05 e -1,10 metri da p.c. è stato sottoposto ad analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione dal Laboratorio Tecnologico Emiliano s.r.l. di Modena.

Dal rapporto di prova, riportato nella sezione allegati, è emerso il seguente resoconto granulometrico:

|                |                 |               |                 |
|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Ghiaia : 6,4 % | Sabbia : 26,3 % | Limo : 47,8 % | Sabbia : 19,5 % |
|----------------|-----------------|---------------|-----------------|

che porta a sedimenti a tessitura fine classificabili, secondo il sistema AGI, come Limo con sabbia argilloso.

### 5. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il comprensorio in esame è caratterizzato dalla presenza dalle alluvioni prevalentemente argillose e limose e di sedimenti sabbiosi, di provenienza alpina, appartenenti al Bacino idrogeologico del Fiume Po. Da alcune sezioni geologiche si osserva che i livelli di sedimenti fini argilloso limosi presentano spessori da modesti ad importanti, generalmente continui ed arealmente estesi, ma che si possono trovare anche in lenti; i livelli sabbiosi superficiali e profondi si presentano molto continui e di spessori decisamente importanti

Dall'analisi di alcuni pozzi per acqua presenti sul territorio è stato possibile ricostruire la serie idrogeologica locale; tali dati testimoniano la presenza di bancate e/o livelli argillosi e argilloso limosi di modesto spessore, alle quali si intercalano strati sabbiosi di potenza marcata. Questi depositi poroso-permeabili sono essenzialmente fluviali di origine padana in profondità e, talora, appenninica nelle porzioni più superficiali.

La successione litostratigrafia da riferire alla situazione locale del sito in studio, può essere così schematizzata:

- al di sotto di una copertura vegetale si riscontra un intervallo costituito da sedimenti argillosi, argilloso limosi e limoso argillosi che presentano uno spessore variabile da 12,0 ÷ 15,0 metri,
- inferiormente, fino ad una profondità di almeno 40,0 ÷ 45,0 metri, si trova una potente strato costituito da sabbie a granulometria da fine a grossa, con livelli di sabbie argillose. Tale banco sabbioso contiene il primo livello acquifero
- segue un potente strato di argille, sino alla profondità di variabile tra 60,0 ÷ 70,0 metri
- al di sotto si ha un importante livello di sedimenti sabbiosi a tessitura fine, sino alla profondità di 80,0 ÷ ,95,0 metri, che contiene il secondo livello acquifero
- inferiormente si riscontra un intervallo potente di argille ed argille con torba, sino alla profondità variabile tra 105 ÷ 115 metri. Tale livello impermeabile definisce i limite inferiore della "Risorsa idrica qualificata".

Il regime e l'alimentazione sembrano influenzati sia dal Fiume Po che dal Fiume Secchia, dalla rete di paleoalvei ad essi collegati attraverso le dispersioni di subalveo; la direzione delle acque sotterranee tende ad orientarsi in senso ovest – est e nordovest – sudest, come confermato dalla Carta delle Isofreatiche del PRG vigente. Il Fiume in questa porzione svolge un'azione prevalentemente di alimentazione.

Da quanto precedentemente esposto risulta che nell'area in esame si può riconoscere la seguente struttura idrogeologica, dall'alto verso il basso:

- **falda freatica**: come dimostrato dalle misure del livello piezometrico eseguita nei pozzi e nei piezometri installati all'interno dell'area cimiteriale, non risulta correlata con l'acquifero confinato sottostante; la sua alimentazione avviene prevalentemente per infiltrazioni di acque meteoriche e dalle dispersioni dovute alla rete del sistema idrico di superficie;
- **I<sup>a</sup> falda confinata**: si tratta di un acquifero con caratteristiche di permeabilità e trasmissività elevate e di potenza importante; essa risulta confinata sia al tetto che al letto; la sua alimentazione avviene sostanzialmente ad opera dell'Unità Idrogeologica del Fiume Po.

### 5.1. Vulnerabilità degli acquiferi

Per quanto riguarda la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, intesa come la possibilità di penetrazione e propagazione nei serbatoi naturali ospitanti la prima falda di inquinanti provenienti dalla superficie, è stata effettuata la valutazione utilizzando il sistema DRASTIC, proposto da Aller et Al., 1985 ed utilizzato dall'Epa (U.S. Environmental Protection Agency).

I parametri su cui si basa il sistema DRASTIC sono i seguenti:

D = Profondità della falda

R = Ricarica della falda

A = Mezzo acquifero saturo

S = Tipo di suolo

T = Inclinazione della superficie topografica

I = Mezzo non saturo

C = Conducibilità idraulica

Di questi 7 parametri i primi due sono dinamici, cioè soggetti a variazioni nel tempo, mentre gli altri 5 sono statici, cioè costanti nel tempo, salvo variazioni antropiche in particolare sul suolo. La variabilità di ciascun parametro, in conformità con quanto suggerito dal metodo Drastic, è valutata singolarmente attribuendo ad ogni situazione un punteggio (I) variabile da 1 a 10. La maggiore o minore importanza dei diversi parametri è controllata da un peso fisso (P) attribuito al parametro, variabile da 1 a 5, che viene moltiplicato per il punteggio di ogni singolo parametro.

La somma dei punteggi corrisponde ad un indice Drastic ID ( $ID = \sum I \cdot P$ ). I punteggi, compresi tra 23 e 230, sono stati suddivisi in 10 Classi di vulnerabilità i cui limiti sono riportati nella tabella seguente:

| Classi   | Limiti  | Vulnerabilità      | Classi    | Limiti  | Vulnerabilità     |
|----------|---------|--------------------|-----------|---------|-------------------|
| <b>1</b> | 23-43   | minima             | <b>6</b>  | 128-148 | mediamente alta   |
| <b>2</b> | 44-64   | estremamente bassa | <b>7</b>  | 149-169 | Alta              |
| <b>3</b> | 65-85   | molto bassa        | <b>8</b>  | 170-190 | molto alta        |
| <b>4</b> | 86-106  | bassa              | <b>9</b>  | 191-211 | estremamente alta |
| <b>5</b> | 107-127 | mediamente bassa   | <b>10</b> | 212-230 | massima           |

I campi di variabilità si ricavano da un set di 7 grafici, ognuno per un parametro.

In base a questi valori, l'indice Drastic (DI) si calcola con la seguente formula:

$$DI = Dw \cdot Dr + Rw \cdot Rr + Aw \cdot Ar + Sw \cdot Sr + Tw \cdot Tr + Iw \cdot Ir + Cw \cdot Cr$$

dove: w – peso; r – variabilità.

L'analisi dei parametri sopra esposti ha portato ad attribuire i punteggi riportati nella tabella seguente.

|               | PARAMETRI               | CAMPO<br>(RANGE)  | PUNTEGGIO<br>(I) | PESO<br>(P) | DI = I x P |
|---------------|-------------------------|-------------------|------------------|-------------|------------|
| D             | Profondità falda        | 5 - 15 metri      | 9                | 5           | 45         |
| R             | Ricarica falda          | 0 mm/anno         | 1                | 4           | 4          |
| A             | Mezzo acquifero saturo  | Sabbia            | 6                | 3           | 18         |
| S             | Tipo di suolo           | Protettività alta | 3                | 2           | 6          |
| T             | Pendenza                | 0-2%              | 10               | 1           | 10         |
| I             | Mezzo non saturo        | Argilla e Limo    | 3                | 5           | 15         |
| C             | Conducibilità idraulica | 10-4 m/s          | 3                | 3           | 9          |
| <b>TOTALE</b> |                         |                   |                  |             | <b>107</b> |

L'indice Drastic risulta pari a 107 e corrisponde alla classe di vulnerabilità mediamente bassa.

## 5.2. Assetto idrogeologico del sito – Livello di falda

La situazione idrogeologica del sito è stata determinata mediante misure dirette del livello piezometrico all'interno dei perfori d'indagine penetrometrica, al momento dell'esecuzione delle prove, e nei n. 2 piezometri in momenti successivi.

Il valore del livello di falda, rispetto al piano campagna è riferito alla data dei rilevamenti, i quali sono stati effettuati nei mesi di Ottobre e Novembre 2012.

Dai rilievi è emerso che:

| Punto di misura | Data rilievo<br>23.10.2012 | Data rilievo<br>13.11.12 | Data rilievo<br>30.11.12 |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Prova CPTu1     | 3,38 m da p.c.             |                          |                          |
| Prova CPTu2     | 2,90 m da p.c.             | 2,90 m da p.c.           |                          |
| Prova CPTu3     | 3,50 m da p.c.             | 3,00 m da p.c.           |                          |
| Piezometro 1    |                            | 2,90 m da p.c.           | 2.65 m da p.c.           |
| Piezometro 2    |                            | 3,00 m da p.c.           | 2.70 m da p.c.           |

In concomitanza dei rilievi del livello di falda nei punti indicati in tabella, è stato eseguito un rilievo della soggiacenza della falda in alcuni pozzi romani nel comparto di Via Carnevale, la cui ubicazione è riportata nella seguente figura.

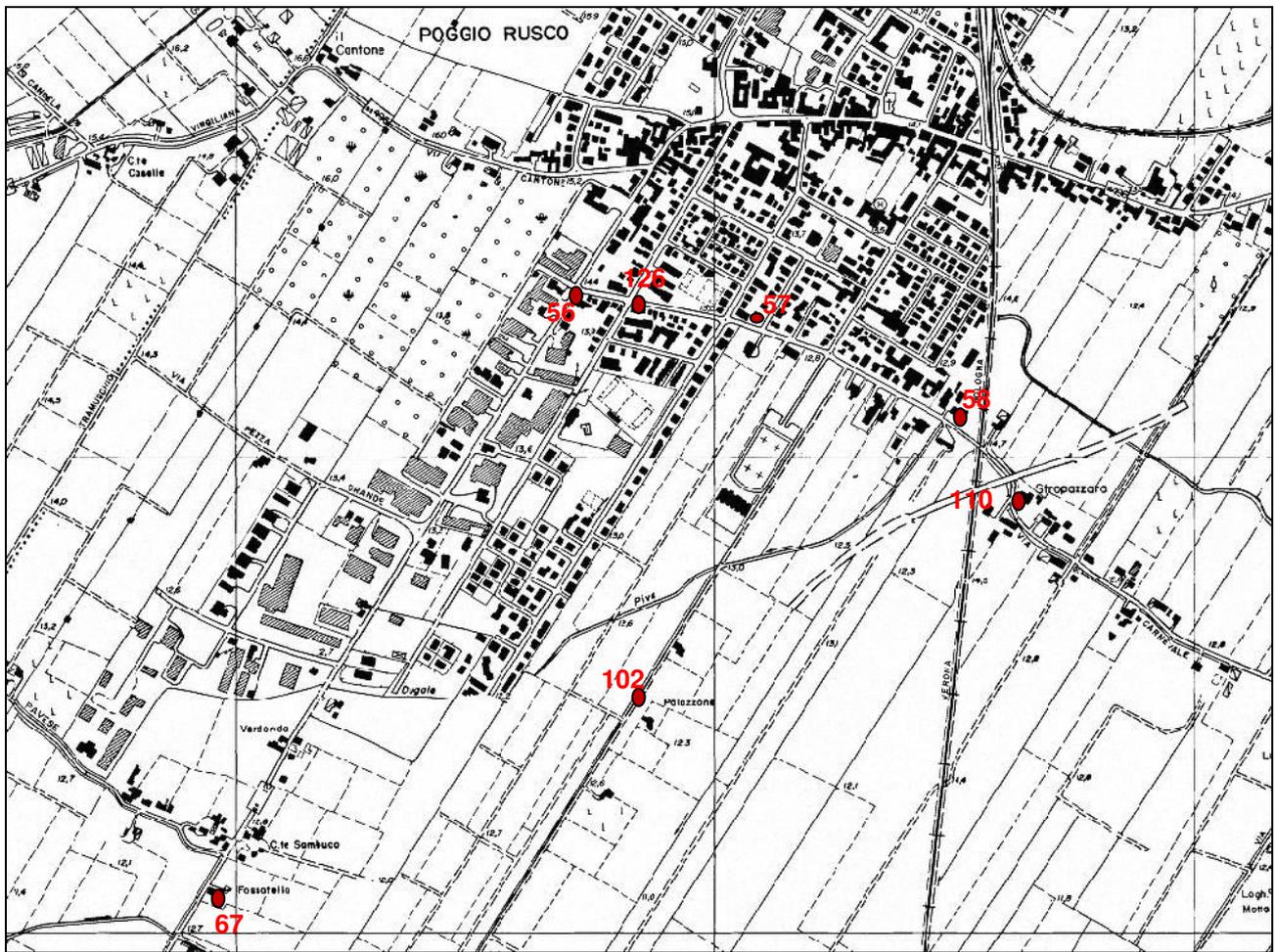


Fig. 3 – Ubicazione punti di rilievo livello piezometrico

Dai rilevati eseguiti in data 23 novembre 2012 si sono riscontrati i seguenti livelli piezometrici:

- pozzo 56 : -0,80 m da p.c.
- pozzo 126 : -1,50 m da p.c.
- pozzo 57 : -1,05 m da p.c.
- pozzo 58 : -1,37 m da p.c.
- pozzo 110 : -1,55 m da p.c.
- pozzo 102 : -1,95 m da p.c.
- pozzo 67 : -1,20 m da p.c.

Come si può constatare il livello della falda freatica non coincide con il livello piezometrico, ad indicare che l'acquifero confinato presente dalla profondità di 14,0 ÷ 15,0 metri non è in comunicazione con la falda freatica dei termini limosi di superficie.

Pertanto, in base a quanto ricavato dai rilievi effettuati, si può ritenere che il livello della falda sia rappresentativo di una situazione di norma per l'area. Si osserva, pertanto che la falda ha una soggiacenza media di circa 2,80 metri e pertanto è limitatamente influente nel piano cimiteriale in oggetto : infatti in considerazione delle opere fondazionali delle strutture da realizzare nel settore del nuovo cimitero, previste alla profondità di -1,50 ÷ -2,00 metri ed alle previste attività di inumazione e tumulazione nell'area dell'ampliamento, gli aspetti generalmente da considerare sono la soggiacenza della falda freatica, la sua morfologia e le sue variazioni nel tempo.

La profondità della falda in oggetto è tale da non interagire con gli strati superficiali e con qualsiasi siano le scelte che verranno compite nel piano cimiteriale, qualora queste non prevedano scavi superiori a -2,60 metri da p.c..

Relativamente alle inumazioni e tumulazioni in terra, si fa presente che deve prevedere massime profondità di scavo dell'ordine di 2,10 metri, in quanto compatibilmente con le prescrizioni normative vigenti si rende necessario rispettare il franco minimo di 50 centimetri al di sotto del piano di inumazione rispetto alla massima altezza della falda.

### **5.3. Morfologia della superficie piezometrica**

In relazione al rilievo piezometrico effettuato nei dintorni del sito in studio, si è ricostruito l'andamento della superficie piezometrica per un intorno circoscritto all'area di interesse.

L'andamento delle isopieze dimostra che il flusso idrico è approssimativamente orientato nordovest – sudest, con probabile presenza di un asse di alimentazione sotterraneo in corrispondenza di Via Carnevale.

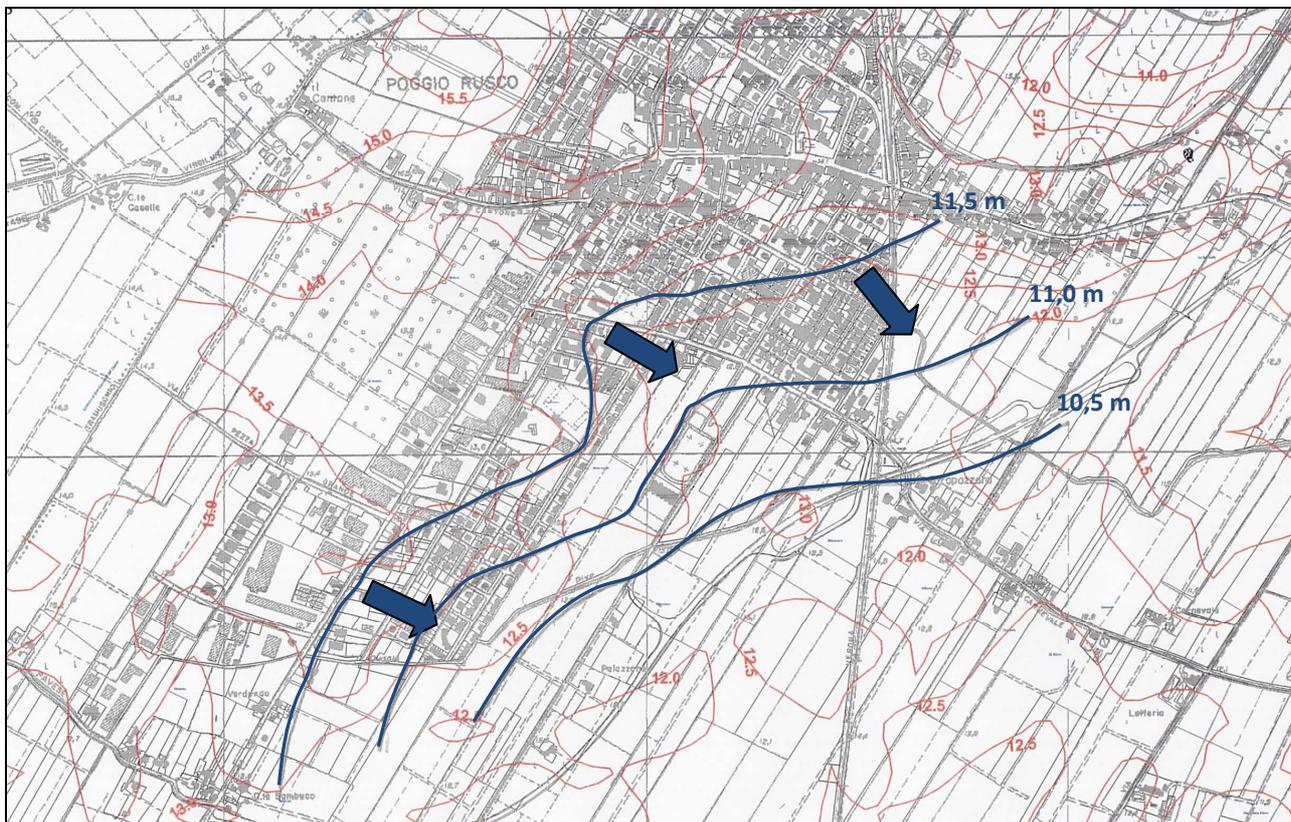


Fig. 4 – Stralcio della Carta delle Isopiezometriche

## 6. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E GEOTECNICA

### 6.1. Coefficiente di permeabilità dei terreni

Per la valutazione e la caratterizzazione del parametro di permeabilità ( $k$ ) dei terreni indagati si è proceduto effettuando una stima di  $k$  in relazione a differenti tipologie di prove e valutazioni; infatti, si è eseguita una prova di permeabilità in pozzetto superficiale a base quadrata, n. 4 prove di dissipazione a differenti profondità sulla verticale di indagine CPTu1 e si è stimato il valore di  $k$  in modo indiretto mediante le relazioni proposte da Robertson (2010), che correlano il valore del indice  $I_c$  del Tipo di Comportamento del Suolo (SBT).

#### Coefficiente di permeabilità da prova in pozzetto superficiale

Al fine di condurre questa tipologia di prova è stato realizzato un pozzetto delle dimensioni  $B \times L = 0,75 \times 0,75$  m per una profondità di 1,10 metri; dopodiché si è riempito il pozzetto d'acqua per un'altezza di 20 cm misurandone la velocità di assorbimento, i cui valori sono riportati in tabella.

| Tempo (minuti) | Livello (cm) | Tempo (minuti) | Livello (cm) |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 0'             | 18.5         | 44'            | 16.7         |
| 11'            | 18           | 90'            | 15.9         |
| 20'            | 17.5         | 199'           | 13.9         |
| 31'            | 17           | 317'           | 12.3         |

La valutazione del coefficiente di permeabilità si ottiene dalla seguente formula empirica:

$$K = \frac{[(h - H) / (t_2 - t_1)] * [1 + (2 h_m / b)]}{[(27 h_m / b) + 3]}$$

dove:

$h_m$  = altezza media dell'acqua nel pozzetto (m)

$b$  = lato del pozzetto (m)

$t_2 - t_1$  = intervallo di tempo (sec)

$h - H$  = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo di tempo  $t_2 - t_1$  (m)

Con i dati in possesso si ottiene un valore del coefficiente di permeabilità  $k = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ , ad indicare una permeabilità medio-bassa ed un drenaggio scarso.

### Coefficiente di permeabilità da dissipazione in situ

In riferimento alle prove di dissipazione effettuate si può determinare il valore della permeabilità  $k$  del suolo dall'analisi delle curve di decadimento delle pressioni interstiziali in funzione del tempo.

Per il calcolo del coefficiente di permeabilità  $k$  si fa riferimento alle indicazioni di P.W. Mayne (2002), per il quale il valore di  $k$  da dati di prove di dissipazione effettuate con piezocono di tipo 2, cioè con il setto poroso posto successivamente alla punta conica, può essere determinato dalla relazione:

$$k \text{ (cm/sec)} \approx 1 / (251 \cdot t_{50})^{1,25}$$

dove  $t_{50}$  è il tempo corrispondente al 50% della dissipazione delle sovrappressioni interstiziali ( $\Delta u = 50\%$ ).

Prova di dissipazione n. 1 – Profondità metri 2,50 metri da p.c. :  $k = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Prova di Dissipazione n. 2 – Profondità metri 3,60 metri da p.c. :  $k = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Prova di Dissipazione n. 3 – Profondità metri 7,25 metri da p.c. :  $k = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Prova di Dissipazione n. 4 – Profondità metri 10,90 metri da p.c. :  $k = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

### Coefficiente di permeabilità da correlazioni empiriche

È possibile ottenere una stima del coefficiente di permeabilità  $k$  da correlazioni empiriche che si basano sui valori di resistenza  $q_c$  e  $f_s$  ottenuti da prove penetrometriche statiche, opportunamente normalizzate per la determinazione dell'Indice di comportamento  $I_c$ .

Robertson P. K . (2010) suggerisce le seguenti relazioni:

$$1,0 < I_c < 3,27 \quad k = 10^{(0,952 - 3,04I_c)} \text{ (m/s)}$$

$$3,271 < I_c < 4,0 \quad k = 10^{(-4,52 - 1,37I_c)} \text{ (m/s)}$$

Riferendosi a questa correlazione si ottiene il profilo di  $k$ , come riportato nella Tabella n. 2.

Effettuando la stima del  $k$  per le stesse profondità a cui sono state eseguite le prove di dissipazione, si sono trovati valori di  $k$  :  $Z = 2,50 \text{ m}$   $k = 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ , alla profondità di  $Z = 3,60 \text{ m}$

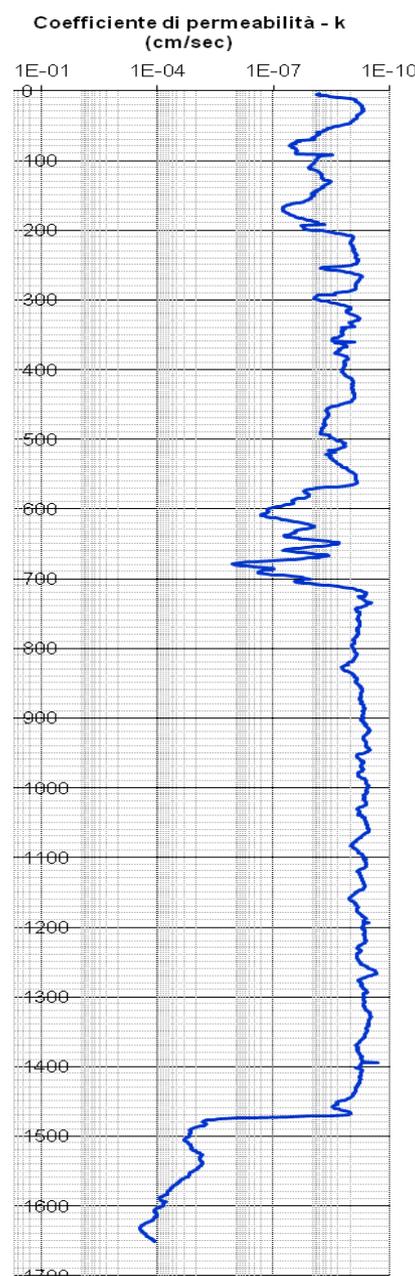
$k = 8 \times 10^{-10}$  m/s, alla profondità di  $Z = 7,25$  m  $k = 4 \times 10^{-10}$  m/s, alla profondità di  $Z = 10,90$  m  $k = 6 \times 10^{-10}$  m/s.

Il confronto tra i dati ottenuti fa ritenere che i valori stimati in modo empirico sovrastimano il valore di K. Ad ogni modo, analizzando l'andamento di K con la profondità si riscontra che nei primi 2 metri vi è una permeabilità bassa, che passa a molto bassa sino alla profondità di 5,50 m.

Da quanto ottenuto si può considerare che gli strati superficiali di terreno sono idonei alla funzione di inumazione e tumulazione richiesta dal piano cimiteriale, in quanto è garantito un basso grado di permeabilità e drenaggio, e non vi è interazione diretta con la falda freatica.

**Tabella n.2 – Valori stimati della permeabilità**

| Litologia                       | Profondità (cm) | K (m/sec) |
|---------------------------------|-----------------|-----------|
| Argilla                         | 48              | 9.4E-10   |
| Argilla limosa                  | 70              | 7.0E-09   |
| Limo argilloso - Argilla limosa | 91              | 2.7E-08   |
| Argilla limosa                  | 150             | 7.1E-09   |
| Limo argilloso - Argilla limosa | 200             | 2.6E-08   |
| Argilla                         | 289             | 1.2E-09   |
| Argilla limosa                  | 307             | 5.0E-09   |
| Argilla                         | 343             | 1.0E-09   |
| Argilla limosa                  | 378             | 1.9E-09   |
| Argilla                         | 448             | 1.1E-09   |
| Argilla limosa                  | 539             | 3.4E-09   |
| Argilla                         | 570             | 1.6E-09   |
| Limo argilloso - Argilla limosa | 598             | 3.4E-08   |
| Limo sabbioso                   | 612             | 1.5E-07   |
| Limo argilloso - Argilla limosa | 673             | 2.4E-08   |
| Limo sabbioso                   | 693             | 4.0E-07   |
| Limo argilloso - Argilla limosa | 707             | 2.0E-08   |
| Argilla                         | 912             | 7.0E-10   |
| Suoli organici                  | 921             | 3.4E-10   |
| Argilla                         | 1258            | 5.2E-10   |
| Suoli organici                  | 1270            | 2.6E-10   |
| Argilla                         | 1319            | 4.6E-10   |
| Suoli organici                  | 1342            | 3.2E-10   |
| Argilla                         | 1449            | 6.3E-10   |
| Argilla limosa                  | 1470            | 2.4E-09   |
| Sabbia limosa                   | 1565            | 1.2E-05   |
| Sabbia con Limo                 | 1615            | 7.6E-05   |
| Sabbia pulita                   | 1651            | 2.0E-04   |



## 6.2. Modello geotecnico

Al fine della progettazione delle opere edili previste nel piano cimiteriale viene indicato il Modello geotecnico separatamente per ogni verticale d'indagine effettuata, con l'intento di distinguere le caratteristiche geotecniche dei tre settori investigati.

Sulla base del Modello geologico che si è individuato, viene ricavato il Modello geotecnico del sottosuolo, nel quale si è ritenuto di effettuare un'ulteriore suddivisione di dettaglio delle Unità litologiche, in quei casi in cui si riconoscono livelli con caratteristiche geotecniche differenti rispetto a quelle dei litotipi che caratterizzano l'Unità litologica della Tabella 1.

In questo modo si vuole caratterizzare nel dettaglio gli specifici livelli individuati, al fine di fornire maggiori informazioni sulle principali caratteristiche geotecniche, utili alla fase progettuale di valutazione degli Stati Limite.

Per ciascun intervallo litotecnico indicato si riportano i parametri geotecnici assunti di riferimento, espressi con i loro valori medi.

**Tabella 2 - Modello geotecnico del sottosuolo**

| Modello geotecnico<br>Prova CPTu1 | Quota base<br>strato da p.c. | Boone &<br>Freitas (2010) | Robertson &<br>Cabal (2009)     | Terzaghi<br>(1943) | Khulawy &<br>Mayne<br>(1990) | Robertson<br>(1998) -<br>Horvat (2000) | Kulhawy &<br>Mayne<br>(1990) | Lambe &<br>Withman (1983) -<br>Mo |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
| Litologia - Robertson (1990)      | Z (cm)                       | FC%                       | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | su (kPa)           | $\phi'$ (°)                  | Dr (%)                                 | Mo (kPa)                     | Ey - Eu (kPa)                     |
| Argilla                           | 48                           | 79                        | 18.1                            | 48                 | 34                           | -                                      | 6651                         | 6065                              |
| Argilla limosa                    | 150                          | 61                        | 17.6                            | 66                 | 33                           | -                                      | 9074                         | 8875                              |
| Limo argilloso - Argilla limosa   | 200                          | 56                        | 18.1                            | 93                 | 34                           | -                                      | 12558                        | 12653                             |
| Argilla                           | 448                          | 76                        | 17.4                            | 35                 | 28                           | -                                      | 5967                         | 7196                              |
| Argilla limosa                    | 570                          | 71                        | 18.0                            | 46                 | 29                           | -                                      | 7815                         | 9402                              |
| Limo argilloso - Argilla limosa   | 707                          | 53                        | 17.9                            | 60                 | 31                           | -                                      | 13848                        | 13883                             |
| Argilla                           | 1342                         | 87                        | 17.3                            | 27                 | 26                           | -                                      | 5841                         | 8070                              |
| Argilla                           | 1470                         | 82                        | 17.7                            | 40                 | 27                           | -                                      | 8341                         | 11009                             |
| Sabbia limosa                     | 1615                         | 13                        | 19.1                            | 48                 | 38                           | 44                                     | 55386                        | 47025                             |
| Argilla                           | 48                           | 79                        | 18.1                            | 66                 | 34                           | -                                      | 6651                         | 6065                              |

| Modello geotecnico<br>Prova CPTu2 | Quota base<br>strato da p.c. | Boone &<br>Freitas (2010) | Robertson &<br>Cabal (2009)     | Terzaghi<br>(1943) | Khulawy &<br>Mayne<br>(1990) | Robertson<br>(1998) -<br>Horvat (2000) | Kulhawy &<br>Mayne<br>(1990) | Lambe &<br>Withman (1983) -<br>Mo |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
| Litologia - Robertson (1990)      | Z (cm)                       | FC%                       | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | su (kPa)           | $\phi'$ (°)                  | Dr (%)                                 | Mo (kPa)                     | Ey - Eu (kPa)                     |
| Argilla                           | 49                           | 78                        | 17.7                            | 43                 | 33                           | -                                      | 6065                         | 5612                              |
| Argilla limosa                    | 146                          | 63                        | 18.7                            | 94                 | 35                           | -                                      | 12176                        | 11352                             |
| Argilla                           | 247                          | 77                        | 17.4                            | 38                 | 29                           | -                                      | 6100                         | 6886                              |
| Argilla limosa                    | 360                          | 65                        | 17.4                            | 47                 | 29                           | -                                      | 7606                         | 8758                              |
| Limo argilloso - Argilla limosa   | 390                          | 49                        | 17.9                            | 44                 | 32                           | -                                      | 13136                        | 12784                             |
| Argilla                           | 610                          | 74                        | 17.5                            | 35                 | 28                           | -                                      | 6276                         | 7725                              |
| Argilla limosa                    | 672                          | 66                        | 17.3                            | 46                 | 29                           | -                                      | 7967                         | 9646                              |
| Argilla                           | 946                          | 82                        | 17.0                            | 26                 | 26                           | -                                      | 5349                         | 7279                              |
| Argilla limosa                    | 1008                         | 66                        | 17.4                            | 46                 | 29                           | -                                      | 9545                         | 11055                             |
| Argilla                           | 1387                         | 82                        | 17.1                            | 31                 | 27                           | -                                      | 6748                         | 9058                              |
| Sabbia limosa                     | 1468                         | 18                        | 18.4                            | -                  | 36                           | 37                                     | 41218                        | 35397                             |
| Sabbia con Limo                   | 1521                         | 4                         | 19.2                            | -                  | 39                           | 50                                     | 63648                        | 53787                             |
| Sabbia limosa                     | 1585                         | 18                        | 18.8                            | -                  | 37                           | 40                                     | 49155                        | 41576                             |

| Modello geotecnico<br>Prova CPTu3 | Quota base<br>strato da p.c. | Boone &<br>Freitas (2010) | Robertson &<br>Cabal (2009)     | Terzaghi<br>(1943) | Khulawy &<br>Mayne<br>(1990) | Robertson<br>(1998) -<br>Horvat (2000) | Kulhawy &<br>Mayne<br>(1990) | Lambe &<br>Withman (1983) -<br>Mo |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
| Litologia - Robertson (1990)      | Z (cm)                       | FC%                       | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $s_u$ (kPa)        | $\phi'$ (°)                  | Dr (%)                                 | Mo (kPa)                     | Ey - Eu (kPa)                     |
| Limo sabbioso                     | 101                          | 44                        | 19.0                            | 54                 | 39                           | 41                                     | 19908                        | 15255                             |
| Limo argilloso - Argilla limosa   | 200                          | 61                        | 18.9                            | 109                | 35                           | -                                      | 14371                        | 13907                             |
| Argilla                           | 939                          | 79                        | 17.4                            | 34                 | 27                           | -                                      | 6234                         | 7783                              |
| Limo sabbioso                     | 987                          | 40                        | 17.6                            | 25                 | 33                           | 24                                     | 20304                        | 18054                             |
| Limo argilloso - Argilla limosa   | 1074                         | 56                        | 17.8                            | 47                 | 31                           | -                                      | 16925                        | 13370                             |
| Argilla                           | 1405                         | 85                        | 17.2                            | 31                 | 27                           | -                                      | 6808                         | 9242                              |
| Sabbia limosa                     | 1585                         | 10                        | 18.9                            | -                  | 38                           | 44                                     | 55780                        | 47731                             |

| Legenda                      |                                   |           |  |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------|--|
| <b>FC</b>                    | Contenuto di fine in percentuale  | $\phi'$   | Resistenza drenata o angolo di attrito |
| <b><math>\gamma_t</math></b> | Peso dell'unità di volume totale  | <b>Mo</b> | Modulo edometrico                      |
| <b><math>s_u</math></b>      | Resistenza o Coesione non drenata | <b>Eu</b> | Modulo elastico non drenato            |
| <b>Dr</b>                    | Densità relativa                  | <b>Ey</b> | Modulo di Young                        |

Il Modello geotecnico evidenzia che i terreni costituenti la successione stratigrafica presentano caratteristiche geotecniche da discrete a limitate.

Infatti, i sedimenti argillosi ed argilloso limosi presenti tra le quote di -2,00 m ÷ -10,00 m circa mostrano valori di resistenza al taglio non drenata  $s_u$  dell'ordine di 0,25 ÷ 0,45 kg/cm<sup>2</sup>, ma Modulo di compressibilità medio dell'ordine di 60 ÷ 65 kg/cm<sup>2</sup>, mentre si possono ritenere soddisfacenti i parametri di resistenza drenata con valori di  $\phi' = 26^\circ \div 32^\circ$ .

Decisamente migliori sono i valori di resistenza degli intervalli limosi e sabbiosi che seguono gli strati argillosi.

## 7. VERIFICHE GEOTECNICHE

Essendo previste nel Piano regolatore Cimiteriale la realizzazione di opere edilizie sia nella porzione in ampliamento che nel settore esistente, vengono sviluppate le verifiche geotecniche sul Carico Limite, come indicate nel D.M. 14.01.2008 per aree in zona sismica 3.

Al fine di adottare i parametri geotecnici caratteristici per i terreni rientranti nel volume significativo, si sono adottate le ipotesi progettuali fornite preliminarmente dal progettista Arch. Genta Rossano con studio in Via IV Novembre 7 in Ostiglia (MN); quanto riportato nella presente sezione rappresenta la verifica al progetto esecutivo qualora le assunzioni progettuali adottate corrispondono a quelle adottate nel progetto definitivo, altrimenti si consiglia di eseguire nuove verifiche geotecniche sul progetto definitivo.

In tale contesto i dati utili alla fase di verifica, sono stati trattati con l'obiettivo di ottenere i parametri geotecnici caratteristici e di progetto, applicando i dovuti criteri, conformemente al D.M. 14 Gennaio 2008 "Norme Tecniche per le costruzioni".

Le condizioni di progetto preliminare prevedono la realizzazione di nuovi loculi nell'area in ampliamento e la realizzazione di strutture di servizio nella porzione esistente, con strutture di fondazione a platea aventi piani di posa a  $D_f = -0,50$  metri e  $D_f = -1,50$  metri, con larghezza B

ipotizzata tra -4,50 ÷ -5,00 metri. Con tali assunzioni verranno valutati i parametri geotecnici di resistenza che interessano le ipotetiche superfici di rottura al disotto del piano di fondazione per una profondità di 1-2 B, che rappresenta il volume significativo.

### 7.1. Unità geotecniche e parametri geotecnici di progetto

Al fine di effettuare le verifiche geotecniche, i parametri di resistenza relativi alla resistenza non drenata  $s_u$ , sono riportati come valori caratteristici ( $f_k$ ), mentre i parametri relativi all'unità di peso di volume sono riportati come valori medi.

Dall'ipotesi progettuale che prevede fondazioni superficiali a platea delle dimensioni  $B = 4,50 \div 5,00$  metri, si riporta il Modello geotecnico caratteristico per l'intervallo sino a 7,00 metri, in quanto sufficiente a rappresentare il volume di terreno pari a 1B.

La determinazione del parametro di resistenza è stata effettuata secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche; si è partiti dai parametri medi per ricavare i valori caratteristici del parametro di resistenza al taglio del terreno, con associata una probabilità di non superamento del 5%.

Quindi, il valore caratteristico inferiore è stato ricavato facendo riferimento alla metodologia basata sul calcolo del 5° percentile del valore medio della distribuzione dei dati, in quanto, trattandosi di fondazione a platea, la superficie di rottura interessa un grande volume di terreno. La relazione utilizzata è la seguente:

$$x_k = \bar{x} \pm t_{n-1}^{0.95} \left( \frac{s}{\sqrt{n-1}} \right)$$

dove:

$x_k$  è il valore caratteristico desiderato

$\bar{x}$  con barra, è il valore medio della popolazione, ipotizzato essere uguale al valore medio del campione

$t$  è il valore della distribuzione di student ad  $n-1$  gradi di libertà con probabilità  $u=95\%$

$s$  è la deviazione standard del campione

$n$  è il numero di dati.

Tabella 3 - Parametri di progetto

| Dimensione Fondazione | Peso di volume<br>$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> ) | Resistenza caratteristica<br>$s_u$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|--|--|
| B = 4,50 ÷ 5,00 m     | 1,76 t/m <sup>3</sup>                            | 0,38 kg/cm <sup>2</sup>                                  |

### 7.2. Verifiche geotecniche in condizioni statiche (SLU)

I calcoli del Carico Limite del terreno di fondazione sono stati eseguiti facendo riferimento alla quota del livello del piano campagna, per le condizioni di progetto previste sia come piano di posa  $D_f = -1,50$  m e  $D_f = -0,50$  metri, considerando il volume significativo al disotto delle fondazioni,

quell'intervallo di sottosuolo corrispondente all'incremento della tensione verticale efficace  $\Delta\sigma'_v(z)$  che eccede di oltre il 10% la tensione verticale efficace preesistente  $\sigma'_{vo}(z)$  in assenza di sovraccarichi, espressa dall'equazione  $\Delta\sigma'_v(z) = (1/10) \sigma'_{vo}(z)$ . Tale assunzione è discriminante, in relazione al Modello geotecnico del sottosuolo interessato, per la determinazione dei valori caratteristici di resistenza.

Le verifiche alla sicurezza sono state svolte secondo quanto disposto nel cap. 2.5.3. del D.M. 14.01.2008, nel quale vengono fornite le combinazioni delle azioni, cioè l'insieme delle cause che possono indurre uno stato limite nella struttura o nel sottosuolo. Tali combinazioni vengono espresse sostanzialmente in una serie di relazioni, nelle quali le azioni componenti sono associate a differenti coefficienti parziali, che ne amplificano o ne riducono l'entità.

Nel presente documento, le verifiche geotecniche vengono effettuate per l' **Approccio 2 - Combinazione 1: (A1+M1+R3) (dimensionamento geotecnico - GEO)**.

Secondo la normativa la valutazione del grado di sicurezza si ottiene adottando il "Metodo semiprobabilistico dei coefficienti parziali" e verificando la relazione:

$$R_d > E_d$$

con: **Rd** : valore di progetto delle resistenze del terreno; **Ed** : valore di progetto dell'azione o degli effetti delle azioni nelle varie combinazioni di calcolo.

Per determinare il valore del Carico Limite dei terreni e di conseguenza del valore di progetto della resistenza (Rd), è stato fatto uso della relazione proposta da Brinch-Hansen, comprensiva di fattori correttivi di forma, di approfondimento, per carichi inclinati, per fondazione su pendio e per fondazioni con base ruotata, è la seguente:

$$q_{lim} = c_u \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q_0 \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + 0,5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma \cdot r_\gamma$$

essendo:

**c<sub>u</sub>** = resistenza al taglio non drenata

**q<sub>0</sub> = γ · D<sub>f</sub>** = peso del terreno asportato per lo scavo di fondazione

**B** = larghezza della fondazione

**N<sub>c</sub>, N<sub>q</sub>, N<sub>γ</sub>** = coefficienti di capacità portante

**γ** = peso di volume del terreno

**Fattori correttivi:** s<sub>i</sub>, d<sub>i</sub>, i<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, q<sub>i</sub>, r<sub>γ</sub>

Si ricorda che il calcolo del Carico Limite è teorico ed andrà ripreso specificamente in sede progettuale sulla base delle effettive dimensioni delle fondazioni e dei carichi che verranno applicati.

Le indicazioni seguenti, come previsto dalla normativa in oggetto servono come indicazioni di fattibilità relativamente a possibili interventi edificatori nell'ambito dell'area cimiteriale per i fini propri di queste aree; pertanto sono state calcolati dei valori indicativi di capacità portante limite (Q<sub>lim</sub>) e di progetto (Q<sub>ult</sub>) per diverse tipologie di fondazioni dirette a platea con diverse geometrie (B x L).

Infatti il valore di capacità portante è fortemente collegato alle caratteristiche dimensionali delle fondazioni (larghezza B, lunghezza L, profondità z, ecc..).

Non avendo in questa fase elementi progettuali di dettaglio si sono utilizzati casi teorici con l'obiettivo di dare un ordine di grandezza dei parametri utilizzabili, sicuramente da verificare e ricalcolare sulla base di dimensionamenti specifici.

**Tabella n. 4 – Stima del Carico Limite**

| Dimensioni<br>fondazioni<br>B x L (m) | Profondità di posa<br>(m) | Carico Limite<br>q <sub>lim</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Resistenza di progetto<br>R <sub>d</sub> = q <sub>lim</sub> / 2.3<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------|---------------------------|--|--|
| 4,50 x 30,00                          | 0,50                      | 2,19   | 0,95   |
| 5,00 x 30,00                          | 0,50                      | 2,18   | 0,95   |
| 6,00 x 6,00                           | 0,50                      | 2,50   | 1,09   |
| 6,00 x 6,00                           | 1,50                      | 2,80   | 1,22   |

### 7.3. Verifiche geotecniche in condizioni dinamiche (SLV)

In accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni, sono stati effettuati i calcoli della resistenza in condizioni sismiche, allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

Per determinare il valore di progetto della resistenza (R<sub>d</sub>) in condizioni dinamiche, nella presente relazione si fa riferimento alla formula proposta da Brinch-Hansen, comprensiva di fattori correttivi, nella quale si introducono i fattori **z<sub>i</sub>** che tengono conto degli effetti inerziali indotti dal sisma (Paolucci & Pecker, 1997) per la componente coesiva ed i fattori **e<sub>i</sub>** (Richards et al., 1993) per la componente attritiva.

Pertanto si ha:

$$q_{lim} = c_u \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot z_c + q_0 \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot z_q + 0,5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_y \cdot s_y \cdot d_y \cdot e_{yk} \cdot e_{yi}$$

dove:  $e_{yk} = (1 - k_{hk} / \tan \varphi)^{0,45}$        $e_{yi} = (1 - 0,7 \cdot k_{hi})^5$   
 $z_q = (1 - k_h / \tan \varphi)^{0,35}$        $z_c = 1 - 0,32 k_h$

Per effettuare le verifiche agli stati limite in condizioni dinamiche, si devono determinare i valori dei coefficienti sismici orizzontale e verticale **k<sub>h</sub>** e **k<sub>v</sub>**, definiti secondo le relazioni: **k<sub>h</sub> = βs · A<sub>max</sub>/g** ; **k<sub>v</sub> = 0.5 · k<sub>h</sub>** dove: **βs** = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, **k<sub>hk</sub> = k<sub>h</sub>** è l'effetto cinematico, mentre **k<sub>hi</sub> = Sd(T)** è l'ordinata dello spettro di progetto.

**Tabella 5 – Carico Limite in condizioni dinamiche**

| Dimensioni<br>fondazioni<br>B x L<br>(m) | Profondità di posa<br>(m) | Carico Limite<br>q <sub>lim</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Resistenza di progetto<br>R <sub>d</sub> = q <sub>lim</sub> / 2.3<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|--|---------------------------|--|--|
| 4,50 x 30,00                             | 0,50                      | 2,14   | 0,93   |
| 5,00 x 30,00                             | 0,50                      | 2,14   | 0,93   |
| 6,00 x 6,00                              | 0,50                      | 2,45   | 1,06   |
| 6,00 x 6,00                              | 1,50                      | 2,74   | 1,19   |

## 8. ANALISI SISMICA DEL SITO

La sismicità che caratterizza un comparto territoriale è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale e quindi alla presenza di strutture geologicamente "attive".

Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è dunque l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica temporale e della geologia strutturale responsabile della sismicità locale, entrambe strettamente connesse tra loro, che si è venuta a tradurre nella definizione di "zone" o "sorgenti sismogenetiche" presenti in tutto il territorio italiano.

Per l'individuazione delle "sorgenti sismogenetiche" che interessano il territorio è stato fatto riferimento alla nuova zonazione sismogenetica del territorio italiano denominata ZS.9 (2004) prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), che rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica. Questa zonazione è stata elaborata riferendosi anche i più recenti background informativi sui terremoti ed in particolare alle ultime banche dati relative alle sorgenti sismogenetiche italiane DISS 2.0 ed al catalogo CPTI.

Dall'osservazione della mappa delle aree sismogenetiche dell'Italia settentrionale si evince che il territorio comunale di Poggio Rusco (MN) ricade nella **ZS.912** denominata "*Appennino settentrionale – Dorsale emiliano-ferrarese*" che rappresenta la fascia più esterna dell'arco appenninico settentrionale. La sismicità è correlabile alla tettonica attiva del fronte compressivo del margine appenninico sepolto più avanzato che giunge fino all'attuale Po, caratterizzata da meccanismi focali di tipo compressivo e transpressivo, con terremoti poco profondi anche di medio-alta intensità.

Da recenti ricerche effettuati da Eni (2010) sull'assetto strutturale della Pianura Padana e dalla consultazione della Carta Sismotettonica dell'Emilia Romagna, si può constatare che la struttura tettonica regionale denominata Dorsale Ferrarese è formata da una serie di anticlinali e sinclinali che da Ferrara a Concordia sulla Secchia si dispongono con andamento pressoché est – ovest, mentre all'altezza di Concordia sulla Secchia / Novi di Modena l'orientamento diviene nord nordest – sud sudovest sino a raggiungere Reggio Emilia.

Questa struttura che evolve in sovrascorrimenti, più o meno sviluppati, interessa principalmente le serie deposizionali marine carbonatiche mesozoiche, che nell'area d'interesse vengono a trovarsi a profondità relativamente modeste. Infatti, l'isobate del substrato del pleistocene medio, che individua la base del Sistema Emiliano - Romagnolo Superiore (SERS) di età compresa tra 0,45 Ma e Presente, rappresentato da depositi del Quaternario continentale di bacino fluviale, sono segnalate a profondità di circa superiori ai 400 metri dalla superficie.

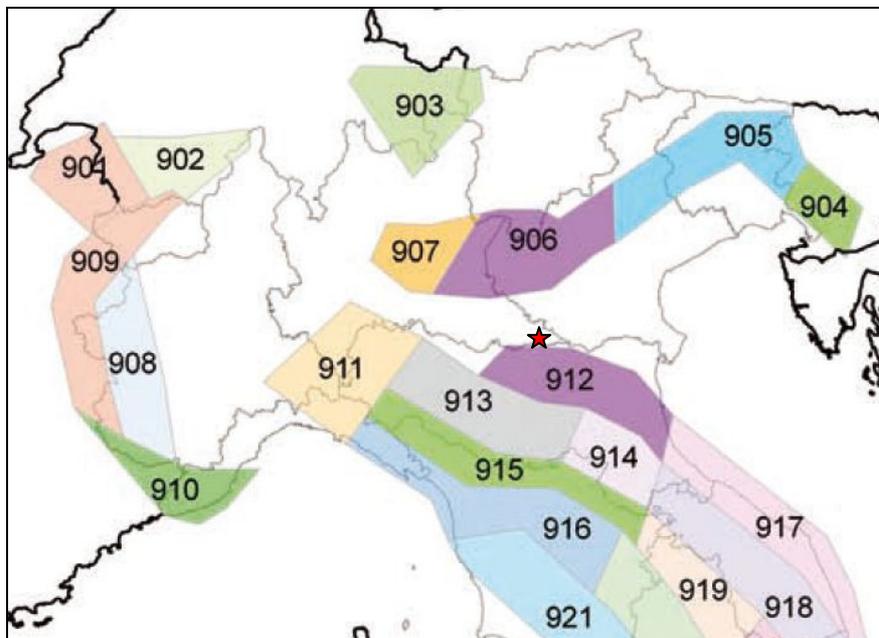


Fig. 5 - Zone sismogenetiche per la mappa di pericolosità sismica di base di riferimento - (Gruppo di lavoro, 2004).

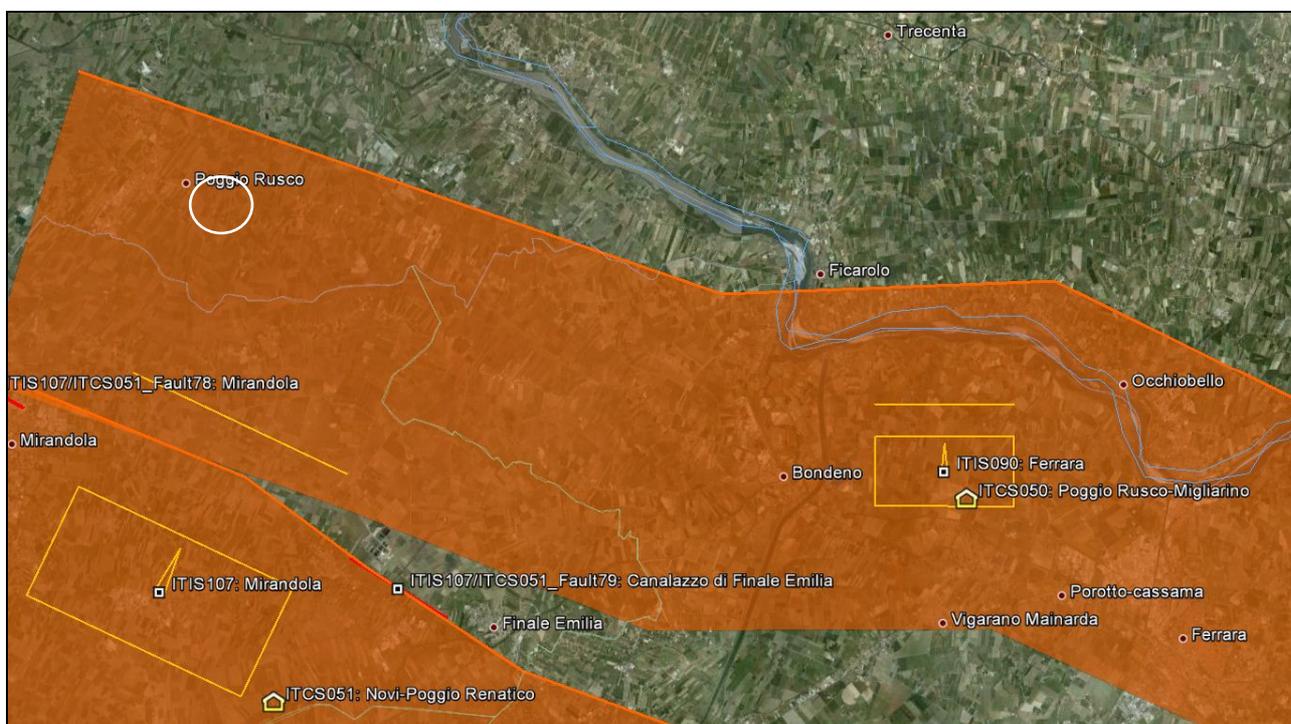


Fig. 6 - Zonazione sismogenetica ZS9 e distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.1; le sigle ITCS corrispondono alle "zone" mentre le sigle ITIS corrispondono a "sorgenti" sismogenetiche della B/D DISS (versione aggiornata 3.1).

Al fine di inquadrare l’assetto sismico del comparto territoriale in esame si è consultato il database più aggiornato e disponibile DISS3.1 che riporta la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche; più nel dettaglio la banca dati DISS 3.1 indica che il territorio di Poggio Rusco insiste all’interno della “fascia” sismogenetica ITCS050 “Poggio Rusco - Migliarino”; a questa zona sismogenetica viene attribuita una magnitudo massima  $M = 5,5$ , dunque caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto elevate intensità. La magnitudo della zona è infatti derivata dalle magnitudo massime attribuite ai terremoti più significativi associati a questa zona

Sempre dal catalogo DISS3.1 sono riportate alcune sorgenti sismogenetiche, ed in particolare la sorgente ITIS107 in comune di Mirandola, che ha profondità variabile tra 3,9 km e 7,6 km, alla

quale è attribuita una intensità magnitudo di  $M_w = 5,9$  con tempi di ricorrenza tra 900-1800 anni, spostamento per evento di 0,45 metri e tasso annuo di scivolamento di 0,25 – 0,50 mm.

Un'ulteriore considerazione per la stima della pericolosità sismica riguarda l'accelerazione al suolo. Dalla mappa di Pericolosità Sismica dell'I.N.G.V., di riferimento alla OPCM 3519/06, le massime accelerazioni attese al suolo o P.G.A. (Peak Ground Acceleration), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferite a suoli di categoria A ( $V_{S30} > 800$  m/s, punto 3.2.2. del D.M. 14.01.2008), sono comprese tra  $0,100 \div 0,125g$ .

### 8.1. Spettro di risposta sismica locale

Per la valutazione della pericolosità derivante dalla sollecitazione sismica, vengono analizzati i parametri distintivi del sito in studio legati alla sua sismicità, oltre che all'identificazione di eventuali situazioni di pericolosità indotte dai fattori locali quali quelli geologici, geomorfologici e strutturali.

La valutazione degli Stati Limite in condizioni dinamiche (SLV e SLD) si basa sulla determinazione dell'azione sismica di progetto, la quale viene definita partendo dalla "**pericolosità di base**" secondo l'approccio "sito dipendente"; la pericolosità sismica del sito è funzione delle caratteristiche proprie del comparto in cui esso si inserisce e della struttura in progetto, pertanto occorre determinare i parametri sismici del sito, e conoscere la funzionalità e la tipologia della struttura.

La pericolosità sismica è relazionata alla accelerazione orizzontale massima **ag** in condizioni di campo libero su suolo rigido di categoria A ( $V_{S30} > 800$  m/s), con superficie topografica orizzontale, nonché in termini di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente **Se(T)**, con riferimento a prefissate probabilità che si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore determinato, per uno specifico periodo di riferimento **P<sub>VR</sub>**.

Le N.T.C. 2008 indicano che le forme spettrali vengano definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito
- $F_o$  : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- $T_C^*$  : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Si procede quindi con la localizzazione del sito di interesse, del quale si ricavano le coordinate geografiche che consentono di determinare la maglia di riferimento che permette di stabilire i valori dei parametri spettrali del punto, come media pesata dei valori nei vertici della maglia moltiplicati per le distanze dal punto. Per l'individuazione del punto e del reticolo di riferimento si è fatto uso del programma software Geostru PS Parametri sismici.

Nel dettaglio si riportano le coordinate geografiche del sito utili per la determinazione dei parametri spettrali ( $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C^*$ ) : Comune di Poggio Rusco – Via Carnevale

Sistema geodetico WGS84 : Latitudine : 44.970339    Longitudine : 11.117455

Essendo state ipotizzate, le assunzioni sul Tipo di costruzione e sulla Classe d'uso, si procede con l'indicazione di questi fattori fondamentali per il calcolo dei coefficienti sismici, che riguardano le

specificità delle opere da realizzare, come indicati nelle tabelle sottostanti:

| Tipo di costruzione | Classe d'Uso | Vita Nominale ( $V_N$ ) | Coefficiente d'Uso ( $c_u$ ) | Vita di Riferimento<br>$V_R = V_N * c_u$ |
|---------------------|--------------|-------------------------|------------------------------|--|
| 2                   | I            | 50                      | 0.7                          | 35                                       |

Relativamente alla struttura da realizzare, vengono considerati i dati relativi alle caratteristiche della costruzione, ed utilizzando il foglio di calcolo "SPETTRI-NTC" ver. 1.0.3, si ottengono i valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ , per i periodi di ritorno  $T_r$  associati allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e allo Stato Limite di Danno (SLD):

|  | Categoria di sottosuolo C<br>Categoria topografica T1 |       |
|--|---|-------|
| Stato Limite   | SLD   | SLV   |
| <b>Tr (anni)</b>   | 35  | 332   |
| <b>Ag (g)</b>  | 0.036   | 0.094 |
| <b>F<sub>0</sub></b>   | 2.584   | 2.575 |
| <b>Tc* (sec)</b>   | 0.242   | 0.286 |
| <b>S</b>   | 1.500   | 1.500 |
| <b>a<sub>gmax</sub> (m/sec<sup>2</sup>)</b>                      | 0,054   | 0,141 |
| <b>Spettro di risposta elastico in accelerazione orizzontale</b> |   |       |
| <b>T<sub>B</sub> (s)</b>   | 0.135   | 0.151 |
| <b>T<sub>C</sub> (s)</b>   | 0.406   | 0.454 |
| <b>T<sub>D</sub> (s)</b>   | 1.745   | 1.975 |

Dal processo di calcolo è risultato un valore di  **$a_{gmax} = 0,15g$** , per un Fattore di Amplificazione al sito di F.A. ( $PGA/PGA_0$ ) = 1,5.

## 8.2. Modello sismico locale

Dovendo progettare secondo le indicazioni del D.M. 14.01.2008, necessita valutare la categoria di sottosuolo del terreno di fondazione, così come definite al §3.2.2.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, nel documento relativo alle "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici" contenuto nell'Ordinanza n. 3274 del Presidente del Consiglio dei ministri del 20 Marzo 2003", si definiscono varie categorie di profilo stratigrafico del "suolo di fondazione" (A, B, C, D, E, S1, S2).

Risulta necessario, secondo il D.M. 14.01.2008, stabilire in quale categoria ricade il terreno di fondazione. A tal fine, in considerazione della tipologia degli interventi edilizi, lo scrivente ha ritenuto idoneo utilizzare i risultati di alcune indagini sismiche eseguite sul territorio comunale, consistite in prove MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). La metodologia MASW è una tecnica di indagine che fornisce il profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , basandosi sulla misura dei tempi di arrivo delle onde in corrispondenza di un prefissato numero di sensori posti sulla superficie del suolo.

Si precisa che le considerazioni sismiche dedotte da indagini eseguite esternamente al sito sono

indicative; nel caso specifico, vista la tipologia delle strutture in progetto, si ritengono sufficientemente idonee ad indicare la Risposta Sismica Locale.

I rilievi sismici hanno fornito valori della velocità delle onde di taglio mediate sulla profondità di 30 metri ( $V_{s30}$ ) comprese tra  $V_{s30} = 194 \div 220 \text{ m/s}$ .

Dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso da dati pregressi, sulla stima dell'andamento delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 metri sotto al piano di fondazione, nonché dalla ricostruzione della successione litologica che caratterizza il sito, si ritiene di poter inscrivere l'area oggetto di studio nella **Categoria C** "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 e 360 m/s".

### 8.3. Verifica alla liquefazione

Per quanto indicato nel D.M. 14.01.2008 e nella O.P.C.M. 3274/03, è necessario effettuare la verifica della suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limoso argillosa.

Dall'analisi dei potenziali fattori che portano alla liquefazione, cioè la granulometria, la profondità del livello liquefacibile, il grado di addensamento dei terreni, in linea generale si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti costituiti da sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile dallo 0 al 25%, che si trovano sotto falda, e sono da poco a mediamente addensati, che vengono a trovarsi a profondità relativamente basse (di solito inferiori a 15 metri).

Al fine è stata utilizzata la procedura semplificata originariamente sviluppata da *Seed & Idriss (1971)* per la determinazione dello sforzo di deformazione CSR (Cyclic Stress Ratio) indotto dal sisma, e da *Robertson et al (1997-1998-2009)*, per la determinazione della capacità di resistenza del terreno alla liquefazione CRR (Cyclic Resistance Ratio), riferita ad un sisma di magnitudo  $M_w = 7.5$ . La valutazione della resistenza alla liquefazione CRR è determinata sulla base dei valori di resistenza alla punta, ottenuti dalle prove penetrometriche statiche opportunamente normalizzati.

Il potenziale di liquefazione si ottiene eseguendo il calcolo del fattore di sicurezza  $FS_L$ , definito dal rapporto CRR su CSR, scalato con un opportuno fattore di scala MSF. La verifica a liquefazione è condotta in condizioni di free-field, cioè di piano campagna orizzontale ed in assenza di sforzi di taglio antecedenti il sisma (fattori  $K_a$  e  $K_\sigma$  del metodo di Robertson assunti pari a 1)

Il metodo utilizzata permette di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso il confronto tra le caratteristiche granulometriche e di addensamento del deposito, espresse dai valori della resistenza penetrometrica  $q_c$  normalizzati, con lo sforzo tagliante indotto dal sisma (CRR e CSR); i valori vengono ottenuti mediante le seguenti relazioni:

$$CSR = 0,65 \cdot (a_{\max} / g) \cdot (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) \cdot r_d \quad \text{Seed \& Idriss (1971)}$$

$$CRR_{7.5} = 0,833 \cdot [(Q_{tn})_{CS} / 1000] + 0,05 \quad (Q_{tn})_{CS} \leq 50 \quad \text{Robertson et al. (1997, 1998, 2009)}$$

$$CRR_{7.5} = 93 \cdot [(Q_{tn})_{CS} / 1000]^3 + 0,08 \quad 50 \leq (Q_{tn})_{CS} \leq 160$$

dove:  $Q_{tn}$  = resistenza penetrometrica normalizzata secondo il metodo iterativo (Robertson, 2009)

$(Q_{tn})_{CS} = K_c \cdot Q_{tn}$ , dove  $K_c$  è fattore di correzione del contenuto di fine, la cui stima è dipendente dal valore dell'indice  $I_c$

$a_{max}$  = accelerazione sismica di picco al piano campagna

$g$  = accelerazione di gravità

$\sigma_{vo}$  = pressione litostatica totale

$\sigma'_{vo}$  = pressione litostatica efficace

$r_d$  = fattore di riduzione della rigidità con la profondità, dalla correlazione di Youd (2001)

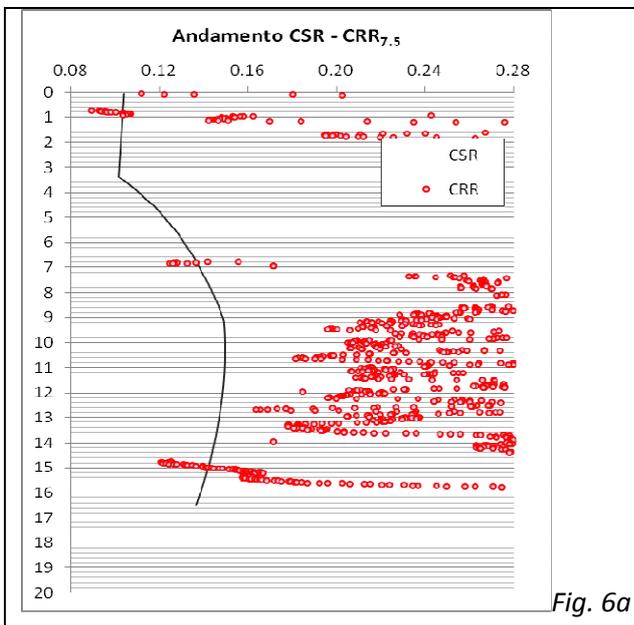
Il valore di  $CSR_{7,5}$  così ottenuto si riferisce ad eventi sismici di magnitudo  $M$  pari a 7,5; diversi studio hanno portato ad un fattore di scala per la magnitudo sismica, denominato MSF.

Per la correzione del fattore MSF si è fatto riferimento a quanto proposto dal Youd et al. (2001), per Magnitudo  $\leq 7,5$ .

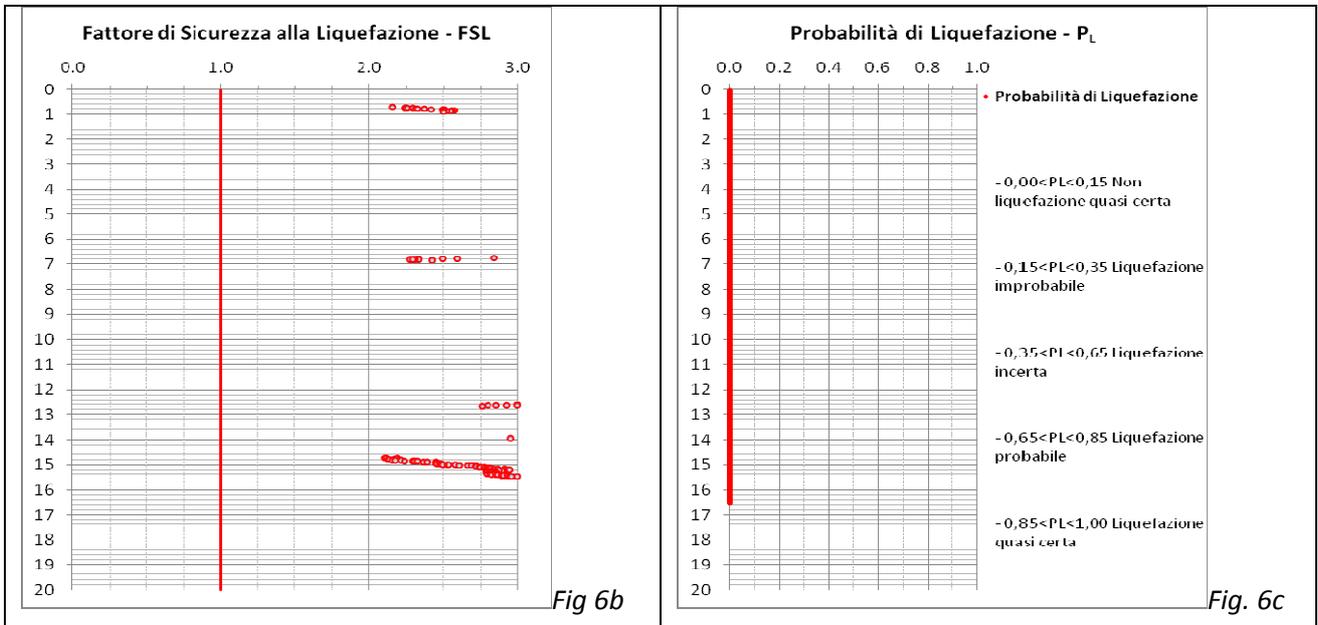
Si può verificare il fattore di sicurezza del potenziale alla liquefazione con la relazione:

$$FS_L = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} * MSF$$

Con riferimento a quanto riportato nella Relazione sulla pericolosità sismica, per le verifiche a liquefazione si può assumere una magnitudo di riferimento  $M_w = 5,5$ , mentre per il valore dell'accelerazione di picco massima attesa in superficie  $a_{max}$  si fa riferimento al valore di  $a_{max} = 0,16g$  quale valore fornito dalle mappe di scuotimento.



I risultati delle verifiche sono mostrati nelle figure seguenti. Nella figura 6a è riportato l'andamento con la profondità del rapporto di sollecitazione ciclica CSR e di resistenza ciclica dei terreni granulari  $CRR_{7,5}$ , riferito alla magnitudo di 7.5. Nella figura 6b è riportato l'andamento del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione, nella figura 6c è diagrammato l'andamento del Potenziale di Liquefazione per ciascun dato rilevato dalla prova CPTu1.



La Circolare n. 617/2009 indica che la sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere valutata e motivata dal progettista; a differenza della precedente O.P.C.M. n.3274/2003, in cui veniva espressamente indicato un fattore di sicurezza pari a 1.25 per i fenomeni di liquefazione, la normativa vigente non obbliga all’assunzione di un determinato coefficiente di sicurezza. Nelle valutazioni qui condotte, si è scelto un valore limite del fattore di sicurezza pari ad 1, che costituisce la soglia al di sotto del quale il fenomeno accade, senza applicare ulteriori margini di sicurezza.

Come si osserva nella fig. 6b non si hanno situazioni in cui il  $FS_L$  è inferiore ad 1, per le condizioni di pericolosità sismica assunte. La Probabilità di Liquefazione è sostanzialmente “non quasi certa”.

## 9. CONCLUSIONI

Le indagini ed i rilievi effettuati hanno permesso di determinare le caratteristiche stratigrafiche, litologiche, geotecniche ed idrogeologiche dell’area cimiteriale di Poggio Rusco oggetto di Piano Regolatore Cimiteriale.

L’area cimiteriale è sostanzialmente caratterizzata da un intervallo di superficie costituito da sedimenti a tessitura fine e moderatamente fine di natura argillosa, argilloso limosa e limoso argillosa, con intercalazioni di strati limoso sabbiosi, sino alla profondità variabile tra 13,90 ÷ 14,70 metri, ai quali seguono sedimenti sabbiosi e sabbioso limosi.

Nella porzione superficiale i suoli differiscono tra la zona nord, ove vi è uno strato di superficie prevalentemente limoso sabbioso, da quella della zona sud, ove vi sono sedimenti prevalentemente argilloso limosi. Dal sondaggio eseguito per l’installazione del piezometro P1 e dalla prove di laboratorio per la caratterizzazione litologica, si è potuto constatare la presenza di sedimenti limoso argilloso sabbiosi e limoso sabbiosi entro i primi 2,30 metri a garanzia della compatibilità dei suoli con la scheletrizzazione.

Per quanto concerne le caratteristiche di permeabilità, sono state effettuate prove di permeabilità in pozzetto superficiale e prove di dissipazione in situ mediante piezocono. Da quanto, è emersa

che i suoli superficiali, posseggono permeabilità bassa con valori compresi tra  $10^{-5} \div 10^{-8}$  m/s.

Dai rilievi della falda al momento delle esecuzione delle indagini in sito e dal monitoraggio eseguito, si è constatato un livello di falda freatica variabile tra -3,30 metri da p.c. a -2,60 metri da p.c.; tali quote di falda si possono ritenere compatibili con le normative vigenti.



# ALLEGATI

DIAGRAMMI DI PROVA

RAPPORTO DI ANALISI GRANULOMETRICA