



Comune di
VANZAGHELLO
(MILANO)

**STUDIO DI CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA,
IDROGEOLOGICA E GEOTECNICA A SUPPORTO DEL
PIANO CIMITERIALE COMUNALE AI SENSI DELLA
L.R. 30 DICEMBRE 2009 N. 33 E DEL REGOLAMENTO
REGIONALE N. 6 DEL 9 NOVEMBRE 2004 E S.M.I.**

Sommario

| | |
|--|-----------|
| 1. PREMESSA | 3 |
| 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO IDROGEOLOGICO | 4 |
| 2.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA | 4 |
| 2.2 UNITÀ IDROGEOLOGICHE DI SOTTOSUOLO | 4 |
| 2.3 PIEZOMETRIA DELL'ACQUIFERO SUPERIORE E RELATIVE ESCURSIONI | 5 |
| 2.4 VULNERABILITÀ INTRINSECA DEGLI ACQUIFERI | 7 |
| 3. STATO DEI LUOGHI E CARATTERISTICHE DELLE AREE DI AMPLIAMENTO CIMITERIALE | 9 |
| 4. INDAGINI GEOGNOSTICHE E CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO- TECNICA DEI TERRENI..... | 11 |
| 4.1 METODOLOGIA DI LAVORO E SPECIFICA DELLE INDAGINI | 11 |
| 4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEI TERRENI..... | 13 |
| 4.3 CALCOLO DELLA RESISTENZA DI PROGETTO | 15 |
| 4.4 CALCOLO DEI CEDIMENTI..... | 16 |
| 4.5 COEFFICIENTE DI REAZIONE DEL SOTTOFONDO DI WINKLER..... | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 5. IDONEITA' DEI TERRENI ALL'INUMAZIONE | 19 |
| 6. GESTIONE DELLE ACQUE IN FASE DI REALIZZAZIONE E DI FUNZIONAMENTO..... | 23 |
| 7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE | 24 |

Allegati

- Allegato 1 - Grafici prove penetrometriche
- Allegato 2 - Schede monografiche trincee con escavatore
- Allegato 3 - Risultati prove di laboratorio

Tavole

- Tav. 1 - Inquadramento idrogeologico – scala 1:10.000 e 1:25.000
- Tav. 2 - Progetto ed ubicazione delle indagini – scala 1:500

1. PREMESSA

L'Amministrazione Comunale di Vanzaghello (MI), ai sensi dell'art. 75 comma 2 della l.r. 30 dicembre 2009 n. 33 "*Testo unico delle leggi regionali in materia di sanità*" e dell'art. 6 comma 1 del Regolamento Regionale 9 novembre 2004 n. 6 "*Regolamento in materia di attività funebri e cimiteriali*" e s.m.i., ha promosso la redazione di uno studio per il Piano Regolatore Cimiteriale, nel quale è stata valutata la necessità di prevedere l'ampliamento del cimitero esistente situato tra la via Matteotti e la Via Po, per soddisfare il fabbisogno di sepolture stimato per i prossimi anni.

Come previsto dal Regolamento Regionale 9 novembre 2004 n. 6, così come modificato dal Regolamento Regionale n. 1 del 6/02/2007, il Piano Regolatore Cimiteriale deve essere supportato da uno studio di compatibilità geologica per la caratterizzazione dei terreni che dovrebbero essere interessati dalle opere di ampliamento.

Pertanto, su incarico dell'Amministrazione Comunale, lo Scrivente Studio Idrogeotecnico ha effettuato un'indagine geognostica per la caratterizzazione di tali terreni.

In particolare, la presente relazione contiene:

- l'inquadramento geologico ed idrogeologico del territorio in esame, con particolare riferimento alla classificazione delle strutture idrogeologiche, della relativa vulnerabilità, alla soggiacenza della falda e direzione locale del flusso idrico;
- la caratterizzazione litologica e stratigrafica dei terreni nelle aree di previsto ampliamento cimiteriale, definita tramite indagini dirette in sito (assaggi con escavatore per descrizione litologica e campionamento dei terreni, prove penetrometriche dinamiche per la caratterizzazione geotecnica dei terreni) e prelievo di campioni per analisi di laboratorio;
- valutazioni in ordine alla permeabilità dei terreni superficiali e di idoneità all'inumazione a terra;
- indicazioni per la gestione delle acque meteoriche nel sito di ampliamento.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

2.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Il territorio comunale di Vanzaghello, sito nella porzione centro-occidentale della Provincia di Milano confinante la Provincia di Varese, è collocato in un contesto di media pianura caratterizzata da morfologie legate a deposizione fluvioglaciale e fluviale di età quaternaria.

L'assetto morfologico del territorio risulta omogeneo, essendo costituito principalmente dall'estesa piana fluvioglaciale che si è formata nel Pleistocene medio-superiore durante il ritiro del Ghiacciaio del Verbano, episodio testimoniato dalla presenza dei depositi appartenenti all'Allogruppo di Besnate.

La porzione di piana sulla quale insiste il comune di Vanzaghello risulta leggermente digradante verso Sud con quote variabili tra 210 e 185 m s.l.m..

Il settore sud-occidentale del territorio comunale, in prossimità del confine con l'impianto di depurazione di S. Antonino Ticino (ubicato in comune di Lonate Pozzolo), è interessato da un breve tratto (circa 400m) dell'unico corso d'acqua presente nel territorio comunale, rappresentato dal torrente Arno, che scorre all'interno di un canale artificiale, di recente costruzione, che ha sostituito il vecchio alveo.

Dal punto di vista geologico, il territorio è caratterizzato dalla presenza dei depositi appartenenti all'Allogruppo di Besnate (*Pleistocene medio - Pleistocene superiore*), costituiti da depositi fluvioglaciali con un profilo di alterazione da poco a mediamente evoluto (lo spessore può raggiungere anche i 400 cm). Litologicamente essi comprendono ghiaie a prevalente supporto di matrice sabbiosa, raramente di clasti, organizzate più o meno grossolanamente in livelli a diversa granulometria.

Sono localmente presenti strutture sedimentarie indicanti un ambiente di deposizione fluvioglaciale ad energia medio-alta: stratificazione pianoparallela orizzontale o incrociata. I clasti sono poligenici, eterometrici da arrotondati a subarrotondati; quando alterati si presentano decarbonatati, se di litologia carbonatica, o parzialmente arenizzati, se di litologia cristallina.

2.2 UNITÀ IDROGEOLOGICHE DI SOTTOSUOLO

L'andamento delle unità idrogeologiche del sottosuolo è visualizzato nelle sezioni di Tav. 1, orientate secondo direzioni E-W e N-S, in modo da definire la distribuzione orizzontale e verticale dei corpi litologici e l'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero superficiale libero.

Le unità riconosciute sono di seguito descritte, dalla più superficiale alla più profonda:

3 - Unità delle ghiaie e sabbie

E' presente con continuità nel sottosuolo dell'area di Vanzaghello ed è costituita da depositi di ambiente continentale in facies fluvioglaciale/fluviatile braided, aventi spessori variabili da 60 a 80÷90 m.

L'unità è caratterizzata da sedimenti ghiaioso-sabbiosi, localmente cementati, con sporadiche intercalazioni limoso-argillose, che diventano frequenti verso Est. Tali sedimenti sono sede dell'acquifero superiore di tipo libero, caratterizzato da un'elevata permeabilità primaria, tradizionalmente utilizzato dai pozzi di captazione a scopo idropotabile di vecchia realizzazione e da pozzi privati; la soggiacenza si attesta tra 30-35 m da p.c.

2 - Unità delle alternanze argilloso-ghiaiose

E' costituita da depositi di ambiente transizionale in facies fluviale e lacustre, aventi spessori variabili da 60 a 80 m.

L'unità è caratterizzata da alternanze di ghiaie sabbiose e limi e limi argillosi, con locale presenza di orizzonti torbosi privi di continuità areale. Tali sedimenti sono sede di acquiferi intermedi di tipo confinato nei livelli permeabili, la cui vulnerabilità è mitigata dalla presenza a tetto di strati argillosi arealmente continui, ma non sono da escludere collegamenti ed alimentazione da parte dell'acquifero libero superiore ad alta vulnerabilità.

Gli acquiferi dell'unità vengono captati singolarmente dai pozzi 4 e 5 (alla data del presente studio non ancora collegato alla rete acquedottistica) di Vanzaghello e dai pozzi 1, 3 e 4 del limitrofo comune di Magnago. Negli altri pozzi profondi pubblici del territorio, gli acquiferi dell'unità vengono captati congiuntamente alle falde superiori dell'unità 3.

1 - Unità delle argille prevalenti

E' costituita da depositi di ambiente marino caratterizzati da sedimenti argillosi e limosi debolmente sabbiosi di colore grigio-azzurro spesso fossiliferi; sono presenti sporadiche intercalazioni ghiaioso-sabbiose contenenti falde di tipo confinato a bassissima vulnerabilità e di scarsa produttività.

2.3 PIEZOMETRIA DELL'ACQUIFERO SUPERIORE E RELATIVE ESCURSIONI

La morfologia della superficie piezometrica dell'acquifero superiore al settembre 2014 è basata sull'elaborazione dei dati di soggiacenza rilevati in occasione di apposite campagne di misurazioni eseguite su pozzi pubblici, pozzi privati e piezometri del territorio (Tav. 1).

I pozzi/piezometri interessati dalle misure captano l'acquifero libero contenuto nell'unità idrogeologica superiore (2) entro 100-120 m di profondità.

I dati utilizzati sono stati preliminarmente interpolati tramite l'utilizzo di software dedicato (Surfer), secondo il sistema di interpolazione dei dati "*Kriging*".

Nel territorio di Vanzaghello, la morfologia della superficie piezometrica evidenzia una falda radiale divergente con componenti del flusso idrico sotterraneo mediamente orientate NE-SW, con quote comprese tra 180 e 160 m s.l.m. ed un gradiente idraulico variabile dal 5 al 3 ‰, andando verso Sud.

La dinamica nel tempo delle variazioni della superficie piezometrica è illustrata dal grafico di Figura 2-1 ottenuto dall'unione della serie dei dati del pozzo C.A.P. 002 di Vanzaghello (Via Roma II) nel periodo 1980 - 2002 con i dati del piezometro superficiale CAP 020 pertinente al pozzo 004 (C.na La Fogna), sempre di Vanzaghello, nel periodo 1999-2014 (ultimo dato disponibile), opportunamente estrapolati sulla base del confronto tra massimi e minimi rispettivi delle due serie; tale rappresentazione evidenzia in modo dettagliato le oscillazioni piezometriche stagionali in tutto il periodo considerato (dal 1980 al 2014).

Sono state, inoltre, graficizzate le rilevazioni piezometriche nel piezometro Cava F.lli Mara e nel pozzo 2 delle Cave di Lonate Pozzolo (dati resi disponibili dal Comune di Lonate Pozzolo nell'ambito della redazione della Componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT).

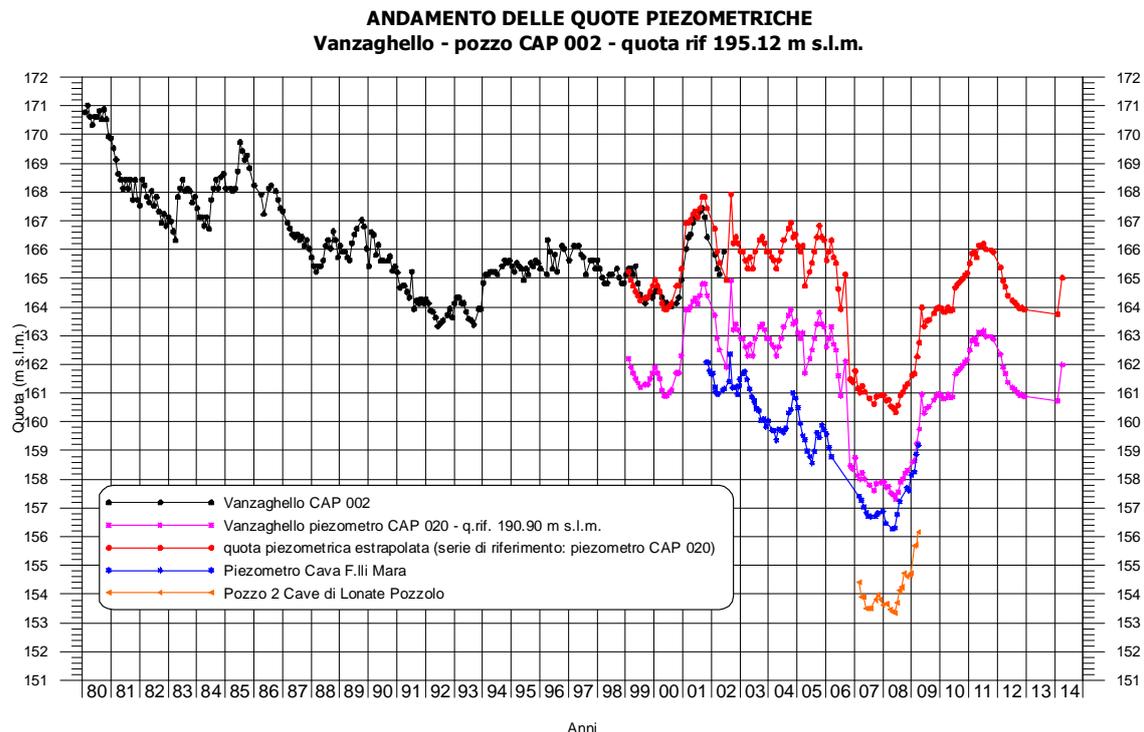


Figura 2-1 – Andamento delle quote piezometriche

Durante il periodo investigato (1980÷2014) si registra un massimo piezometrico relativo all'anno 1980 che ha interessato l'intera pianura milanese fin dal 1978 e causato dalle abbondanti precipitazioni del 1976-1977.

Dopo il 1980 si registra una generale tendenza all'abbassamento delle quote piezometriche che evidenzia l'instaurarsi di un periodo di magra, che ha avuto il suo apice nel mese di maggio 1992, in cui la falda raggiunge i 31.8 m di profondità, con approfondimento piezometrico rispetto al 1980 pari a circa 8 m.

Dalla seconda metà del 1992, a seguito di un moderato aumento delle precipitazioni medie, si assiste ad un sensibile recupero delle quote piezometriche medie; l'andamento successivo evidenzia un moderato decremento delle quote piezometriche tra il 1997 e il giugno 2000 (circa 2 m), seguito dal picco piezometrico relativo del maggio/giugno 2001. La serie di misure successive nel piezometro 020 evidenzia una iniziale decrescita fino al maggio 2002, seguita poi da un trend medio di stabilità fino alla prima metà del 2006. Le rilevazioni relative al periodo successivo evidenziano, a partire dalla seconda metà del 2006 fino alla prima metà del 2008, un nuovo abbassamento dei livelli di falda, dovuto alle scarse precipitazioni che hanno caratterizzato il regime pluviometrico più recente.

Le misure successive, mostrano un trend in risalita di circa 5 m rispetto al minimo relativo sopradescritto, culminato nel 2011, a cui segue una nuova decrescita fino a tutto il 2013.

2.4 VULNERABILITÀ INTRINSECA DEGLI ACQUIFERI

La vulnerabilità intrinseca di un acquifero esprime una caratteristica idrogeologica che indica la facilità con cui un inquinante generico, idroveicolato, a partire dalla superficie topografica raggiunge la falda e la contamina.

Nella definizione del grado di vulnerabilità intrinseca è stato utilizzato il Metodo della Legenda Unificata, messo a punto da Civita M. (1990) nell'ambito del progetto VAZAR (Vulnerabilità degli acquiferi ad alto rischio) del CNR. Ad esso sono state applicate alcune modifiche per adattarlo alla situazione locale.

La vulnerabilità intrinseca di un'area viene definita principalmente in base alle caratteristiche ed allo spessore dei terreni attraversati dalle acque di infiltrazione (e quindi dagli eventuali inquinanti idroveicolati) prima di raggiungere la falda acquifera, nonché dalle caratteristiche della zona satura. Essa dipende sostanzialmente da quattro fattori che, per il territorio considerato, sono così definiti:

1. caratteristiche di permeabilità della zona non satura: la protezione della falda è condizionata dallo spessore e dalla permeabilità dei terreni soprafalda e dalla presenza di suoli e livelli argillosi in superficie.

Nel caso in esame la parte inferiore della zona non satura è caratterizzata da depositi ghiaiosi e sabbiosi che non offrono garanzie di protezione a causa dell'elevata permeabilità, mentre la parte superiore è rappresentata dalle unità

quaternarie in affioramento caratterizzate da diverso spessore e tipologia di sequenze sommitali fini che rappresentano i livelli più importanti di protezione della falda.

Il grado di vulnerabilità di ciascuna area è quindi condizionato dalla presenza, in affioramento o nel sottosuolo delle unità stratigrafiche riconosciute nel rilevamento dei depositi quaternari di superficie, con la taratura basata sui dati stratigrafici dei pozzi e dei sondaggi presenti nell'area.

In particolare, nel territorio di Vanzaghello sono presenti depositi fluvioglaciali poco o mediamente alterati con copertura superficiale generalmente ridotta ai quali è stato attribuito un grado di vulnerabilità elevato/alto, e depositi di esondazione privi di coperture superficiali ai quali è stato attribuito un grado di vulnerabilità alto.

2. soggiacenza della falda libera: i valori di soggiacenza sono compresi tra 30 e 35 m da p.c..
3. caratteristiche idrogeologiche dell'unità acquifera: l'unità che ospita l'acquifero principale è caratterizzata da elevata permeabilità primaria e dall'assenza di livelli continui di sedimenti fini, eventualmente limitanti la diffusione di inquinanti idroveicolati.
4. presenza di corpi idrici superficiali: in caso di presenza di corsi d'acqua sospesi rispetto alla superficie piezometrica, vi è la possibilità di ingressione diretta in falda di acque superficiali in ragione del loro ruolo di alimentazione.

In sintesi, l'area di affioramento dell'Allogruppo di Besnate, è caratterizzata dalla presenza di un acquifero di tipo libero, in materiale alluvionale, protetto superficialmente da depositi fluvioglaciali mediamente alterati (Allogruppo di Besnate). La soggiacenza è ≥ 30 m.

*Grado di vulnerabilità: **alto**.*

3. STATO DEI LUOGHI E CARATTERISTICHE DELLE AREE DI AMPLIAMENTO CIMITERIALE

L'area cimiteriale di Vanzaghello è situata al margine del settore settentrionale del centro abitato, tra via Matteotti, via Po e via Silvio Pellico, ad una quota di 198 m s.l.m..

Essa è dotata di due ingressi, il principale ubicato lungo via Matteotti ed il secondario presso via Po.

La porzione meridionale "antica" del cimitero, come osservabile nella seguente Figura 3-, ospita i campi tombe a terra, con al centro la cappella monumentale ed alcune cappelle gentilizie, dislocate lungo il bordo perimetrale sud-occidentale.

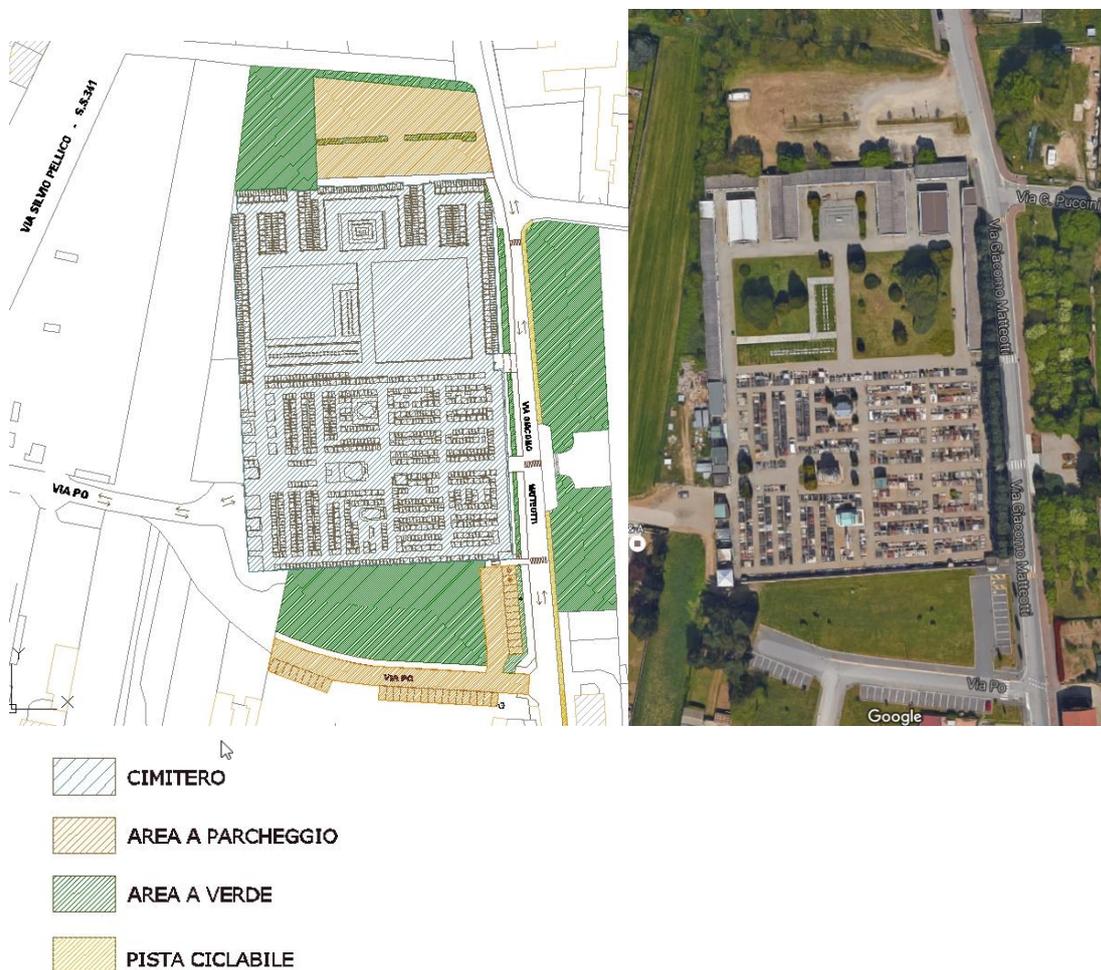


Figura 3-1 – Andamento delle quote piezometriche

La porzione di cimitero denominata "ampliamento" comprende cappelle gentilizie lungo i tre lati ed un portico a ferro di cavallo con colombari a ridosso del bordo più settentrionale. La parte centrale di tale settore è caratterizzata dalla presenza di due

grandi aree quadrate, attualmente destinate a verde, ad eccezione della porzione inferiore del settore occidentale, già destinato a "tombe a terra in campo giardino".

Il progetto del Piano regolatore cimiteriale prevede (Tav. 2):

- l'ampliamento del cimitero in corrispondenza del bordo occidentale, a monte di via Po, creando una nuova area di forma triangolare in cui realizzare nuovi colombari e due aiuole a verde. Tale area attualmente è utilizzata come deposito comunale, con presenza di rimesse in lamiera, cartelli stradali e cumuli di materiale vario (terreno, legname, macerie);
- la realizzazione di nuove strutture in corrispondenza delle aiuole a verde interne al cimitero esistente, comprendenti:
 - tombe a terra con tumulazione sotterranea (profondità -3.0 m da p.c.);
 - giardino delle rimembranze cinerario comune;
 - campo comune.

4. INDAGINI GEOGNOSTICHE E CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEI TERRENI

4.1 METODOLOGIA DI LAVORO E SPECIFICA DELLE INDAGINI

Al fine di ottenere i parametri necessari per la caratterizzazione geotecnica e litologica dei terreni interessati dalle opere in progetto in data 23 maggio 2016 è stata condotta una specifica campagna di indagini in sito, consistenti in n. 3 assaggi con escavatore a partire dal piano campagna e relativo campionamento dei terreni esplorati per analisi di laboratorio, unitamente a n. 2 prove penetrometriche dinamiche continue SCPT.

Prova penetrometrica dinamica continua (SCPT)

La prova penetrometrica standard (Standard Cone Penetration Test) consiste nel misurare il numero di colpi necessario ad infiggere per 30 cm nel terreno una punta conica collegata alla superficie da una batteria di aste (Figura 4- e Figura 4-).

Le misure vengono fatte senza soluzione di continuità a partire dal piano campagna; ogni 30 cm di profondità si rileva, perciò, un valore del numero di colpi necessario all'infissione.

Caratteristiche tecniche:

- altezza di caduta della mazza: 75 cm;
- peso della mazza: 73 kg;
- punta conica: conicità 60°, $\phi = 51$ mm;
- aste: $\phi = 34$ mm.

Il risultato viene dato in forma di grafico, con una linea rappresentante la resistenza che il terreno ha opposto alla penetrazione alla punta (RP) (Allegato 1).

Il piano di inizio indagini coincide con il piano stradale di via Po.

Le prove penetrometriche sono state spinte fino a rifiuto strumentale, raggiunto tra - 9,5 e - 10 metri dal piano strada.

Le quote sui grafici di penetrazione sono riferite al piano di inizio delle indagini e non allo "zero" di progetto.

Durante l'esecuzione delle prove non è stato rilevato il livello della falda freatica, che in questa zona si attesta generalmente ad una profondità uguale o superiore a 30 metri dal p.c..



Figura 4-1 - Esecuzione della prova penetrometrica P1



Figura 4-2 - Esecuzione della prova penetrometrica P2

Trincee mediante escavatore

Per la caratterizzazione litologica dei terreni, sono stati eseguiti mediante escavatore a benna rovescia n. 3 assaggi esplorativi, denominati T1, T2 e T3, che hanno raggiunto la profondità massima di quasi 3 m dal p.c. attuale, la cui ubicazione è visibile in Tav. 2.

Per ogni punto di indagine è stata fatta una descrizione litologica, corredata dalla relativa documentazione fotografica. In Allegato 2 sono riportate tutte le schede monografiche delle trincee.

Per ciascuno scavo, sono stati prelevati n. 2 campioni rappresentativi (per un numero complessivo di n. 6 campioni), alle profondità indicate nelle schede monografiche, al fine di caratterizzare la granulometria del materiale mediante determinazioni granulometriche di laboratorio (Allegato 3) e valutare indirettamente i valori di permeabilità dei terreni.

Al termine delle procedure di campionamento e descrizione stratigrafica, gli scavi sono stati accuratamente ritombati con lo stesso materiale.

Alla data di esecuzione dei sondaggi (23 maggio 2016), i terreni attraversati negli scavi hanno presentato evidenze di umidità da ricondursi alle precipitazioni meteoriche che hanno interessato il territorio nei giorni precedenti le indagini. Non si è riscontrata la presenza di venute d'acqua o falde sospese fino alla profondità di scavo.

4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEI TERRENI

Le prove penetrometriche effettuate hanno rilevato un andamento geo-meccanico omogeneo: dal piano di inizio indagini a circa - 4,5/5 metri, il terreno è costituito da sabbia e ghiaia in matrice limosa, aventi un grado di consistenza scarso; da tale profondità al termine delle prove (- 9,5/10 metri), è presente ghiaia sabbiosa ben addensata.

I parametri geotecnici indicati nel seguito sono stati ottenuti indirettamente, mediante correlazioni empiriche, a partire dai risultati delle prove penetrometriche.

I valori adottati come rappresentativi delle caratteristiche geotecniche dei terreni investigati sono quelli consigliati da diversi Autori (Peck, Hanson e Thornburn, 1953; K. Terzaghi e R.B. Peck, 1976; G. Sanglerat, 1979; J.E. Bowles, 1982) e sono stati definiti in modo moderatamente cautelativo.

I valori delle resistenze all'avanzamento delle prove penetrometriche dinamiche sono stati correlati ai valori di N_{SPT} , utilizzati per la valutazione dei parametri di resistenza e deformabilità, mediante la seguente relazione:

$$N_{spt} = 1,5 \times N_{scpt}$$

I valori di resistenza alla penetrazione dinamica ricavati dalle prove in sito sono stati normalizzati in funzione della profondità, del tipo di attrezzatura utilizzata e della caratteristiche granulometriche generali dei terreni, secondo la seguente equazione:

$$N'(60) = N_{SPT} \times 1.08 \times Cr \times Cd \times Cn$$

dove: **N'(60)** = valore di resistenza normalizzato

Cr = fattore di correzione funzione della profondità

Cd = fattore di correzione funzione del diametro del foro

Cn = fattore di correzione funzione della granulometria del terreno

1.08 = valore di correzione funzione delle caratteristiche di restituzione dell'energia sviluppata dall'attrezzatura

La stima del valore della densità relativa (D_r) è stata eseguita secondo le equazioni proposte da Skempton (1986):

$$D_r \cong \sqrt{N_{60}/60}$$

La valutazione del valore dell'angolo d'attrito mobilizzabile, in termini di sforzi efficaci, è stata effettuata sulla base delle correlazioni proposte da Shmertmann, 1977.

Sono state quindi riconosciute due unità geotecniche, suddivise per spessore e aventi le seguenti caratteristiche meccaniche:

• **Dal piano di inizio prove a circa – 4,5/5 metri**

$$N_{SPT} = 7$$

$$\Phi = 28^\circ$$

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$D_r = 25 \%$$

• **Da circa – 4,5/5 metri a fine prove (-9,5/10 metri)**

$$N_{SPT} = 30$$

$$\Phi \cong 35^\circ$$

$$\gamma \cong 19 \text{ kN/m}^3$$

$$D_r = 70 \%$$

N.B.: N_{SPT} □ numero colpi/30 cm □
 Φ □ angolo di attrito del materiale;
 γ □ □ peso di volume
 D_r □ densità relativa

Secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche, tali parametri meccanici devono essere trattati in maniera statistica, adottando valori a cui sia associata una probabilità di superamento non superiore a 5% (2.3 – NTC2008), ottenendo parametri definiti "caratteristici". Nel nostro caso appare giustificato il riferimento a valori medi, vista l'omogeneità delle prove.

| profondità | Φ nominale (da prove) | Φ_k (caratteristico) |
|--------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0 m – 4,5/5 m | 28° | 28° |
| 4,5/5 m – 9,5/10 m | 35° | 35° |

4.3 CALCOLO DELLA RESISTENZA DI PROGETTO

Per il calcolo della resistenza di progetto R_d , la normativa impone l'utilizzo di coefficienti parziali riduttivi, da applicare ai valori caratteristici dei parametri meccanici del terreno, secondo due approcci (6.4.2.1 – NTC2008).

Le verifiche devono essere effettuate nei confronti dei seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO) e SLU di tipo strutturale (STR), accertando che la condizione $E_d \leq R_d$, dove E_d è il valore di progetto dell'azione e R_d è il valore di progetto di della resistenza del sistema geotecnico.

La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Si è scelto di utilizzare l'approccio 2, dove è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.

Approccio 2: (azioni A1 + materiali M1 + resistenze R3)

I coefficienti parziali dei parametri di resistenza del terreno (M) sono unitari e la resistenza globale del sistema (R) è ridotta tramite il coefficiente del gruppo R3, pari a 2,3.

Una volta conosciuti ed elaborati i parametri geotecnici, calcoliamo la resistenza di progetto; la valutazione è eseguita sulla base dell'equazione proposta da Brinch-Hansen (1970); l'equazione adottata, nella sua forma più generale, è la seguente:

$$R_k = 0.5 \cdot B \cdot N_s \cdot d_s + c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q$$

dove:

| | | |
|-----------------------|---------|---|
| R_k | [kPa] | = resistenza allo stato limite ultimo; |
| \square | [kN/mc] | = peso di volume; |
| B | [m] | = larghezza della fondazione; |
| c | [kPa] | = coesione; |
| q | [kPa] | = $\square \times D$ = sovraccarico dovuto al rinterro; |
| D | [m] | = profondità di incasso della fondazione; |
| N_γ, N_c, N_q | [-] | = fattori di capacità portante; |
| S_\square, s_c, s_q | [-] | = fattori forma; |
| d_\square, d_c, d_q | [-] | = fattori profondità. |

Alla quota di imposta considerata, ossia - 3,50 metri dal piano di inizio indagini, i risultati ottenuti sono

Approccio 2: $R_k = 531$ kPa

Per il calcolo del valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico, l'approccio impone il coefficiente parziale $R_3 = 2,3$.

Ne consegue che la resistenza di progetto R_d che non deve essere superata dalle azioni di progetto E_d è:

Approccio 2: $R_d = 231$ kPa ($>E_d$)

Per il calcolo dei cedimenti, prendiamo in considerazione il carico di esercizio (Stato Limite di Esercizio), ovvero considerando le azioni non amplificate dai coefficienti A_1 . Dividiamo quindi il valore di progetto R_d per il valore medio dei coefficienti di amplificazione delle azioni (A_1), che, nel caso dell'approccio considerato, possiamo quantificare in **1,4**. Verificheremo quindi i cedimenti per una pressione sul terreno da parte delle fondazioni pari a circa

$$\mathbf{SLE = 165 \text{ kPa.}}$$

4.4 CALCOLO DEI CEDIMENTI

Per il calcolo dei cedimenti è stato utilizzato il metodo di Burland & Burbidge, basato su un'analisi statistica di oltre 200 casi reali, comprendenti fondazioni di dimensioni variabili tra 0.8 e 135 m.

L'espressione per il calcolo dei cedimenti è la seguente:

$$s = f_s \cdot f_H \cdot f_t \cdot \left[\sigma'_{vo} \cdot B^{0.7} \cdot \frac{I_c}{3} + (q' - \sigma'_{vo}) \cdot B^{0.7} \cdot I_c \right],$$

dove: q' = pressione efficace lorda (kPa),

σ'_{vo} = tensione verticale efficace agente alla quota di imposta della fondazione (kPa),

B = larghezza della fondazione (m),

I_c = indice di compressibilità,

f_s, f_H, f_t = fattori correttivi che tengono conto rispettivamente della forma, della spessore dello strato compressibile e della componente viscosa dei cedimenti.

I valori dei cedimenti forniti dall'equazione sopra esposta sono espressi in mm.

Il valore medio di I_c è dato da:

$$I_c = \frac{1.706}{N_{AV}^{1.4}},$$

dove N_{AV} rappresenta la media dei valori N_{SPT} all'interno di una profondità significativa, z_i , deducibile da dati tabulati da Burland & Burbidge (1984) e reperibili in letteratura tecnica.

Se lo strato compressibile ha uno spessore H inferiore ai valori di z_i , nell'equazione per il calcolo del cedimento se ne tiene conto tramite il fattore f_H dalla seguente relazione:

$$f_H = \frac{H}{z_i} \cdot \left(2 - \frac{H}{z_i} \right).$$

Il fattore di forma f_s è dato da:

$$f_s = \left(\frac{1.25 \cdot L/B}{L/B + 0.25} \right)^2.$$

Infine, il fattore correttivo f_t , è dato da:

$$f_t = \left(1 + R_3 + R \cdot \log \frac{t}{3} \right),$$

in cui t = tempo espresso in anni (≥ 3);

R_3 = costante pari a 0,3 nel caso di carichi statici.

| PRESSIONE 165 kPa | CEDIMENTI (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| | s_i (t = 0 s) | s_t (t = 10 anni) |
| <u>SPIGOLO</u> | 7 | 10 |
| <u>MEZZERIA</u> | 10 | 15 |
| <u>CENTRO</u> | 15 | 24 |

4.5 COEFFICIENTE DI REAZIONE DEL SOTTOFONDO DI WINKLER

Il valore del coefficiente di Winkler è il parametro che permette di determinare la rigidità di una fondazione; viene calcolato con il metodo di Vesic che lega il coefficiente ai cedimenti (immediati) della fondazione ed al carico allo SLU.

L'espressione generale adottata per il calcolo è la seguente:

$$K_w = R_d \times C$$

Dove C è un coefficiente adimensionale inversamente proporzionale al valore di cedimento.

| PRESSIONE (kPa) | CEDIMENTI (mm) | COEFF. DI WINKLER (kN/m³) |
|------------------------|-----------------------|---|
| 231 | 7/10 | 34650 |
| 231 | 10/15 | 24255 |
| 231 | 15/24 | 16170 |

5. IDONEITA' DEI TERRENI ALL'INUMAZIONE

In accordo con quanto previsto dalla normativa vigente (Capo X art. 57 del D.P.R. 10 settembre 1990 n. 285, art. 15 e Allegato 1 del R.R. 9 novembre 2004 n. 6), un idoneo grado di porosità e un adatto parametro di permeabilità dei terreni all'aria e all'acqua sono essenziali per l'instaurarsi dei naturali processi di decomposizione nella zona destinata direttamente all'inumazione e per permettere l'allontanamento dei liquami prodotti dal decadimento delle salme.

Tali caratteristiche dipendono direttamente dalla granulometria e dallo stato di addensamento del terreno.

Inoltre, il livello della falda non deve mai raggiungere il livello al quale vengono sepolte le salme.

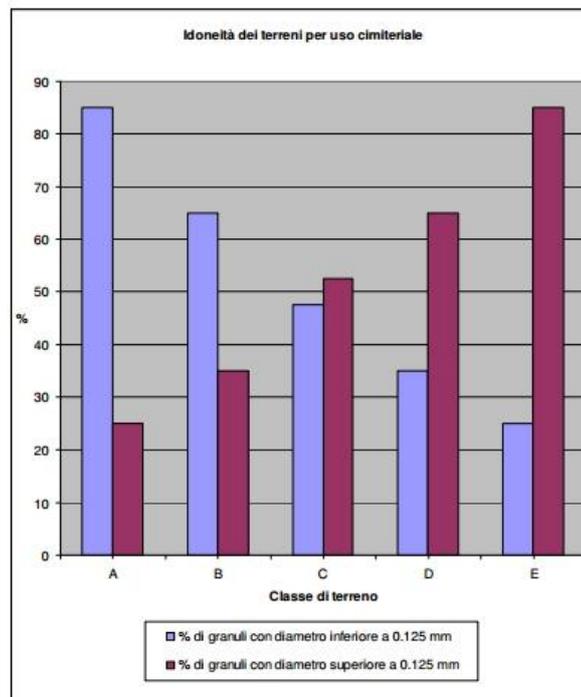
Nella seguente tabella si riportano i parametri definiti tramite l'esecuzione delle analisi granulometriche sui diversi campioni di terreno (vagliatura per via umida su tutti i campioni e aerometria su tre campioni profondi), alle relative profondità di prelievo.

| Punto di indagine | Campione | Profondità (m da p.c.) | Litologia analisi granulometrica | Frazioni granulometriche % | | | |
|-------------------|----------|------------------------|--|----------------------------|--------|--------|--------------|
| | | | | ciottoli | ghiaia | sabbia | Limo+argilla |
| Trincea T1 | 1 | 1,3÷1,50 | Ghiaia limosa o argillosa ben assortita con sabbia, di colore marrone scuro | - | 56,793 | 34,480 | 8,727 |
| | 2 | 2,8÷2,90 | Ghiaia sabbiosa di colore marrone giallo scuro | 1,176 | 70,488 | 22,155 | 6,181 |
| Trincea T2 | 1 | 1,3÷1,40 | Ghiaia limosa e/o argillosa, con sabbia, di colore marrone giallo scuro | - | 54,265 | 31,456 | 14,279 |
| | 2 | 2,8÷2,90 | Ghiaia pulita con granulometria poco assortita, con sabbia, di colore marrone giallo scuro | - | 56,662 | 38,564 | 4,774 |
| Trincea T3 | 1 | 1,0÷1,40 | Ghiaia limosa o argillosa con sabbia, di colore marrone giallo scuro | - | 56,670 | 35,307 | 8,023 |
| | 2 | 2,8÷3,00 | Ghiaia pulita con granulometria poco assortita, con sabbia, di colore marrone oliva scuro | - | 55,098 | 39,918 | 4,984 |

Per quanto riguarda il giudizio di idoneità si è fatto riferimento a quanto riportato da Fagnani ("Rocce e minerali per l'edilizia" - Editrice Succ. Fusi -Pavia, 1970) in merito alla classificazione dei terreni di inumazione, di cui di seguito si riporta la relativa classificazione:

"la dipendenza della percentuale di salme indecomposte dopo 10 anni di sepoltura dalla composizione granulometrica del terreno:

- A) con 85% di passante a 0,125 mm il terreno non è idoneo in quanto le salme indecomposte dopo 10 anni sono il 70%
- B) con 65 % di passante a 0,125 mm il terreno non è idoneo in quanto le salme indecomposte dopo 10 anni sono il 60%;
- C) con 45% di passante a 0,125 mm il terreno è mediocre in quanto le salme indecomposte sono il 12%;
- D) con 35% di passante a 0,125 mm il terreno è idoneo in quanto le salme indecomposte sono il 5%;
- E) con 25% di passante a 0,125 mm il terreno è ancora più idoneo in quanto le salme indecomposte sono il 4%."



| CLASSE | TERRENO | SALME INDECOMPOSTE DOPO 10 ANNI DI SEPOLTURA |
|--------|------------|--|
| A | non idoneo | 70% |
| B | non idoneo | 60% |
| C | mediocre | 12% |
| D | idoneo | 5% |
| E | idoneo | 4% |

Figura 5-1 - Classificazione Fagnani

I terreni in esame, ricadono nelle seguenti classi

| Punto di indagine | Campione | Profondità (m da p.c.) | % granuli diam < 0,125 mm | Classe Fagnani |
|-------------------|----------|------------------------|---------------------------|----------------|
| Trincea T1 | 1 | 1,3÷1,50 | 8,727 | E - idoneo |
| | 2 | 2,8÷2,90 | 6,702 | E - idoneo |
| Trincea T2 | 1 | 1,3÷1,40 | 14,279 | E - idoneo |
| | 2 | 2,8÷2,90 | 4,774 | E - idoneo |
| Trincea T3 | 1 | 1,0÷1,40 | 8,023 | E - idoneo |
| | 2 | 2,8÷3,00 | 4,984 | E - idoneo |

Per una stima qualitativa della permeabilità dei terreni presenti nelle aree di ampliamento cimiteriale attraversati durante gli assaggi con escavatore, sono state utilizzate le caratteristiche litologiche degli stessi, come riconosciute e determinate tramite le analisi granulometriche.

La permeabilità può essere, infatti, correlata alla natura litologica dei terreni sulla base di grafici (Figura 5.1) e tabelle empiriche pubblicate dalla letteratura tecnica, dalle quali sono tratti gli schemi sotto riportati.

Valori orientativi del coefficiente di permeabilità (K) nei diversi terreni (R. Lancellotta, 1987)

| TIPO DI TERRENO | K (m/s) |
|--|--------------------------|
| Ghiaia pulita | $10^{-2} \div 1$ |
| Sabbia pulita, sabbia e ghiaia | $10^{-5} \div 10^{-2}$ |
| Sabbia molto fine | $10^{-6} \div 10^{-4}$ |
| Limo | $10^{-8} \div 10^{-6}$ |
| Argilla omogenea al di sotto della falda | $< 10^{-9}$ |
| Argilla sovraconsolidata fessurata | $10^{-8} \div 10^{-4}$ |
| Roccia non fessurata | $10^{-12} \div 10^{-10}$ |

| Permeabilità | K (cm/s) | Litologia | Classificazione dei terreni | Drenaggio delle acque meteoriche |
|--------------|---------------------|---|-----------------------------|----------------------------------|
| Alta | 10^{-1} | Ghiaie grossolane e ciottoli senza matrice fine | Permeabili | Buono |
| Media | $10^{-1} - 10^{-3}$ | Sabbie, sabbie e ghiaie | Permeabili | Discreto |
| Bassa | $10^{-3} - 10^{-7}$ | Sabbie fini, limi, limi sabbioso argillosi | Semi-permeabili | Difficoltoso |
| Molto bassa | $10^{-7} - 10^{-9}$ | Limi argillosi e argille | Praticamente impermeabili | Praticamente impossibile |

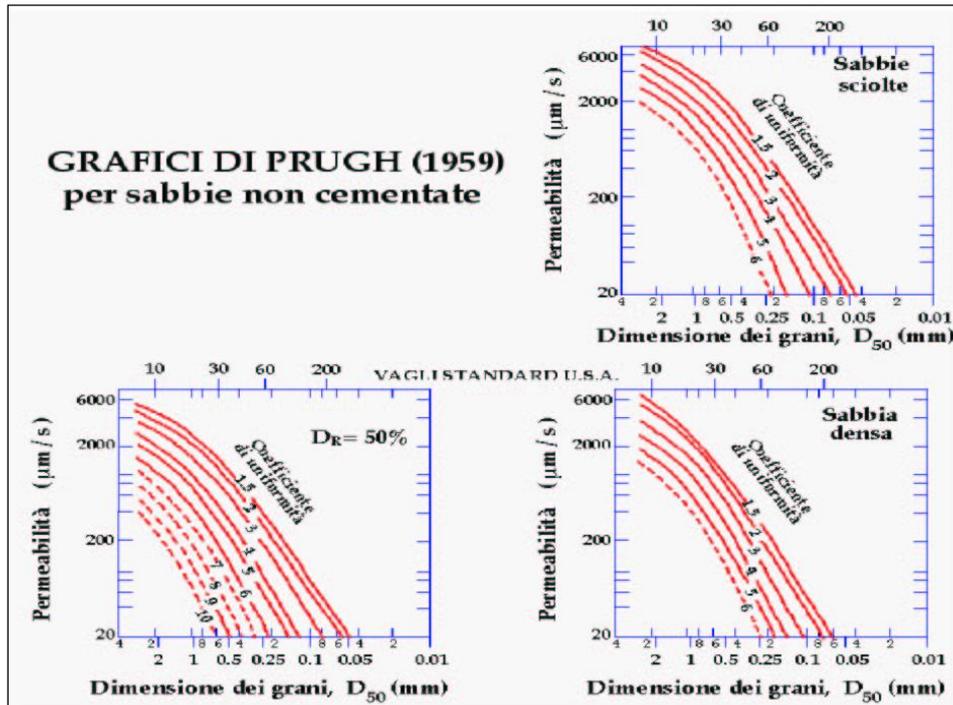


Figura 5-1 – Correlazione tra il coefficiente di permeabilità K, la densità relativa D_r e il Coefficiente di Uniformità U

In particolare, per quanto riguarda il cimitero di Vanzaghello, nella seguente tabella si riportano i valori di permeabilità stimati per i diversi campioni di terreno, alle relative profondità di prelievo.

| Punto di indagine | Campione | Profondità (m da p.c.) | Permeabilità K stimata (m/s) |
|-------------------|----------|------------------------|------------------------------|
| Trincea T1 | 1 | 1,3÷1,50 | $10^{-3} \div 10^{-2}$ |
| | 2 | 2,8÷2,90 | 10^{-2} |
| Trincea T2 | 1 | 1,3÷1,40 | $10^{-3} \div 10^{-2}$ |
| | 2 | 2,8÷2,90 | 10^{-2} |
| Trincea T3 | 1 | 1,0÷1,40 | $10^{-3} \div 10^{-2}$ |
| | 2 | 2,8÷3,00 | 10^{-2} |

Alle profondità di progetto (profondità di inumazione tra -1.50 e -2.00 m da p.c. e profondità di posa delle fondazioni delle tombe a terra per tumulazione sotterranea a -3,5 m da p.c.), le stratigrafie indicano una composizione granulometrica simile nei diversi punti di indagine, costituita da ghiaie a supporto di matrice da sabbioso limosa a sabbiosa molto debolmente limosa, che permette di stimare mediamente un valore del coefficiente di permeabilità K compreso tra 10^{-3} e 10^{-2} m/s.

6. GESTIONE DELLE ACQUE IN FASE DI REALIZZAZIONE E DI FUNZIONAMENTO

Essendo in presenza di aree vulnerabili per la tutela delle acque di falda (grado di vulnerabilità elevato/alto), si ritiene opportuno ricordare le verifiche da effettuarsi per una modalità di gestione delle acque, che minimizzi ogni possibile impatto negativo sulle acque sotterranee, nel rispetto del D.Lgs n. 152/06, della L.R. 12 dicembre 2003 n. 26, dei relativi Regolamenti Regionali attuativi e del PTUA.

Le verifiche e gli interventi da effettuarsi saranno legate al:

- collettamento alla pubblica fognatura delle acque nere e verifica dell'efficienza della rete stessa;
- realizzazione ed efficiente mantenimento della rete di raccolta e smaltimento delle acque bianche, con il collettamento e l'allontanamento delle acque meteoriche di raccolta dalle superfici impermeabilizzate, tenendo comunque presente quanto indicato all'art. 60, comma 2 del D.P.R. 10 settembre 1990, n. 285 "Approvazione del regolamento di polizia mortuaria", secondo cui "Il terreno del cimitero deve essere sufficientemente provveduto di scoli superficiali per il pronto smaltimento delle acque meteoriche e, ove sia necessario, di opportuno drenaggio, purché questo non provochi una eccessiva privazione dell'umidità del terreno destinato a campo di inumazione tale da nuocere al regolare andamento del processo di mineralizzazione dei cadaveri".

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Sulla base delle caratteristiche morfologiche, litologiche, idrogeologiche e geotecniche delle aree in esame, lo studio ha messo in evidenza:

- che il campo di inumazione è caratterizzato dalla presenza in superficie di circa 1,0/1,3 m di terreno di riporto probabilmente derivante da movimenti terra all'interno dell'area cimiteriale e dell'area del deposito comunale;
- che il materiale presente, costituente il primo sottosuolo, risulta idoneo per l'uso previsto, in quanto costituito da ghiaie a supporto di matrice da sabbioso limosa a sabbiosa molto debolmente limosa, per i quali è stato stimato un valore del coefficiente di permeabilità K mediamente compreso tra 10^{-3} e 10^{-2} m/s;
- le verifiche geotecniche hanno confermato l'idoneità del dimensionamento delle fondazioni delle opere in progetto in rapporto ai parametri di resistenza del terreno ottenuti attraverso lo sviluppo dei calcoli;
- è sostanzialmente assente ogni interferenza con le acque di falda superficiale, in quanto il cimitero è ubicato in una zona dove non è stata rilevata la presenza dell'acquifero superficiale e le falde presenti sono localizzate a profondità superiori ai 30 m.

Il tecnico incaricato
Dott. Geol. Efrem
Ghezzi

