

ANAS S.p.A.

DIREZIONE CENTRALE PROGRAMMAZIONE PROGETTAZIONE

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

PROGETTO ESECUTIVO

Contraente Generale:



GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Relazioni Geologiche

Relazione tecnica conclusiva delle indagini geognostiche integrative DI 3° FASE

Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

Codice Elaborato:

PA12_09 - E 0 0 0 G E 2 0 8 G I 0 1 Z R D 0 0 8 B

Scala:
-

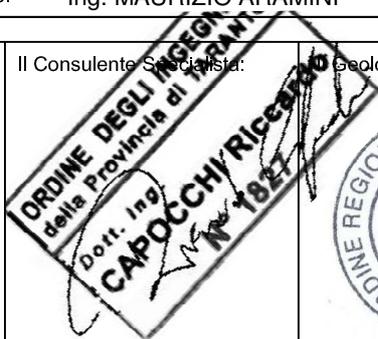
F							
E							
D							
C							
B	Luglio 2011	EMISSIONE	G. NICOLETTI	M. D'ANGELO	M. LITI	P. PAGLINI	
A	Maggio 2011	EMISSIONE	G. NICOLETTI	M. D'ANGELO	M. LITI	P. PAGLINI	
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	

Responsabile del procedimento: Ing. MAURIZIO ARAMINI

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:



Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza
in fase di progetto:



Il Direttore dei lavori:



INDICE

1. PREMESSA	4
2. INDAGINI ESEGUITE E CRITERI METODOLOGICI	6
2.1 PROBLEMATICHE IDROGEOLOGICHE	6
2.2 IDRAULICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE	7
2.2.1 Prove di emungimento	7
2.2.2 Prova a gradini di portata sulla stazione PZ2-SI42	14
2.2.3 Slug test	15
2.3 DEFINIZIONE DEL 'ASSETTO TETTONICO E STRATIGRAFICO	18
2.3.1 Esecuzione di sondaggi	18
2.3.2 Prospezioni geofisiche	19
2.4 ANALISI CHIMICHE E MINERALOGICHE	20
2.4.1 Caratterizzazione della matrice acquosa e gassosa	20
2.4.2 Caratterizzazione mineralogica dei terreni argillosi	20
2.5 RIEPILOGO DELLE INDAGINI	20
2.5.1 Perforazione di sondaggi	21
2.5.2 Prove in situ	22
2.5.3 Prove di laboratorio	23
2.5.4 Prospezioni geofisiche	24
2.5.5 Tabelle riepilogative	25
3. PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE	27
3.1 PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO SUI CAMPIONI INDISTURBATI	27
3.2 PROVE CHIMICHE DI LABORATORIO	31
3.2.1 Determinazioni sui campioni prelevati da sondaggi	31
3.2.2 Acque di falda	32
3.3 PROVE DI CONDIZIONAMENTO E ADESIVITÀ DELLE ARGILLE	34
3.4 PROVE MINERALOGICHE SULLE ARGILLE	36
4. PROVE IN SITU ESEGUITE	37
4.1 PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORO	37

4.2	PROVE DI EMUNGIMENTO SU POZZI	38
4.2.1	Prova di emungimento sulla stazione PZ2-SI42	39
4.2.2	Prova di emungimento sulla stazione PZ3-SI43	49
4.2.3	Prova a gradini di portata sulla stazione PZ2-SI42	60
4.3	SLUG TEST SUI PIEZOMETRI	62
4.3.1	Prova su SI40	62
4.3.2	Prova su SI46	63
4.3.4	Prova su SI41	64
4.3.6	Prova su S10	65
4.3.7	Prova su SI43	65
4.3.8	Prova su SI45	66
4.3.9	Risultati	66
4.4	SINTESI DEI DATI PIEZOMETRICI REGISTRATI LUNGO LA GN CALTANISSETTA	69

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: <i>RELAZIONI GEOLOGICHE</i>	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	<i>Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3</i>	Pagina 2 di 70

ELENCO DEGLI ELABORATI DI PROGETTO ALLEGATI

000GE209GT03ZIG017	Rapporto di prova generale – 3 ^a fase
000GE209GT03ZIG018	All. A Colonne stratigrafiche – 3 ^a fase
000GE209GT03ZIG019	All. B Indagini Geofisiche – 3 ^a fase
000GE209GT03ZIG020	All. C Prove di laboratorio – 3 ^a fase
000GE209GT03ZIG021	All. D Documentazione fotografica – 3 ^a fase
000GE209GT03ZP6001	Planimetria con ubicazione delle indagini in sito

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 3 di 70

1. PREMESSA

La presente relazione sintetizza le attività di indagini geognostiche dirette ed indirette programmate ad integrazione di quanto già eseguito, durante la “prima fase” e la “seconda fase”, nell’ambito del Progetto Esecutivo di “ammodernamento ed adeguamento alla Cat. B D.M. 5/11/2001 della S.S. 640 Agrigento – Caltanissetta tratto dal Km 44+1000 allo svincolo con l’autostrada A19”.

In particolare, l’analisi condotta sui risultati delle indagini pregresse (campagna indagini 1988 e 2006) e su quelle integrative di “prima fase” (campagna indagini luglio/settembre 2010) e di “seconda fase” (campagna indagini ottobre/dicembre 2010), hanno indotto ad effettuare ulteriori approfondimenti, soprattutto in merito alla definizione di aspetti relativi alla opera d’arte progettuale individuata con la Galleria Naturale Caltanissetta:

- Parametrizzazione geomeccanica collegata all’assetto tettonico-strutturale ricostruito grazie alle indagini effettuate e approfondimento sulle zone interessate dalla fasce tettonizzate;
- Assetto idrogeologico e idraulica di falda in corrispondenza delle quote interessate dallo scavo della galleria, con parametrizzazione della permeabilità degli acquiferi e studio della potenziale falda acquifera con elevato battente sulla galleria (fino ad oltre 100 m);
- Individuazione lungo il tracciato della galleria di eventuali orizzonti lapidei riconducibili a quelli direttamente individuati in corrispondenza del sondaggio SI27 di Fase 2;
- Presenza di gas interstiziali nei terreni interessati dagli scavi.

Il programma delle indagini definito (detto di “Fase 3”) è stato basato sugli assetti e sulle problematiche geologiche riscontrate in fase di esecuzione delle precedenti indagini e di elaborazione dei dati acquisiti e si è ritenuto, pertanto, necessario alla definizione ultima del modello geologico e geomeccanico di riferimento per la progettazione esecutiva dell’opera in questione.

Nello specifico le indagini sono state programmate tenendo conto dei criteri descritti nel capitolo successivo, distinti per ognuna delle problematiche da affrontare.

La campagna, anche in questa fase, è stata condotta secondo quanto previsto dal par. 1.3 “Indagini geotecniche” delle NG 15 e relativi allegati 1b “Norme tecniche per l’esecuzione di indagini geognostiche”, 1c “Norme tecniche per l’esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche”, 1d “Norme tecniche per l’esecuzione di prove di laboratorio” e in coerenza con il nuovo quadro normativo di riferimento rappresentato dal D.M. 14/01/2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni” ed alla Circolare 02/02/2009 n. 617 C.S.LL.PP. “Istruzioni per

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 4 di 70

l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14/01/2008".

Relativamente alla banca dati indagini pregresse si rimanda ai relativi elaborati che sono stati redatto in occasione delle campagne d'indagini di "prima fase" e di "seconda fase" (cfr. Elenco Elaborati punto 9.3 "Indagini geognostiche e geotecniche").

Tralasciando in questa sede l'esposizione delle problematiche geomorfologiche e degli aspetti geologici incontrati, che sono oggetto dei relativi studi specialistici, nei capitoli seguenti, oltre ad esporre brevemente le attività propedeutiche, si procede ad illustrare le varie indagini eseguite, mentre i "rapporti di prova" relativi alle attività di indagine svolte, vengono proposti in allegato alla presente relazione, così distinti:

000GE209GT03ZIG017	Rapporto di prova generale – 3 ^a fase;
000GE209GT03ZIG018	All. A Colonne stratigrafiche – 3 ^a fase;
000GE209GT03ZIG019	All. B Indagini Geofisiche – 3 ^a fase;
000GE209GT03ZIG020	All. C Prove di laboratorio – 3 ^a fase;
000GE209GT03ZIG021	All. D Documentazione fotografica – 3 ^a fase;
000GE209GT03ZP6001	Planimetria con ubicazione delle indagini in sito;

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 5 di 70

2. INDAGINI ESEGUITE E CRITERI METODOLOGICI

Sulla base dei dati disponibili, e delle problematiche di carattere geologico, idrogeologico e geomeccanico emerse in occasione delle attività di campagna di “prima fase” e di “seconda fase” effettuate, è stato predisposto un Piano delle Indagini (dirette ed indirette), prodotto in prima revisione nel marzo 2011 ed attuato tra il mesi di marzo e luglio 2011.

Le problematiche affrontate hanno riguardato le seguenti tematiche:

- 1) Problematiche idrogeologiche;
- 2) Idraulica delle acque sotterranee
- 3) Definizione dell'assetto tettonico stratigrafico
- 4) Caratterizzazione chimica delle matrici.

2.1 PROBLEMATICHE IDROGEOLOGICHE

Al fine di delineare meglio l'andamento della falda idrica sotterranea ed i relativi livelli piezometrici e completare il quadro delineatosi con i piezometri esistenti, si è proceduto alla realizzazione di n. 8 piezometri, installati in altrettanti fori di sondaggio ubicati lungo il tracciato della galleria, a tubo aperto o con 1 o 2 celle di Casagrande per ogni foro, posizionate alle profondità corrispondenti con la galleria.

In particolare l'ubicazione di tali punti di sondaggio ricade nelle seguenti zone:

- Tra le progressive 13+600 e 13+710, laddove non era ubicato alcun punto di monitoraggio della falda, si è provveduto ad installare n. 2 piezometri, denominati rispettivamente SI39 e SI43, con n. 1 cella di Casagrande per ognuno di essi, posizionate, rispettivamente, a 80 m e a 105 m di profondità
- Tra le progressive 14+115 e 14+150, laddove non era ubicato alcun punto di monitoraggio della falda, si è provveduto ad installare n. 2 piezometri, denominati rispettivamente SI46 e SI40, con n. 1 cella di Casagrande per ognuno di essi, posizionate, rispettivamente, a 110 m e a 120 m di profondità
- Alla progressiva 14+275, laddove non era stato precedentemente ubicato alcun punto di monitoraggio della falda, si è provveduto ad installare un piezometro a tubo aperto (SI45) con fenestratura tra -90 e -130 m di profondità;

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 6 di 70

- Tra le progressive 15+770 e 16+000, in corrispondenza dell'esistente piezometro a tubo aperto SI27, si è installato n. 1 piezometro (SI42) a circa 90 m in direzione NE lungo il tracciato (prog. 15+900), n. 1 piezometro (SI41) a circa 60 in direzione SO lungo il tracciato (prog. 15+770) e un piezometro (SI44) poco oltre SI42 in direzione NE (prog. 16+000); nel primo caso (SI42) si è proceduto alla installazione di n. 2 celle di Casagrande alla prof. di 70 m e alla prof. di 110 m; nel secondo caso (SI41) si è proceduto alla installazione di n. 2 celle di Casagrande alla prof. di 60 m e alla prof. di 100 m, nel terzo caso (SI44) si è proceduto alla installazione di un tubo aperto con fenestrazione tra -10 e -105 m.

In corrispondenza delle quote di posizionamento delle celle di Casagrande, in fase di perforazione si è proceduto, in alcuni casi, alla esecuzione di prove di permeabilità in foro con metodologia "Lefranc" a carico variabile, finalizzate alla determinazione del coefficiente di permeabilità "K" in corrispondenza degli orizzonti acquiferi indagati.

2.2 IDRAULICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE

2.2.1 Prove di emungimento

Al fine di verificare le caratteristiche idrauliche degli acquiferi in corrispondenza dalla galleria, in zone di particolare interesse, sono state programmate **n. 3 prove di emungimento** tramite la realizzazione di appositi pozzi di pompaggio denominati **PZ1, PZ2 e PZ3** realizzati, rispettivamente, nelle immediate vicinanze dei piezometri SI40, SI42 e SI43. Non è stato possibile ubicare altri pozzi in zone significative e in prossimità di piezometri esistenti in quanto ricadenti in proprietà private, i cui titolari non sono favorevoli alla ulteriore esecuzione di attività di perforazione.

Metodologia adottata

Le prove di emungimento consistono nell'estrazione di acqua sotterranea tramite pozzi, con relativa misura delle portate emunte, dei relativi abbassamenti di livello piezometrico e della risalita dello stesso livello dopo l'arresto dell'emungimento.

In generale tali prove possono essere eseguite su singoli pozzi o su stazioni di prova, in cui si considera un pozzo pilota e uno o più piezometri ubicati all'interno del raggio d'azione dello stesso pozzo.

Le prove di emungimento sulla stazione di misura (pozzo + piezometro) si eseguiranno a **portata costante** interpretando i dati registrati con la teoria del deflusso in regime di non-equilibrio o in regime transitorio (THEIS, 1935), così chiamato perché si ammette che le variazioni di regime idraulico si verifichino non solo nello spazio ma anche nel tempo.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 7 di 70

Con tale teoria si dimostra che, intorno ad un pozzo caratterizzato da una portata (Q) costante, la superficie della depressione piezometrica non tende ad una forma stabile e che la zona di influenza dell'opera di captazione idrica si propaga indefinitivamente, con velocità decrescente.

Quindi la rialimentazione non compensa l'emungimento; infatti si ammette che l'acquifero non abbia ricariche laterali e che, per tutto il tempo di emungimento, venga liberata (istantaneamente e con perdita di carico) soltanto acqua immagazzinata.

Per la rigorosa applicazione della teoria di deflusso in regime di non-equilibrio sono necessarie anche altre semplificazioni di base, come l'esistenza di un acquifero omogeneo ed isotropo (con trasmissività T costante nel tempo e nello spazio), nonché l'esistenza di una falda infinita (di spessore costante) compresa tra due strati impermeabili orizzontali.

Con la prova a portata costante si possono calcolare la trasmissività (T) ed il coefficiente di immagazzinamento (S) dell'acquifero, oltre che la portata specifica ed il raggio d'azione del pozzo ad un determinato tempo (t).

⇒ La trasmissività è un parametro funzione della permeabilità (K) dell'acquifero e dello spessore saturo dell'acquifero(e), introdotto da THEIS nel 1938, con la seguente formula:

$$T = K \times e \quad [(m/s) \times m = m^2/s]$$

La trasmissività può essere definita come il volume di acqua gratifica che passa nell'unità di tempo, per effetto di un gradiente idraulico unitario, attraverso una sezione (ortogonale alla direzione di deflusso delle acque) di larghezza unitaria e di altezza pari allo spessore saturo dell'acquifero. Essa traduce la capacità che ha l'acquifero di trasferire l'acqua.

⇒ Il coefficiente di immagazzinamento rappresenta il volume d'acqua che può essere erogato o immagazzinato, per effetto di una modificazione unitaria di carico idraulico, da un prisma di acquifero di sezione unitaria e di altezza pari allo spessore della falda.

Pertanto il coefficiente di immagazzinamento può essere utilizzato per la valutazione delle riserve idriche esistenti nel sottosuolo. Esso è adimensionale, in quanto risultante dal rapporto tra il volume d'acqua gratifica immagazzinato (V_g) e il volume totale (o apparente) del prisma di acquifero saturo (V_a) e, quindi coincide con la porosità efficace (p_e), ottenendo la seguente formula:

$$S = p_e = V_g / V_a \quad [m/m]$$

⇒ Per portata specifica di un pozzo si intende la portata emungibile per ogni metro di depressione piezometrica, misurata all'interno dello stesso pozzo ed è data dalla formula:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 8 di 70

$$Q_s = Q / \Delta h_{\text{pozzo}}$$

⇒ Per quanto riguarda il raggio d'azione di un pozzo, con questo termine si intende la distanza, dall'asse del pozzo, dove la depressione piezometrica si annulla dopo un certo tempo (**t**) dall'inizio dell'emungimento.

Quindi la teoria di THEIS (1935) dimostra che:

$$\Delta h_p = (Q/4\pi T) \int (e^{-u}/u) du \quad (\int \text{compreso tra } u \text{ ed } \infty)$$

dove:

Δh_p = depressione piezometrica (in m) misurata nel piezometro posto a distanza r' dal pozzo da cui si emunge la portata Q

Q = portata (in m^3/s) emunta dal pozzo, in corrispondenza della depressione

T = trasmissività dell'acquifero (in m^2/s)

e = spessore dell'acquifero confinato

u = parametro adimensionale, che considera la distanza (r') del piezometro di misura dal pozzo, il coefficiente di immagazzinamento (**S**), la trasmissività (**T**) e il tempo (**t**) in cui si ha la depressione considerata, pari a:

$$u = r'^2 S / 4Tt$$

Tralasciando in questa sede i vari passaggi matematici della formula di Theis sopra riportata, si giunge alla formula di approssimazione logaritmica di Jacob (1950), riportata nel seguito:

$$\Delta h_p = (0,183Q/T) \log (2,25 Tt/r'^2 S)$$

che può essere scritta anche nella forma:

$$\Delta h_p = (0,183Q/T) [\log (2,25 St/r'^2 S) + \log(t)]$$

Tale formula semplifica gli assunti matematici di Theis ed è di più facile applicazione, sebbene l'approssimazione dei risultati sia migliore quanto più lungo è il tempo di pompaggio t (con un minimo di 48 ore), quanto più grande è il rapporto T/S e quanto più piccola è la distanza tra il pozzo e il piezometro di misura (non superiore ai 150 m).

Ponendo in un diagramma sull'asse delle ordinate le depressioni indotte misurate in un piezometro della stazione di prova e su quello delle ascisse il logaritmo dei tempi di emungimento, dopo un

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 9 di 70

intervallo di tempo sufficientemente lungo i punti si allineano su una retta, rappresentativa della curva data dalla formula di Jacob, la cui equazione è:

$$y = C (\log a + \log x)$$

Questa può essere tracciata sia graficamente che calcolando la retta di regressione con il metodo dei minimi quadrati; le sue variabili sono date da:

$$y = \Delta h_p$$

$$\log x = \log t$$

mentre il coefficiente angolare è rappresentato da:

$$C = 0,183 Q/T$$

Ma il coefficiente C è dato anche da:

$$C = \operatorname{tg} \beta = \partial \Delta h_p / \partial (\log t)$$

Se si sceglie il termine t pari ad un ciclo logaritmico, in modo che

$$\log t = 1$$

il coefficiente C può essere misurato direttamente sul diagramma, in quanto è pari all'accrescimento di depressione che si verifica in un ciclo logaritmico.

Pertanto la trasmissività è pari a:

$$T = 0,183 Q/C$$

Sostituendo il valore ottenuto di trasmissività nella formula di JACOB, dati la portata e considerando il valore di abbassamento $\Delta h_p=0$ al tempo t_0 (dato dall'intercetta della retta summenzionata con l'asse delle x) nel piezometro distante r' dal pozzo, si ottiene il coefficiente di immagazzinamento (S), dato da:

$$S = 2,25 T t_0 / r'^2$$

Dalla trasmissività si ricava anche il coefficiente di permeabilità (K), avendo noto lo spessore (e) dell'acquifero saturo:

$$K = T/e$$

Il raggio d'azione (R) del pozzo si ricava dalla trasmissività, dal tempo considerato e dal coefficiente di immagazzinamento ed è dato, quindi, dalla formula:

$$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)}$$

Oltre a considerare la situazione dinamica dell'acquifero in fase di emungimento e quindi relativamente agli abbassamenti, per la verifica dei summenzionati parametri ottenuti, esiste un altro fenomeno importante che si presenta dopo l'arresto del pompaggio e che risulta evidenziato dalla **risalita del livello idrico** nel pozzo.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 10 di 70

Infatti la falda continua a defluire verso il pozzo come se l'emungimento continuasse e contemporaneamente si verificasse l'assorbimento, da parte dell'acquifero, di una portata (-Q) pari a quella (+Q) estratta. Si assiste, quindi, al graduale riempimento (a flusso costante) del cono di depressione indotto dall'emungimento.

Se si considerano le portate -Q e +Q precedentemente menzionate e si tiene conto del tempo (t) intercorso tra l'inizio e la fine dell'emungimento, nonché del tempo (t') di risalita (cioè posteriore alla fine dello stesso emungimento), dalla formula di approssimazione logaritmica di Jacob si ottiene la depressione residua ($\Delta h'_p$) riferita al tempo (t+t')

$$\Delta h'_p = (0,183Q/T) \log [(t+t')/t']$$

che può essere utilizzata per l'interpretazione quantitativa della curva di risalita di un piezometro della stazione di prova, che si ottiene ponendo in un diagramma sull'asse delle ordinate le depressioni residue misurate nel piezometro e su quello delle ascisse il logaritmo di (t+t')/t'.

Se si esclude il tratto iniziale di risalita rapida, dove t' è troppo piccolo rispetto a t, e quello finale di risalita lenta (dove Δh_p può essere influenzata da fattori esterni, in quanto le variazioni di livello sono molto piccole), i punti si allineano sulla retta rappresentativa della curva, la cui equazione è del tipo seguente:

$$y = C \log x$$

le cui variabili sono date da:

$$y = \Delta h'_p$$

$$\log x = \log [(t+t')/t']$$

Ma il coefficiente C è dato anche da:

$$C = \text{tg } \beta = \partial \Delta h'_p / \partial \log [(t+t')/t']$$

Se si sceglie il termine t pari ad un ciclo logaritmico, in modo che

$$\log [(t+t')/t'] = 1$$

il coefficiente C può essere misurato direttamente sul diagramma, in quanto è pari all'accrescimento di depressione che si verifica in un ciclo logaritmico. Pertanto, anche nel caso della risalita, la trasmissività è pari a:

$$T = 0,183 Q/C$$

Modalità esecutive

Le prove in oggetto sono state protratte per un periodo di 48 ore, eseguendo nella stazione di prova (pozzo + piezometro) le misure in manuale dei livelli di falda, relativamente alla soggiacenza e non alla quota assoluta (livello medio del mare), in quanto immediatamente correlabile con l'abbassamento, grandezza di fondamentale importanza nell'interpretazione delle prove. Lo schema esecutivo è stato il seguente:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 11 di 70

Tempo dopo inizio prova	Intervallo di misura
Da 0 a 15 minuti	Ogni minuto
Da 15 a 60 minuti	Ogni 5 minuti
Da 60 a 120 minuti	Ogni 10 minuti
Da 120 a 540 minuti	Ogni 30 minuti
Da 540 a 1200 minuti	Ogni ora
Da 1200 a 4320 minuti	Ogni 4 ore

Oltre ai pozzi oggetto di prova (PZ1, PZ2, PZ3), quindi, sono stati monitorati i piezometri presenti a poca distanza dallo stesso, al fine di verificare le influenze a distanza del pompaggio. Nello specifico i piezometri interessati sono stati:

- S140 nel caso di PZ1;
- S142 nel caso di PZ2;
- S143 nel caso di PZ3.

Le misure degli abbassamenti all'interno del pozzo in prova e nel piezometro di controllo sono state effettuate in manuale.

Durante le prove si è effettuato un monitoraggio delle portate emunte, al fine di mantenere la portata costante. La pompa è stata mantenuta ad una quota superiore a 5 m rispetto al fondello del pozzo per evitare fenomeni di intasamento causati dai sedimenti eventualmente presenti sul fondo del piezometro.

Al termine della prova gli abbassamenti registrati sono stati misurati dalla falda immediatamente dopo lo spegnimento della pompa installata nel pozzo in esame e, comunque, sino alla risalita del livello statico di partenza, con il seguente schema:

Tempo di risalita	Intervallo di misura
Da 0 a 15 minuti	Ogni minuto
Da 15 a 60 minuti	Ogni 5 minuti
Da 60 a 120 minuti	Ogni 10 minuti
Da 120 a 540 minuti	Ogni 30 minuti
oltre 540	Ogni ora

Caratteristiche dei pozzi

I pozzi (PZ1, PZ2 e PZ3) hanno le seguenti caratteristiche:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 12 di 70

- Diametro di perforazione: 178 mm
- Profondità: PZ1 = 140 m; PZ2 = 120 m; PZ3 = 120 m
- Tubo piezometrico: PVC DN 4,5" con tratto microfenestrato slot 0,5 mm posto da -60 m a fondo foro per PZ1, da -35 m a fondo foro per PZ2, da -50 a fondo foro per PZ3;
- Prefiltro in ghiaietto siliceo 3÷6 mm posato da -58 m a fondo foro per PZ1, da -33 m a fondo foro per PZ2 e da -48 m a fondo foro per PZ3;
- Tampone anulare di sabbia posto sopra il prefiltro con spessore di circa 0,5 m per i tre pozzi;
- Conseguente sigillatura con miscela ternaria acqua/cemento/bentonite da -56,5 m a pc. per PZ1, da -32,5 m a p.c. per PZ2, da p.c. a -47,5 m a pc. per PZ3.

Le ubicazioni sono le seguenti:

- PZ1: 20 m a SO dell'esistente piezometro SI40 (installato durante la Fase 3 delle Indagini integrative);
- PZ2: 20 m a NE dell'esistente piezometro SI42 (installato durante la Fase 3 delle Indagini integrative);
- PZ3: 5 m a O dell'esistente piezometro SI43 (installato durante la Fase 3 delle Indagini integrative).

Determinazione della portata di emungimento

Il valore della portata di emungimento adottato durante la prova deriva da prove propedeutiche effettuate su ogni singolo pozzo, eseguite durante le operazioni di spurgo con contemporanea misura dei valori di abbassamento all'interno dello stesso pozzo, per la ricostruzione della curva caratteristica $Q/\Delta h$ e alla conseguente correlazione con la portata ottimale (Q_{OTT}). Lo spurgo è stato effettuato a gradini di portata crescenti a partire da 0,5 l/s con incrementi di 1 l/s per ogni gradino sino a d un massimo di sei gradini di durata pari a 1 ora ciascuno, raggiungendo la portata massima di 3,0 l/s.

Nel caso in cui sono stati osservati abbassamenti eccessivi all'interno del pozzo sin dal primo gradino (PZ1 e PZ3), gli incrementi di portata per ogni singolo gradino sono stati ridotti a 0,1 l/s, raggiungendo la portata massima di 0,6 l/s.

Bibliografia

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 13 di 70

- Castany G., 1982 – *Principes et méthodes de l'hydrogéologie* – Dunod, Paris
- Celico P., 1988 – *Prospezioni idrogeologiche* – Liguori Editore, Napoli
- Chiesa G., 1977 – *Manuale di geoidrologia. Idrraulica dei pozzi* – A.N.I.PA., Milano
- Custodio E., 1976 – *Galerías de agua, zanjas de drenaje y pozos excavados. Hidrología subterránea* – Omega, Barcelona
- Francani V., 1975 – *Osservazioni sugli effetti della forma degli acquiferi sul rendimento delle opere di captazione delle falde idriche* – Geologia Applicata e Idrogeologia, n. 10
- Ippolito F., Nicotera P., Lucini P., Civita M., de Riso R., 1975 – *Geologia tecnica* – I.S.E.D.I., Milano
- Jacob C. E., 1963 – *Recovery method for determining the coefficient of transmissibility* – Water Supply Paper 15361, U.S. Geol. Survey
- Puppini U., 1984 – *Valutazione di rendimento e di efficienza di un pozzo per acqua* – Acque Sotterranee, n. 2
- Slater R. J., 1964 – *Applications and limitations of pumping test: engineering aspects* – Proc. Inst. Civil Eng.

2.2.2 Prova a gradini di portata sulla stazione PZ2-SI42

Sulla stazione di prova PZ2-SI42 al fine di verificare la capacità di immagazzinamento e rilascio di acqua da parte dell'acquifero interessato, è stata effettuata una ulteriore prova condotta a gradini di portata sino alla potenza massima della pompa utilizzata. Si è potuto, così verificare la risposta dell'acquifero in condizioni di stress idraulico.

La prova è stata condotta con tre gradini di portata, registrando manualmente gli abbassamenti e le risalite determinate dalla fase di funzionamento e spegnimento della pompa.

La portata indizionale è stata di 1,8 l/s per una durata della fase di pompaggio di 6 h, a cui è seguita la fase di spegnimento della pompa e, successivamente, gli altri due gradini con portate di 2,5 e 3,3 l/s, per una durata per ciascuna fase di emungimento di 12 h, cui è seguita la fase di stasi della pompa.

Gli intervalli di acquisizione delle misure sono stati i seguenti:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 14 di 70

Tempo dopo inizio prova	Intervallo di misura
Da 0 a 15 minuti	Ogni minuto
Da 15 a 60 minuti	Ogni 5 minuti
Da 60 a 120 minuti	Ogni 10 minuti
Da 120 a 720 minuti	Ogni 30 minuti

La procedura eseguita per l'esecuzione della prova è la seguente:

- 1) Rilevazione del livello statico della falda nei due punti (PZ2 e SI42), mediante sonda freaticometrica;
- 2) Attivazione della pompa alla portata stabilita e verifica ad intervalli regolari della stabilità dei valori di portata;
- 3) Al termine delle 6 h per la prova a portata di 1,8 l/s e delle 12 h per ognuna delle prove a 2,5 e 3,3 l/s, si è provveduto a disattivare la pompa e registrare le variazioni del livello piezometrico agli intervalli di tempo summenzionati, in entrambi i punti di misura.

2.2.3 Slug test

Al fine di verificare gli effettivi livelli piezometrici dei punti di monitoraggio delle acque ubicati in corrispondenza della galleria e la permeabilità delle formazioni interessate in corrispondenza delle celle, si è proceduto all'effettuazione di determinate prove consistenti nell'esecuzione dello spurgo all'interno di ogni singolo punto, tramite immissione di aria compressa con pressione adeguata, con lo scopo di provocare un abbassamento consistente (se non l'intero svuotamento) del livello idrico in esso contenuto.

Immediatamente dopo lo spurgo si è proceduto all'effettuazione della misura piezometrica, che è stata ripetuta con intervallo di 1 ora nelle prime 6 ore successive e ogni 6 ore nelle 24 ore successive (allo spurgo) e, in seguito, ogni 12 ore sino a stabilizzazione dei livelli.

Le prove sono state eseguite sui seguenti piezometri:

Sigla	Tipologia	Prof. (m)	Misure medie livello statico (m)	Note
S8	Casagrande	130	34	
S9	Casagrande	110	12,3	
S10	Casagrande	130	19,5	
SI40	Casagrande	120	21,5	
SI41	Casagrande	100	26	
SI43	Casagrande	105	20	
SI45	Tube aperto 3"	130	42	<i>Fenestratura tra 90 e 130 m</i>
SI46	Casagrande	110	44,3	

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 15 di 70

Metodologia adottata

Si definisce *slug test* una prova di pozzo eseguita in maniera da produrre una istantanea variazione del livello statico in un pozzo o piezometro e misurare, in funzione del tempo, il conseguente recupero del livello originario nello stesso pozzo attivo. Si tratta, perciò, di una prova eseguita in regime transitorio la cui finalità consiste nella determinazione della conducibilità idraulica dell'acquifero nelle immediate vicinanze del pozzo-piezometro attivo.

La prova può essere eseguita aumentando bruscamente il livello statico misurato nel pozzo attivo tramite aggiunta di un volume d'acqua detto *slug* e monitorando il conseguente declino di livello che si crea per il flusso dal pozzo verso l'acquifero dello *slug* medesimo (*test* in declino o con carico decrescente) o, viceversa, producendo una brusca diminuzione di livello per sottrazione immediata di uno *slug* e monitorando la conseguente risalita che si crea per il flusso dall'acquifero verso il pozzo (*test* in risalita o con carico crescente, detto anche *bail test*, vedi figura sottostante).

Vantaggi: uno *slug test* presenta dei vantaggi innegabili rispetto alla classica prova di falda che sono da ricondursi, innanzitutto, alla semplicità e rapidità di esecuzione e che si traducono in un conseguente minor costo: in particolare, l'esecuzione di uno *slug test* non richiede la disponibilità di pompe o attrezzature complesse né di un pozzo di osservazione diverso dal pozzo attivo. Per la sua semplicità operativa può essere ripetuto nel tempo e in tal modo fornire utili indicazioni sull'eventuale cambiamento delle condizioni idrauliche nell'intorno del pozzo. La sua semplicità operativa e il ridotto costo ne rendono sempre consigliabile l'esecuzione, ogni qualvolta sia stato completato un pozzo o un piezometro.

Svantaggi: per contro, il flusso indotto da uno *slug test* è molto limitato. Ne consegue che la risposta alla brusca variazione di livello indotto, e il conseguente valore di conducibilità idraulica ottenuto, sono fortemente condizionati dalle condizioni idrauliche esistenti nell'intorno del pozzo (modalità di perforazione, geometria di completamento, eventuale danneggiamento di permeabilità).

In altri termini, l'affidabilità di uno *slug test* non è paragonabile minimamente a quella di una classica prova di falda multipozzo, che resta la modalità fondamentale per caratterizzare un acquifero e, in ogni caso, l'unica in grado di definire la tipologia idraulica del sistema acquifero.

Inoltre, in mezzi porosi permeabili, le misure di variazione del livello non possono essere fatte manualmente ma richiedono l'impiego di trasduttori di pressione con registrazione automatica del dato ogni secondo per l'estrema rapidità del fenomeno di dissipazione del carico indotto.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 16 di 70

Per l'interpretazione degli *slug test* a partire dagli anni 50 sono stati sviluppati diversi modelli matematici bidimensionali di tipo analitico e semianalitico: i più utilizzati sono quelli di Hvorslev (Hvorslev, 1951), Cooper, Bredehoeft e Papadopulos (Cooper *et al.*, 1967) e Bouwer e Rice (Bouwer & Rice, 1976). La principale limitazione di questi metodi è quella di non poter tener conto della parziale penetrazione o del parziale completamento di pozzi e di ipotizzare il flusso come assolutamente orizzontale, compreso tra due limiti impermeabili costituiti dai piani orizzontali virtuali passanti per gli estremi del tratto finestrato.

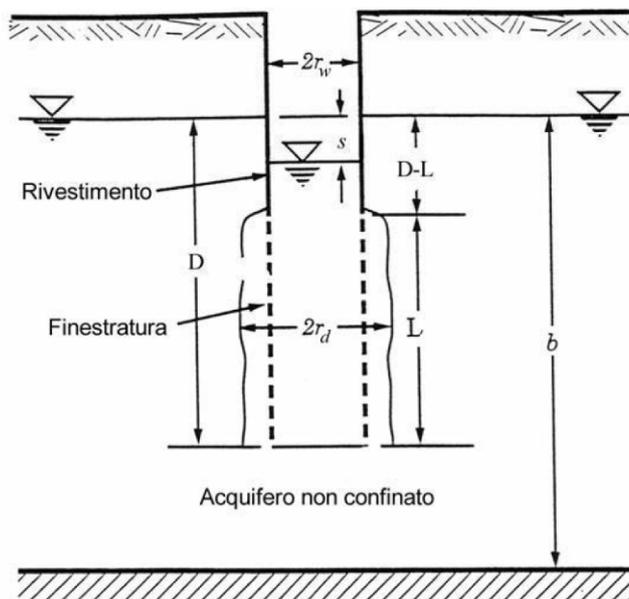


Fig. 2.1 – Configurazione di uno slug-test

La soluzione di Bouwer e Rice indica che la variazione di livello in pozzo, s , varia rispetto al tempo con una legge di tipo semilogaritmico; pertanto, in un caso ideale, i punti $\ln(s)$ vs t . Per la determinazione di m è sufficiente scegliere un punto su tale retta e poi calcolare:

$$m = [\ln(S_0/S)]/t$$

e quindi:

$$Kr = m * [rw^2 * \ln(Re/rd)] / (2L)$$

in cui:

S_0 : innalzamento o abbassamento iniziale;

S : innalzamento o abbassamento al tempo t ;

rw : raggio del piezometro;

Re : raggio effettivo, distanza a cui si fa risentire l'effetto entro il mezzo poroso;

rd : raggio fino a cui l'acquifero è stato stimolato o spurgato dalla perforazione;

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 17 di 70

L : lunghezza tratto fenestrato

2.3 DEFINIZIONE DEL'ASSETTO TETTONICO E STRATIGRAFICO

2.3.1 Esecuzione di sondaggi

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geomeccanico le fasce tettonizzate e di verificare la presenza ed estensione degli orizzonti calcarei riscontrati direttamente e indirettamente in fase 2, i n. 7 sondaggi eseguiti per tale finalità (SI43 è stato effettuato solo per installare la cella piezometrica e poter costituire la stazione di prova per l'emungimento su PZ3) sono stati spinti sino alle profondità di:

- 120 m da p.c. (**SI39**),
- 130 m da p.c. (**SI40**),
- 120 m da p.c. (**SI41**),
- 117 m da p.c. (**SI42**),
- 105 m da p.c. (**SI44**),
- 130 m da p.c. (**SI45**),
- 130 m da p.c. (**SI46**).

Nei suddetti sondaggi si è proceduto ad effettuare il prelievo di campioni indisturbati secondo lo schema illustrato nella sottostante tabella.

Tab . 2.1 - Modalità esecutive dei sondaggi di Fase 3

N°	Sondaggio	Piezometro	Profondità (m)	Campioni		
				N°	Denominazione	Profondità (m)
1	SI39	1 cella di Cas. (prof. m. 90)	120,00	1	C1	71,00 - 71,30
				2	C2	80,00 - 80,60
				3	C3	90,00 - 90,60
				4	C4	104,00 - 104,50
				5	C5	111,00 - 111,5
				6	C6	118,65 - 119,00
2	SI40	1 cella di Cas. (prof. m. 120)	130,00	1	C1	79,60 - 79,85
				2	C2	90,80 - 91,10
				3	C3	100,00 - 100,35
				4	C4	109,60 - 109,85
				5	C5	120,00 - 120,50
				6	C6	129,60 - 130,00

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 18 di 70

N°	Sondaggio	Piezometro	Profondità (m)	Campioni		
				N°	Denominazione	Profondità (m)
3	S41	2 celle di Cas. (prof. m. 80, prof. m. 100)	120,00	1	C1	80,00 - 80,25
				2	C2	89,90 - 90,20
				3	C3	100,00 - 100,30
				4	C4	110,00 - 110,25
				5	C5	118,70 - 119,00
4	SI42	2 celle di Cas. (prof. m. 70, prof. m. 110)	117	1	C1	80,00 - 80,25
				2	C2	88,60 - 89,20
5	SI43	1 cella di Cas. (prof. m. 105)	110,00	-	-	-
6	SI44	Piezometro tubo aperto 3"	105,00	-	-	-
7	SI45	Piezometro tubo aperto 3"	130,00	-	-	-
8	SI46	1 cella di Cas. (prof. m. 110)	130,00	-	-	-

Sui campioni indisturbati sono state effettuate le opportune prove di laboratorio (cfr. cap 3).

2.3.2 Prospezioni geofisiche

Oltre ai sondaggi si è proceduto all'esecuzione di ulteriori n. 4 prove sismiche di superficie con tecnica a riflessione finalizzate alla ricostruzione bidimensionale della stratigrafia e dell'assetto tettonico, oltre alla verifica della distribuzione dei parametri sismoelastici tramite la correlazione con la distribuzione e l'andamento della propagazione delle onde sismiche registrate.

Le prove sismiche sono state così suddivise:

- **SSR9** lunghezza = 252 m
- **SSR10** lunghezza = 114 m
- **SSR11** lunghezza = 75 m
- **SSR12** lunghezza = 72 m

La SSR10 è stata eseguita in corrispondenza della zona dell'imbocco lato AG, le SSR11 e SSR12 in corrispondenza del settore centrale della galleria in una zona poco coperta dalle indagini sinora svolte, la SSR09 ricade in corrispondenza del sondaggio SI27, laddove è stata riscontrata la presenza di orizzonti calcarei.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 19 di 70

2.4 ANALISI CHIMICHE E MINERALOGICHE

2.4.1 Caratterizzazione della matrice acquosa e gassosa

Durante le prove di emungimento si è provveduto, nel caso del pozzo PZ2, ad effettuare un prelievo di acqua durante la prova, al fine di provvedere alla caratterizzazione di base delle acque, utile allo studio del chimismo della falda.

Al fine di verificare la natura dei gas interstiziali contenuti nei livelli saturi indagati dal sondaggio SI27 si è proceduto all'analisi delle fasi gassose derivanti dal gorgogliamento delle acque campionate.

2.4.2 Caratterizzazione mineralogica dei terreni argillosi

Su n. 2 campioni di terreni argillosi, rappresentativi delle formazioni da attraversare in fase di scavo della galleria naturale Caltanissetta e prelevati dai sondaggi SI39 (C6) e S40 (C6), sono state effettuate delle determinazioni tramite diffrattometria, al fine di verificare la composizione mineralogica della frazione fine (minore di 2 µm) e determinare la presenza minerali che possono determinare effetti "rigonfianti" in fase di esecuzione degli scavi.

2.5 RIEPILOGO DELLE INDAGINI

La campagna di indagini geognostiche e geofisiche è stata eseguita dalla società SIDERCEM S.R.L. di Caltanissetta (CL), che ha svolto le attività affidatele secondo quanto previsto nelle specifiche tecniche del Capitolato Speciale di Appalto di cui agli allegati 1b "Norme tecniche per l'esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche" e 1c "Norme tecniche per l'esecuzione delle prove di laboratorio", nonché a quanto prescritto al par. 1.3 "Indagini geotecniche" del capitolato d'onori NG 15.

La predetta campagna indagini, realizzata nel periodo compreso tra febbraio e luglio 2011, è consistita pertanto in una serie di sondaggi geognostici a carotaggio continuo, prove in situ ed indagini geofisiche, articolate come specificato nel precedente paragrafo e nel riepilogo riportato nel seguito.

I Rapporti di Prova delle indagini geognostiche, redatte dalla Ditta esecutrice dei lavori, rientrano tra gli Elaborati di Progetto Esecutivo, al punto 9.3 (000GE209GT03ZIG017 "Rapporto di prova generale – 3° fase", 000GE209GT03ZIG018 "All. A Colonne stratigrafiche – 3° fase", 000GE209GT03ZIG019 "All. B Indagini Geofisiche – 3° fase", 000GE209GT03ZIG020 "All. C Prove di laboratorio – 3° fase", 000GE209GT03ZIG021 "All. D Documentazione fotografica – 3° fase").

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 20 di 70

2.5.1 Perforazione di sondaggi

Sondaggi geognostici

Si è proceduto alla realizzazione di n. 8 perforazioni a carotaggio continuo condotte con profondità comprese tra 105 e 140 m di prof. da p.c., localizzate opportunamente lungo il tracciato in progetto. Le profondità sono dipese dalla quota della galleria e dalle finalità da perseguire.

Per l'esecuzione dell'intera campagna d'indagini sono state utilizzate le seguenti sonde oleodinamiche:

- ✓ Perforatrice C6 Casagrande;
- ✓ Perforatrice Mait T9;

Il carotaggio è stato eseguito impiegando utensili di perforazione del diametro minimo di Ø 101 mm (carotiere semplice con corona Widia) e per il sostegno delle pareti dei fori, sono stati utilizzati tubi di rivestimento provvisori, con diametro Ø 127 mm.

La loro ubicazione viene riportata in dettaglio nell'apposito elaborato progettuale 000GE209GT03ZP6001 "Planimetria con ubicazione delle indagini in sito".

Le stratigrafie particolareggiate dei sondaggi, la relativa documentazione fotografica, le quote di prelievo dei campioni, il tipo di condizionamento del foro di sondaggio, sono riportate nelle allegate risultanze delle indagini geognostiche redatte dalla Ditta esecutrice dei lavori (cfr. Elaborati di Progetto Esecutivo, punto 9.3, 000GE209GT03ZIG017 "Rapporto di prova generale – 3° fase", 000GE209GT03ZIG018 "All. A Colonne stratigrafiche – 3° fase", 000GE209GT03ZIG021 "All. D Documentazione fotografica – 3° fase"). Le cassette catalogatrici, singolarmente fotografate, sono state riposte, su indicazioni della committenza, presso la sede di Racalmuto (AG) della società "Empedocle SCPA".

Esecuzione di pozzi

Nelle immediate vicinanze di n. 3 piezometri installati in questa fase (SI40, SI42, SI43) si è proceduto alla esecuzione di perforazione a distruzione di nucleo per la installazione di altrettanti pozzi (PZ1 prof. 140 m, PZ2 prof. 120 m, PZ3 prof. 120 m) utili alla esecuzione di prove di emungimento, finalizzate alla determinazione dei parametri idraulici degli acquiferi interessati dal cavo della galleria.

Prelievo di campioni indisturbati

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 21 di 70

Durante l'esecuzione di n. 4 sondaggi a carotaggio continuo (SI39, SI40, SI41, SI42) si è proceduto al prelievo di campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei litotipi riscontrati, con n° 1 campione indisturbato ogni 10 m di sondaggio a partire dalle profondità ritenute opportune sulla base della quota della galleria; il numero dei campioni e le quote a cui prelevarli sono indicati in tabella 2.1;

Posa in opera di strumentazione geotecnica/ambientale

Si è proceduto alla posa delle seguenti strumentazioni:

- Piezometri con cella di Casagrande: in n. 6 sondaggi (SI39, SI40, SI41, SI42, SI43, SI46) sono stati installati altrettanti piezometri con celle di Casagrande, doppi o singoli così come indicato in tab. 2.2;
- Piezometri tubo aperto 3": n. 2 installati nei sondaggi SI44 e SI45;
- Pozzi DN 4,5": n. 3 installati nei sondaggi a distruzione denominati PZ1, PZ2 e PZ3.

2.5.2 Prove in situ

Prove di permeabilità in foro

In fase di perforazione di 7 sondaggi (SI39, SI40, SI41, SI42, SI44, SI45, SI46) sono state eseguite delle prove di permeabilità in foro tipo *Lefranc*, in corrispondenza delle quote di installazione delle celle di Casagrande e laddove ritenuto necessario in fase di esecuzione.

Prove di emungimento in pozzi appositamente realizzati

Sui tre pozzi PZ1, PZ2 e PZ3 sono state eseguite altrettante prove idrauliche di lunga durata (48 ore) con la metodologia e la modalità esposta in § 2.2.1.

Prova di portata a gradini

Sul pozzo PZ2 è stata effettuata una prova di portata a gradini (n. 3) per verificare la capacità di immagazzinamento e ricarica dell'acquifero interessato;

Slug Test

In corrispondenza di n. 8 piezometri (S8, S9, S10, S40, S41, S43, S45, S46) installati nelle 3 fasi di indagini integrative, si è proceduto all'effettuazione di determinate prove consistenti nell'esecuzione dello spurgo all'interno di ogni singolo punto, con lo scopo di provocare un abbassamento consistente (se non l'intero svuotamento) del livello idrico in esso contenuto e la conseguente misurazione dei livelli di risalita.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 22 di 70

2.5.3 Prove di laboratorio

I n. 19 campioni indisturbati prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati sottoposti a prove di laboratorio, finalizzate alla definizione delle caratteristiche fisiche e meccaniche e chimiche dei litotipi riscontrati, nel seguito elencate:

- Classificazione della terra mediante: Analisi granulometrica e classificazione secondo la CNR-UNI 10006;
- Determinazione dei Limiti di Atterberg: consistenza liquido, plastico ed indice plastico;
- Peso specifico dei grani, peso specifico secco del contenuto in acqua ;
- Prove di taglio diretto
- Prove triassiali
- Prove edometriche e di determinazione del coefficiente Cv
- Pressione di rigonfiamento ISP
- Deformazione di rigonfiamento ISS
- Prove finalizzate alla determinazione della capacità di adesione delle argille sulla macchina
- Determinazione mineralogiche per il riscontro di presenza di minerali argillosi con caratteristiche rigonfianti
- Prove chimiche finalizzate al riutilizzo con stabilizzazione a calce

Il campione di acqua prelevato durante l'esecuzione della prova di emungimento condotta su PZ2, è stato sottoposto ad analisi chimica per la caratterizzazione di base idrogeologica; i parametri ricercati sono stati i seguenti:

- Temperatura
- pH
- Conducibilità elettrica specifica a 20°C
- Residuo fisso a 180°C
- Durezza °F
- CO2 libera
- SiO2
- H₂S
- Cationi: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺
- Anioni: SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, HCO₃⁻, F⁻, CL⁻

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 23 di 70

2.5.4 Prospezioni geofisiche

Si è proceduto alla esecuzione di n. 4 prove sismiche di superficie con tecnica a riflessione, lungo l'asse longitudinale della galleria Caltanissetta, di lunghezza compresa tra 70 e 250 m.

La prospezione di sismica a riflessione è stata realizzata con l'intento di definire nel dettaglio l'assetto geostrutturale del sottosuolo in corrispondenze delle aree investigate.

Le 4 stese sismiche sono state posizionate planimetricamente in accordo sia alle indicazioni del consulente geologo della società committente sia in relazione alla logistica dei luoghi. È stata proprio quest'ultima che ha pesantemente influenzato le prospezioni in quanto operando in un'area urbana o nella sua immediata periferia si è dovuto tenere conto della molteplicità di vincoli di diversa natura che hanno condizionato le modalità operative e reso molto laboriosa l'interpretazione dei profili realizzati (presenza di elevato noise ambientale).

Per l'acquisizione dei segnali sismici si è utilizzato un sismografo digitale a 24 bit (Geode, Geometrics) ed una serie di geofoni verticali (OYO GEOSPACE) a frequenza di 40 Hz.

La scelta ottimale dell'offset minimo e massimo è stata attuata con un test preliminare (walkaway noise test) con il quale si sono anche definiti i principali parametri di acquisizione (lunghezza delle registrazioni, intervallo di campionamento, ecc.); come tecnica di prospezione, invece, si è applicata una modalità di rilievo continua mediante stendimenti "end on" rispetto al punto di energizzazione.

Gli stendimenti sismici, implementati con tecnica CDP e copertura multipla del 600%, sono stati interpretati con un complesso processo elaborativo, processo che oltre a presupporre conoscenze ed esperienza si è svolto attraverso i seguenti steps principali:

- **bilanciamento delle ampiezze;**
- **ripartizione delle tracce in CDP;**
- **analisi di velocità (semblance);**
- **correzione di NMO.**

Inoltre per migliorare la qualità delle sezioni sismiche sono state anche applicate delle speciali tecniche d'elaborazione che hanno comportato il miglioramento del rapporto segnale rumore ed il riposizionamento dei dati sulla sezione (filtraggi, deconvoluzione, correzioni statiche preliminari e residue, filtraggio di velocità e migrazione).

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 24 di 70

Le diverse stese sismiche sono state ottimizzate con distanze intergefoniche variabili dai 2 ai 5 m e nel complesso si sono realizzati stese sismiche per complessivi 716 m; nel seguito si riportano gli orientamenti e le lunghezze di ogni singola traversa

Le prove sismiche sono state così suddivise:

- **SSR9** lunghezza = 252 m
- **SSR10** lunghezza = 114 m
- **SSR11** lunghezza = 75 m
- **SSR12** lunghezza = 72 m

A conclusione del processo di elaborazione si è prodotto dapprima un Report preliminare, con presentazione delle sezioni "Depth stack" dei sette profili realizzati; scopo di tale Report è stato quello di fornire al consulente geologo elementi per poter correlare specifici pattern sismici a orizzonti litologici o a lineamenti tettonici noti o comunque interpretabili in maniera affidabile. Tale processo ha permesso di valutare l'importanza e specificità dei risultati geofisici ottenuti e ha avuto come feedback finale una conferma della validità e coerenza sul piano geologico della modellizzazione geofisica preliminarmente presentata.

2.5.5 Tabelle riepilogative

Tab. 2.2 - Riepilogo indagini dirette e prove in sito

	Sigla	Prog. Km	Prof. (m)	Camp. Ind. (n)	Tipologia installazione	Prove
1	SI39	13+600	120	6	n. 1 cella Casagrande	2 Lefranc
2	SI40	14+150	130	7	n. 1 cella Casagrande	2 Lefranc – 1 Slug test
3	SI41	15+770	120	6	n. 2 celle Casagrande	2 Lefranc – 1 Slug test
4	SI42	15+900	117	6	n. 2 celle Casagrande	3 Lefranc
5	SI43	13+710	110	-	n. 1 cella Casagrande	1 Slug test
6	SI44	16+000	105	-	Piezometro a tubo aperto DN 3"	1 Lefranc
7	SI45	14+275	130	-	Piezometro a tubo aperto DN 3"	1 Lefranc – 1 Slug test
8	SI46	14+115	130	-	n. 1 cella Casagrande	2 Lefranc – 1 Slug test
9	PZ1	14+190	140	-	Piezometro a tubo aperto DN 4,5"	Emungimento
10	PZ2	15+890	120	-	Piezometro a tubo aperto DN 4,5"	Emungimento
11	PZ3	13+700	120	-	Piezometro a tubo aperto DN 4,5"	Emungimento

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 25 di 70

Tab. 2.3 – Riepilogo delle indagini geofisiche di superficie

	Sigla	Lungh. (m)	Tipologia	Prog. Km
1	SSR09	252	Sismica a riflessione	15+500
2	SSR10	114	Sismica a riflessione	13+220
3	SSR11	75	Sismica a riflessione	14+950
4	SSR12	72	Sismica a riflessione	15+130

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 26 di 70

3. PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE

3.1 PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO SUI CAMPIONI INDISTURBATI

Le prove geotecniche sono state realizzate dal laboratorio ufficiale Sidercem s.r.l con sede a Caltanissetta (CL). I risultati ottenuti dalle prove geotecniche di laboratorio sono sintetizzati nelle tabelle seguenti e le relative elaborazioni sono riportate nell'elaborato di progetto 000GE209GT03ZIG020 "All. C Prove di laboratorio – 3° fase".

Tabella 3.1 – Prove geotecniche di laboratorio – Caratteristiche fisiche

Campione		W_n	γ_s	γ	γ_d	e	n	s	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	W_i	W_p	* I_p	* I_c	* I_L	A
Sigla	Profondità [m]	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³			%	%	%	%	%	%	%	%			
SI39-CI1	71,00 - 71,30	25,9	2750	1938	1540	0,786	0,440	91	0,00	4,94	37,36	57,7	46	32	14	1,4	-0,44	0,24
SI39-CI2	80,00 - 80,60	27,6	2747	1983	1553	0,769	0,435	99	10,97	4,82	32,33	51,87	49	28	21	1,0	-0,02	0,40
SI39-CI3	90,00 - 90,60	22,1	2726	2058	1686	0,617	0,382	98	0,00	4,86	38,52	56,63	66	31	35	1,3	-0,25	0,62
SI39-CI4	104,00 - 104,50	19,2	2729	2113	1773	0,539	0,350	97	0,05	5,46	41,39	53,1	79	33	46	1,3	-0,30	0,87
SI39-CI5	111,00 - 111,5	17,3	2725	2132	1818	0,499	0,333	94	0,62	7,69	31,85	59,85	76	40	36	1,6	-0,63	0,60
SI39-CI6	118,65 - 119,00	20,7	2729	2070	1714	0,592	0,372	96	0,03	2,38	27,49	70,1	89	27	62	1,1	-0,10	0,88
SI40-CI1	79,60 - 79,85	26,2	2680	1857	1471	0,822	0,451	86	16,38	5,58	30,72	47,32	37	25	12	0,9	0,10	0,25
SI40-CI2	90,80 - 91,10	19,7	2751	2085	1742	0,580	0,367	94	0,06	5,73	46,17	48,04	74	29	45	1,2	-0,21	0,94
SI40-CI3	100,00 - 100,35	19,4	2746	2121	1775	0,547	0,353	98	0,32	6,13	42,28	51,26	82	33	49	1,3	-0,28	0,96
SI40-CI4	109,60 - 109,85	19,1	2750	2119	1779	0,546	0,353	96	0,03	4,14	41,45	54,38	82	33	49	1,3	-0,28	0,90
SI40-CI5	120,00 - 120,50	21,8	2689	2042	1676	0,604	0,377	97	0,00	4,36	38,93	56,71	76	31	45	1,2	-0,20	0,79
SI40-CI6	129,60 - 130,00	18,1	2743	2080	1752	0,566	0,361	91	0,02	4,98	38,59	56,41	79	32	47	1,3	-0,30	0,83
SI41-CI1	80,00 - 80,25	19,7	2730	2015	1683	0,622	0,383	86	0,21	4,80	56,52	38,47	73	34	39	1,4	-0,37	1,01
SI41-CI2	89,90 - 90,20	19,4	2733	2121	1775	0,539	0,350	99	0,00	2,50	37,92	59,58	52	30	22	1,5	-0,48	0,37
SI41-CI3	100,00 - 100,30	21,3	2729	2044	1685	0,619	0,382	94	0,23	4,60	44,22	50,95	76	31	45	1,2	-0,22	0,88
SI41-CI4	110,00 - 110,25	19,6	2732	2015	1685	0,622	0,383	86	1,02	5,11	47,23	46,64	37	23	14	1,2	-0,24	0,30
SI41-CI5	118,70 - 119,00	17,6	2696	2098	1785	0,511	0,338	93	3,54	11,67	37,45	47,34	41	23	18	1,3	-0,30	0,38
SI42-CI1	80,00 - 80,25	30,6	2699	1780	1363	0,980	0,495	84	22,11	9,04	49,84	19,01	54	33	21	1,1	-0,11	1,10
SI42-CI2	88,60 - 89,20	25,0	2751	1964	1571	0,751	0,429	92	0,00	2,48	57,02	40,51	80	39	41	1,3	-0,34	1,01

Tabella 3.2 – Prove geotecniche di laboratorio – Caratteristiche meccaniche delle terre

Campione		Prova di taglio diretto C.D.			Prova Triassiale UU			ELL	Prova di compressione triassiale CIU					
Sigla	Profondità [m]	Pressione verticale	Sforzo di taglio	Attrito e coesione		Pressione di cella	Attrito e coesione		Coesione Cu	Pressione di cella	Back Pressure	Attrito e coesione		
		kPa	kPa	C'	ϕ'		Cu	ϕ_u				C'	ϕ'	
				kPa	°	kPa	kPa	°	kPa	kPa	kPa	kPa	°	
SI40 - CI1	79,60 - 79,85	Taglio diretto												
		343,25	359,03											
		539,39	439,23	111,0	33,5									
SI40 - CI2	90,80 - 91,10	Taglio diretto												
		343,25	153,15											
		539,39	251,98	15,7	22,7									
SI40 - CI3	100,00 - 100,35									1000	250			
										800	250	110	20	
										600	250			
SI40 - CI4	109,60 - 109,85													
SI40 - CI5	120,00 - 120,50					1000	197,0							
SI40 - CI6	129,60 - 130,00					1000								
						1000	492,3							
						1000								
SI41 - CI1	80,00 - 80,25	Taglio diretto												
		343,25	155,99							431,4				
		539,39	227,98	15,0	22,7									
SI41 - CI2	89,90 - 90,20									1000	250			
										800	250	100	22	
										600	250			
SI41 - CI3	100,00 - 100,30					1000	654,2							
SI41 - CI4	110,00 - 110,25					1000								
						1000	1094,4							
						1000								
SI41 - CI5	118,70 - 119,00					1000	976,5							
SI39 - CI1	71,00 - 71,30	Taglio diretto												
		343,245	221,54							127,55				
		539,385	340,16	41,2	28,3									
SI39 - CI2	80,00 - 80,60					800								
						900	760,03							
SI39 - CI3	90,00 - 90,60									1000	250			
										800	250	45	20	
										600	250			

PROGETTO ESECUTIVO

Campione		Prova di taglio diretto C.D.			Prova Triassiale UU			ELL	Prova di compressione triassiale CIU				
Sigla	Profondità [m]	Pressione verticale kPa	Sforzo di taglio kPa	Attrito e coesione		Pressione di cella kPa	Attrito e coesione		Coesione Cu kPa	Pressione di cella kPa	Back Pressure kPa	Attrito e coesione	
				C'	φ'		Cu	φu				C'	φ'
SI39 - CI4	104,00 - 104,50					1000 1000 1000		494,29					
SI39 - CI5	111,00 - 111,5					1000 1000 1000		581,12					
SI39 - CI6	118,65 - 119,00					1000 1000		426,34					
SI42- CI1	80,00 - 80,25	Taglio diretto											
		343,245	230,76										
		539,385	391,87	31,5	32,5								
		784,56	546,59										
SI42- CI2	88,60 - 89,20					900 1000		662,65					

Tabella 3.3 – Prove geotecniche di laboratorio – Prove Edometriche, di rigonfiamento e Pocket

Campione		Edometria				ISP	ISS	Pocket	
Sigla	Profondità [m]	Pressione σ kPa	Cv mm ² /s	E kPa	K mm/s	Pressione σ kPa	ΔH/H a carico nullo [%]	kPa	
									SI40 - CI1
SI40 - CI2	90,80 - 91,10					355,5		1033	
SI40 - CI3	100,00 - 100,35							1100	
SI40 - CI4	109,60 - 109,85	24,52							
		49,04		10897					
		98,07		11816					
		196,14		20221					
		392,28		31133			331,0	-16,1	1317
		784,56		41511					
		1569,12	1,67E-02	41843	4,06E-09				
3138,24	7,41E-03	57688	1,32E-09						
SI40 - CI5	120,00 - 120,50	24,52		-					
		49,04		-					
		98,07		8603					
		196,14		11403					
		392,28		18591			190,0	-17,8	950
		784,56	5,51E-02	22100	2,53E-08				
		1569,12	7,70E-03	27384	2,89E-09				

PROGETTO ESECUTIVO

Campione		Edometria				ISP	ISS	Pocket
Sigla	Profondità [m]	Pressione σ	Cv	E	K	Pressione σ	$\Delta H/H$ a carico nullo	kPa
		3138,24	5,59E-03	46219	1,28E-09			
SI40 - CI6	129,60 - 130,00	24,52		2739		245,2	-26,0	1000
		49,04		5004				
		98,07		8139				
		196,14		9783				
		392,28		15323	2,43E-08			
		784,56	3,51E-02	24594	2,03E-09			
		1569,12	4,60E-03	44832	9,92E-10			
3138,24	3,94E-03							
SI41 - CI1	80,00 - 80,25							1050
SI41 - CI2	89,90 - 90,20						-1,2	900
SI41 - CI3	100,00 - 100,30	24,52	-	2010	-	12,3		783
		49,04	-	3184	-			
		98,07	-	4855	-			
		196,14	-	10007	-			
		392,28	-	16982	-			
		784,56	-	27920	-			
		1569,12	-	53922	-			
3138,24	-	71978	-					
SI41 - CI4	110,00 - 110,25	24,52	-	-	-			
		49,04	-	3861	-			
		98,07	-	6763	-			
		196,14	-	9039	-			
		392,28	-	12221	-			
		784,56	-	22940	-			
		1569,12	-	41732	-			
3138,24	-	68223	-					
SI41 - CI5	118,70 - 119,00	24,52	-	1270	-	30,6		
		49,04	-	2087	-			
		98,07	1,75E-01	3153	5,59E-07			
		196,14	3,35E-02	6327	5,40E-08			
		392,28	3,57E-02	11176	3,31E-08			
		784,56	3,41E-02	18203	1,98E-08			
		1569,12	4,79E-02	37183	1,39E-08			
3138,24	6,47E-02	57688	1,17E-08					
SI39 - CI1	71,00 - 71,30							>1400
SI39 - CI2	80,00 - 80,60					12,3	-0,4	1400
SI39 - CI3	90,00 - 90,60	24,52		-		61,3	-13,5	1008
		49,04		7430				
		98,07		9430				

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc		Pagina 30 di 70

Campione		Edometria				ISP	ISS	Pocket
Sigla	Profondità [m]	Pressione σ	Cv	E	K	Pressione σ	$\Delta H/H$ a carico nullo	kPa
		196,14	4,52E-01	11208	4,00E-07			
		392,28	6,83E-02	13164	5,20E-08			
		784,56	5,40E-02	20378	2,69E-08			
		1569,12	3,96E-02	32286	1,27E-08			
		3138,24	3,50E-02	49266	7,57E-09			
SI39 - CI4	104,00 - 104,50	24,52	-	-	-	367,8	-9,2	783
		49,04	-	-	-			
		98,07	-	-	-			
		196,14	-	-	-			
		392,28	-	-	-			
		784,56	-	29384	-			
		1569,12	2,07E-02	33745	6,23E-09			
3138,24	6,70E-03	46355	1,53E-09					
SI39 - CI5	111,00 - 111,5							1192
SI39 - CI6	118,65 - 119,00					318,7		1192
SI42- CI1	80,00 - 80,25							717
SI42- CI2	88,60 - 89,20					30,6	-2,6	1250

3.2 PROVE CHIMICHE DI LABORATORIO

3.2.1 Determinazioni sui campioni prelevati da sondaggi

In alcuni campioni prelevati in corrispondenza dei sondaggio effettuati sulla prevista Galleria Caltanissetta, sono state effettuate alcune determinazioni chimiche finalizzate a caratterizzare i terreni per un eventuale riutilizzo con stabilizzazione a calce, secondo le norme tecniche CNR di cui al B.U. CNR n. 36.

I risultati ottenuti dalle prove chimiche di laboratorio sono sintetizzati nella tabella seguente i relativi certificati sono riportati nell'elaborato di progetto 000GE209GT03ZIG020 "Allegato C Prove di laboratorio – 3° fase", all'interno dei relativi certificati emessi per ogni campione prelevato.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 31 di 70

Tabella 3.4 – Prove chimiche di laboratorio

Campione		Sostanza organica	Solfati SO4	Solfuri H2S	Nitrati NO3	V.B.
Sigla	Profondità [m]	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	g/kg
SI40 - CI5	120,00 - 120,50	6,32	698	<100	<50	>4
SI41 - CI3	100,00 - 100,30	1,54	747	<100	<50	>4
SI39 - CI4	104,00 - 104,50	4,80	965	<100	<50	>4

I risultati ottenuti, confrontati con i valori di riferimento riportati (da “*Specifica Tecnica –Trattamento delle terre con calce*” Norma Interna FS - 1999), permettono di definire che nel caso del contenuto di sostanza organica, in SI39 e SI40 si riscontrano valori (> 2%) associabili a terreni con limitazioni d'uso per la stabilizzazione a calce.

3.2.2 Acque di falda

Le acque prelevate dal pozzo Pz2 su cui è stata effettuata la prova di emungimento hanno dato i seguenti esiti analitici:

⇒	Temperatura	= 16,9 °C;
⇒	pH	= 7,76
⇒	Conducibilità	= 5498 µS/cm
⇒	TDS (solidi totali disciolti)	= 4317 ppm;
⇒	Salinità	= 5966 ppm;
⇒	Solfati	= 785 mg/l
⇒	Cloruri	= 1360 mg/l.
⇒	Idrogeno solforato	= 91,9 mg/l.

Con riferimento ai valori riportati nel prospetto 2 (“*Valori limite per le classi di esposizione all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno*”) della norma UNI EN 206-1-2006, i cui valori sono riportati nella sottostante tabella, per quanto riguarda i solfati i valori riscontrati rientrano in classe moderatamente aggressiva (XA2).

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 32 di 70

Caratteristica chimica	Metodo di prova di riferimento	XA1	XA2	XA3
Acqua nel terreno				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 e ≤600	>600 e ≤3 000	>3 000 e ≤6 000
pH	ISO 4316	≤6,5 e ≥5,5	<5,5 e ≥4,5	<4,5 e ≥4,0
CO ₂ mg/l aggressiva	prEN 13577:1999	≥15 e ≤40	>40 e ≤100	>100 fino a saturazione
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 oppure ISO 7150-2	≥15 e ≤30	>30 e ≤60	>60 e ≤100

L'elevato tenore di Cloruri riscontrato fa propendere, però, alla adozione di una classe di aggressività associata al rischio di corrosione promossa dal cloruro, qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con acqua contenente cloruri, inclusi i sali antigelo, con origine diversa dall'acqua di mare, così come riportato nel Prospetto 1 della summenzionata norma UNI EN 206-1-2006.

3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
Qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con acqua contenente cloruri, inclusi i sali antigelo, con origine diversa dall'acqua di mare, l'esposizione sarà classificata come segue: Nota In riferimento alle condizioni di umidità vedere anche sezione 2 del presente prospetto.		
XD1	Umidità moderata	Superfici di calcestruzzo esposte a nebbia salina
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine Calcestruzzo esposto ad acque industriali contenenti cloruri
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri Pavimentazioni Pavimentazioni di parcheggi

Per quanto riguarda il campionamento effettuato nel piezometro SI27 le analisi condotte sui gas estratti tramite gorgogliamento dalla matrice acqua, i cui risultati sono riportati nella seguente figura (cfr. Fig. 3.1), hanno evidenziato la presenza di CO₂ e CH₄ con valori di concentrazioni particolarmente interessanti, rispettivamente pari a:

- 4,5÷4,6 % per l'anidride carbonica,
- 170 ppm per il metano.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 33 di 70

Analisi sostanze organiche volatili – SI27	
Sostanze organiche volatili	Concentrazione
CO ₂	4.5 – 4.6 %
CH ₄	170 ppm

Il Consulente Responsabile di Commessa
dott. ing. *Marcella Venturelli*
Il Vice Direttore di Laboratorio
dott. *gest. Sabrina Chiavetta*

Fig. 3.1 – Stralcio del RdP sulle analisi dei gas derivante da gorgogliamento delle acque di SI27

I relativi certificati sono riportati nell'elaborato di progetto 000GE209GT03ZIG017 "Rapporto di prova generale - 3 fase";

3.3 PROVE DI CONDIZIONAMENTO E ADESIVITÀ DELLE ARGILLE

Dall'elaborazione dei dati di plasticità e di consistenza delle argille si evince il rischio adesività sui macchinari di perforazione è molto alto come anche confermato dalle sperimentazioni di condizionamento sviluppate nel Laboratorio Gallerie e Opere Sotterranee del DITAG al Politecnico di Torino.

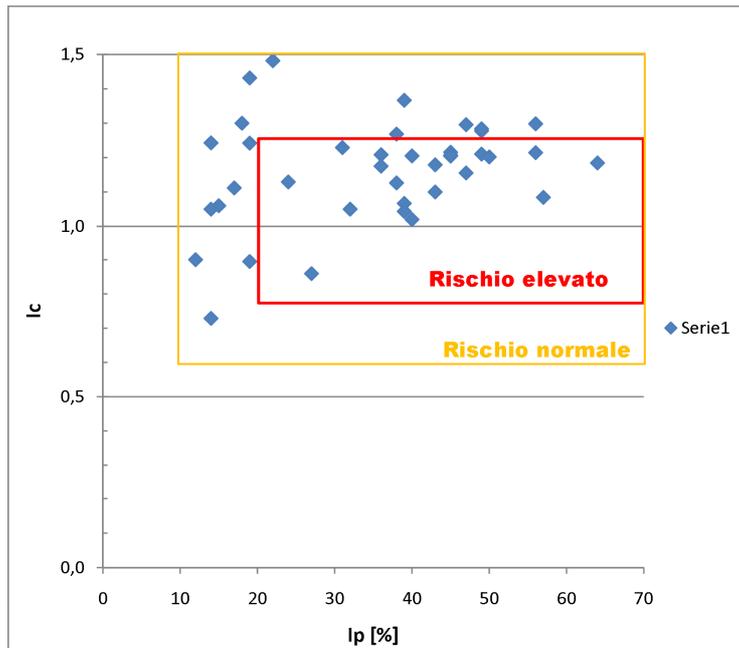


Fig. 3.2 – Interno della betoniera utilizzate nelle prove per la miscelazione in cui si osserva il comportamento colloso delle argille che si incollano alle pareti della stessa

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: <i>RELAZIONI GEOLOGICHE</i>	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 34 di 70

La fotografia di Fig. 3.2 mostra come un campione di argilla Pliocenica addizionata con 8% di acqua oltre l'acqua naturalmente presente nel campione e con agenti schiumogeni (FER=15 e FIR 70%), che corrispondono a dosaggi normali per condizioni analoghe di scavo con EPB resti incollata alle pareti del mixer.

In queste condizioni nello scavo con EPB sarà necessario ricorrere a trattamenti di condizionamento con speciali agenti condizionanti in grado di minimizzare questo rischio.



Rischio elevato \Rightarrow $0,75 < I_c < 1,25$ $I_p > 20\%$

Grafico 3.1 – Diagramma I_p/I_c indicatore della "adesività" delle argille, in cui sono distribuiti i campioni prelevati durante le 3 fasi delle indagini integrative.

Dai dati riportati nel grafico si evince che circa il 55% dei campioni rientra nell'area con elevato rischio di clogging ossia del rischio bloccaggio del macchinario di perforazione a causa delle caratteristiche di adesività delle argille.

In totale nella zona critica rientrano n. 23 campioni su 40, distribuiti nelle varie formazioni argillose riscontrabili:

- Argille brecciate del Tortoniano
- Marne argillose plioceniche (Trubi)
- Argille brecciate plioceniche (associate ai Trubi)

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 35 di 70

3.4 PROVE MINERALOGICHE SULLE ARGILLE

L'analisi mineralogica condotta con tecnica diffrattometrica sulla frazione < 2 µm dei materiali argillosi esaminati ha permesso di ottenere un tracciato in cui si riconoscono le seguenti percentuali semiquantitative di minerali argillosi:

- Smectite 40%
- Illite 13%
- Kaolinite 46%

Il gruppo delle Smectiti comprende minerali quali la montmorillonite, le cui proprietà rigonfianti sono note in letteratura e nelle applicazioni pratiche.

Le smectiti sono, quindi, un gruppo di minerali altamente rigonfianti, per assorbimento sia di acqua sia di molecole organiche entro gli strati strutturali. Le smectiti mostrano notevoli proprietà di scambio cationico. Il minerale argilloso che le compone allo stato cristallino deriva dalla devetrificazione e conseguente alterazione chimica di vetri di origine magmatica, generalmente tufi o ceneri vulcaniche. La natura e le origini vulcaniche dei giacimenti bentonitici danno luogo a varietà spesso fortemente eterogenee del minerale. Vengono così a formarsi bentoniti che possono essere descritte in associazione con gli ioni dominanti, quali K, Na, Ca e Al.

Le prove e i relativi grafici e tracciati, con descrizione delle metodologie adottate, sono riportate nei relativi certificati CBC014711 e CBC014712 emessi da SIDERCEM e presenti nell'elaborato di progetto 000GE209GT03ZIG020 "All. C Prove di laboratorio – 3° fase".

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 36 di 70

4. PROVE IN SITU ESEGUITE

4.1 PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORO

Le prove di permeabilità, effettuate in foro con metodologia *Lefranc* (a carico variabile) durante le perforazioni dei sondaggi di Fase 3, hanno evidenziato, nei casi degli acquiferi associati alle formazioni marnoso-argillose, i valori di conducibilità idraulica riportati nella tabella seguente.

Sondaggio	Prof. [m]	Litologia	$k = -\frac{\pi D^2}{4\psi} \frac{\ln \frac{h_2}{h_1}}{(t_2 - t_1)}$ [m/sec] per:				
			$\psi = 2D$ $\psi = 0,254$	$\psi = 2,75D$ $\psi = 0,34925$	$L \gg D$ $\psi = 0,5$	$\psi = 1$	$\psi = (2\pi D) + L$ $\psi = 1,298$
SI39	60	Argilla marnosa e marna-argillosa consistente, scagliosa e fratturata di colore grigio-biancastro	$6,96 \cdot 10^{-5}$	$5,06 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	81		$6,65 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$3,38 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$
		$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	
	88		$4,47 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$8,75 \cdot 10^{-6}$
			$t = 7200 \text{ sec}$	$t = 7200 \text{ sec}$	$t = 7200 \text{ sec}$	$t = 7200 \text{ sec}$	$t = 7200 \text{ sec}$
SI40	120	Argilla marnosa e marna-argillosa scagliosa fortemente consistente - con inclusi litici millimetrici - di colore grigio-verdastro	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$4,35 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	130		$9,10 \cdot 10^{-5}$	$6,62 \cdot 10^{-5}$	$4,62 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
SI41	60	Argilla marnosa a struttura brecciata, consistente, scagliosa e fratturata, di colore grigio-biancastro	$6,32 \cdot 10^{-5}$	$4,59 \cdot 10^{-5}$	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	100	Argilla marnosa molto consistente, scagliosa e fratturata, di colore grigio-biancastro con livelli marnosi sottilmente stratificati	$6,22 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
SI42	60,50	Argilla marnosa consistente, di colore grigio chiaro con livelli marnosi debolmente fratturati	$8,18 \cdot 10^{-7}$	$5,95 \cdot 10^{-7}$	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$2,08 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	70,50		Argilla marnosa e marna argillosa consistente, di colore grigio-biancastro con livelli marnosi fratturati	$4,18 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	110,00	Breccia calcarea in matrice limosa di colore biancastro. Alternata a livelli di argilla limosa di colore grigio-biancastro	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$7,76 \cdot 10^{-5}$	$5,42 \cdot 10^{-5}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
SI44	60	Marna argillosa consistente di colore grigio-biancastro, con inclusi livelli di marna calcarea (Trubi)	$2,29 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	$5,82 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-6}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
SI45	60	Argilla marnosa e marna argillosa di colore grigio chiaro (Trubi)	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$9,16 \cdot 10^{-8}$	$4,58 \cdot 10^{-8}$	$3,53 \cdot 10^{-8}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
SI46	60	Marna argillosa di colore grigio chiaro-biancastro (Trubi)	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$6,65 \cdot 10^{-7}$	$5,12 \cdot 10^{-7}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$
	95	Argilla limosa e argilla marnosa a struttura brecciata, di colore grigio-verdastro	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$7,95 \cdot 10^{-7}$	$3,98 \cdot 10^{-7}$	$3,06 \cdot 10^{-7}$
			$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$	$t = 3600 \text{ sec}$

Tabella 4.1 – Valori di permeabilità ottenuti dalle prove di permeabilità condotte in foro

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 37 di 70

Considerando il fattore di forma $\psi = 2,75D$, più rappresentativo per le condizioni presenti, i valori di permeabilità derivanti dalle prove sono:

Sondaggio	Prof. (m)	Permeabilità (m/sec)
SI39	60	$5,06 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	81	$4,84 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	88	$3,25 \cdot 10^{-5}$ $t = 7200 \text{ sec}$
SI40	120	$4,35 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	130	$6,62 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
SI41	60	$4,59 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	100	$4,52 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
SI42	60,50	$5,95 \cdot 10^{-7}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	70,50	$3,04 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	110,00	$7,76 \cdot 10^{-5}$ $t = 3600 \text{ sec}$
SI44	60	$1,67 \cdot 10^{-6}$ $t = 3600 \text{ sec}$
SI45	60	$1,31 \cdot 10^{-7}$ $t = 3600 \text{ sec}$
SI46	60	$1,90 \cdot 10^{-6}$ $t = 3600 \text{ sec}$
	95	$1,14 \cdot 10^{-6}$ $t = 3600 \text{ sec}$

Tabella 4.2 – Valori di permeabilità considerati, derivanti dalle prove di permeabilità condotte in foro

4.2 PROVE DI EMUNGIMENTO SU POZZI

Ai fini della determinazione dei parametri idrodinamici delle falde riscontrate in corrispondenza del cavo della galleria sono state eseguite le prove di emungimento su tre stazioni di monitoraggio (PZ1-SI40, PZ2-SI42, PZ3-SI43) con la metodologia e le modalità illustrate nel § 6.4.2.

La prova nella **stazione PZ1-SI40** non è stato possibile eseguirla in maniera corretta in quanto il pozzo è risultato non funzionale, con problemi di ripetuti afflussi di sedimenti all'interno della

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 38 di 70

tubazione che hanno impedito il regolare funzionamento della pompa sommersa e, conseguentemente, lo svolgimento della prova, nonostante siano stati effettuati ripetuti spurghi con pompaggi e con il metodo dell'air-lift (immissione di aria compressa all'interno del pozzo).

4.2.1 Prova di emungimento sulla stazione PZ2-SI42

La **prova di emungimento** effettuata nel pozzo PZ2 ha utilizzato come piezometro il punto SI42 in cui sono installate n. 2 celle di Casagrande a -70 m da p.c. e a -110 m da p.c.. Il pozzo è profondo 120 m ed ha la fenestratura tra -75 m e il fondo foro. La prova è stata condotta per 48 ore con una portata media di 1,8 l/s, valore derivante dalla prova di portata effettuata secondo la metodologia prevista nel § 6.4.2. Al termine della prova nel pozzo si è riscontrato un abbassamento di 30,93 m, mentre nel piezometro l'abbassamento è stato pari a 8,84 m.

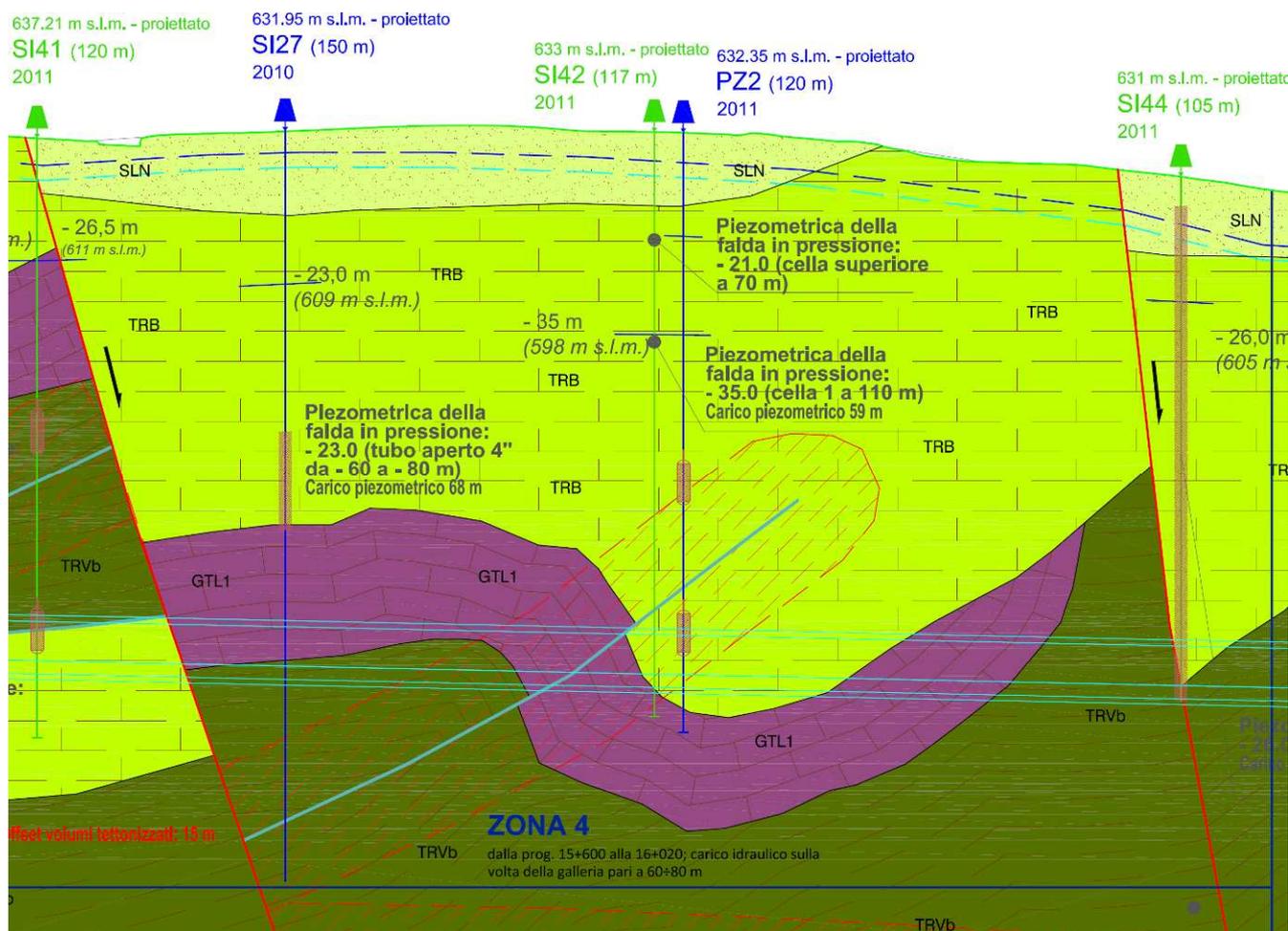


Fig. 11.9 – Stralcio del profilo geologico ricostruito in corrispondenza della stazione di prova considerata; in viola la formazione dei calcari evaporitici (GTL1), in verde chiaro la formazione dei trubi (TRB) e in verde scuro le argille brecciate tortoniane (TRVb).

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 39 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

FASE DI EMUNGIMENTO (48 ORE)

T	Abbassamenti in PZ2	Abbassamenti in SI42	Livello PZ2	Livello SI42	T	T
[secondi]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[m da p.c.]	[minuti]	[ore]
0	0,00	0,00	33,62	34,48	0	
60	9,48	0,02	43,10	34,50	1	
120	13,39	0,22	47,01	34,70	2	
180	14,58	0,41	48,20	34,89	3	
240	15,86	0,58	49,48	35,06	4	
300	16,78	0,74	50,40	35,22	5	
360	17,53	0,90	51,15	35,38	6	
420	18,18	1,05	51,80	35,53	7	
480	18,65	1,18	52,27	35,66	8	
540	19,13	1,30	52,75	35,78	9	
600	19,48	1,42	53,10	35,90	10	
660	19,78	1,53	53,40	36,01	11	
720	20,14	1,66	53,76	36,14	12	
780	20,46	1,75	54,08	36,23	13	
840	20,52	1,83	54,14	36,31	14	
900	20,72	1,92	54,34	36,40	15	
1200	21,13	2,29	54,75	36,77	20	
1500	21,68	2,47	55,30	36,95	25	
1800	22,28	2,77	55,90	37,25	30	
2100	21,73	3,00	55,35	37,48	35	
2400	23,23	3,19	56,85	37,67	40	
2700	23,42	3,35	57,04	37,83	45	
3000	23,68	3,58	57,30	38,06	50	
3300	23,81	3,66	57,43	38,14	55	
3600	23,96	3,76	57,58	38,24	60	1
4200	24,12	3,90	57,74	38,38	70	
4800	24,36	4,13	57,98	38,61	80	
5400	24,51	4,24	58,13	38,72	90	
6000	24,66	4,35	58,28	38,83	100	
6600	24,83	4,43	58,45	38,91	110	
7200	24,90	4,56	58,52	39,04	120	2
9000	25,16	4,81	58,78	39,29	150	
10800	25,41	4,99	59,03	39,47	180	3
12600	25,58	5,16	59,20	39,64	210	
14400	25,71	5,30	59,33	39,78	240	4
16200	25,88	5,38	59,50	39,86	270	
18000	26,02	5,50	59,64	39,98	300	5
19800	26,12	5,60	59,74	40,08	330	
21600	26,33	5,69	59,95	40,17	360	6
23400	26,46	5,75	60,08	40,23	390	
25200	26,52	5,83	60,14	40,31	420	7
27000	26,56	5,91	60,18	40,39	450	

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 40 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

T [secondi]	Abbassamenti in PZ2 [m]	Abbassamenti in SI42 [m]	Livello PZ2 [m da p.c.]	Livello SI42 [m da p.c.]	T [minuti]	T [ore]
28800	26,73	5,93	60,35	40,41	480	8
30600	26,81	6,00	60,43	40,48	510	
32400	26,96	6,10	60,58	40,58	540	9
36000	27,14	6,18	60,76	40,66	600	10
39600	27,24	6,24	60,86	40,72	660	11
43200	27,45	6,35	61,07	40,83	720	12
46800	27,52	6,48	61,14	40,96	780	13
50400	27,61	6,60	61,23	41,08	840	14
54000	27,86	6,67	61,48	41,15	900	15
57600	27,99	6,79	61,61	41,27	960	16
61200	28,01	6,87	61,63	41,35	1020	17
64800	28,20	6,98	61,82	41,46	1080	18
68400	28,25	7,09	61,87	41,57	1140	19
72000	28,41	7,16	62,03	41,64	1200	20
86400	28,86	7,40	62,48	41,88	1440	24
100800	29,29	7,71	62,91	42,19	1680	28
115200	29,73	7,95	63,35	42,43	1920	32
129600	30,02	8,10	63,64	42,58	2160	36
144000	30,28	8,39	63,90	42,87	2400	40
158400	30,60	8,62	64,22	43,10	2640	44
172800	30,93	8,84	64,55	43,32	2880	48

Tabella 4.3 – Dati registrati durante la prova condotta sulla stazione di prova PZ2-SI42

PROVA DI EMUNGIMENTO POZZO PZ2 - PIEZOMETRO SI42
 Diagramma log tempi / abbassamenti - Fase di emungimento

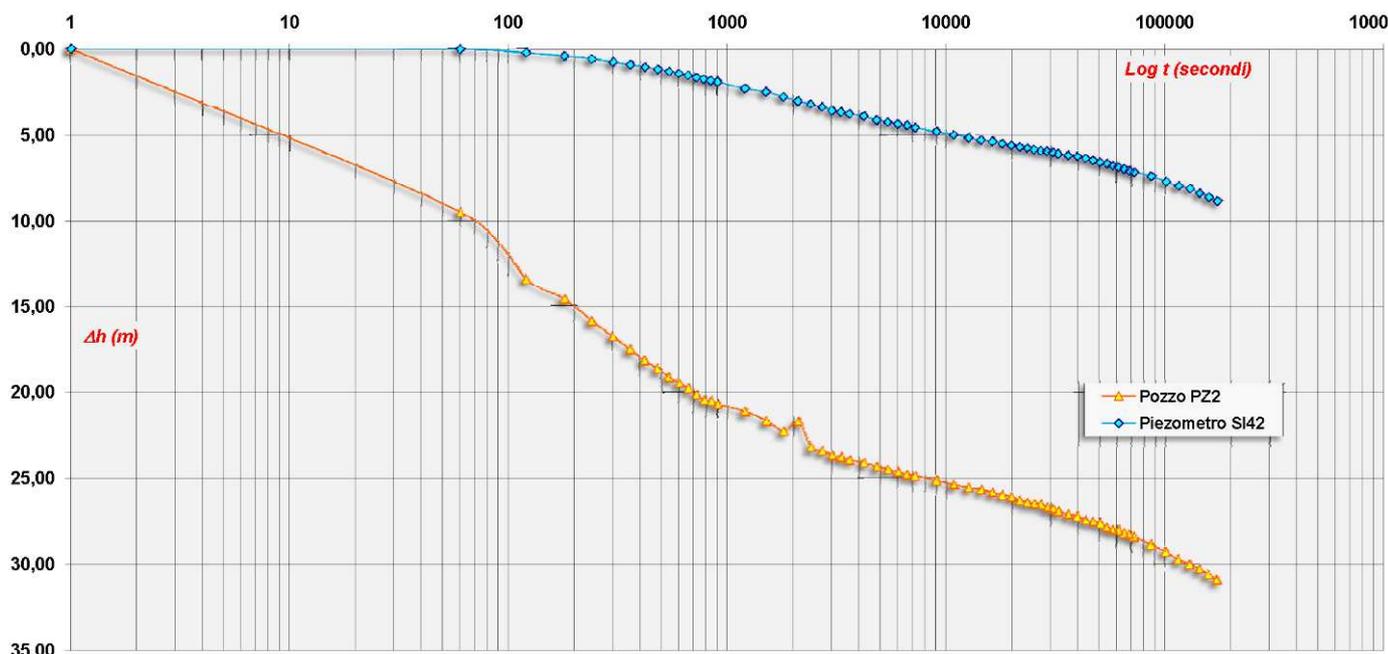


Grafico 4.2 – Andamenti dei valori di abbassamenti riscontrati nel pozzo e nel piezometro nelle 48 ore di prova

PROVA DI EMUNGIMENTO POZZO PZ2 - PIEZOMETRO S142
Piezometro - Diagramma log tempi/abbassamenti - Fase di emungimento
Rappresentazione delle rette di regressione

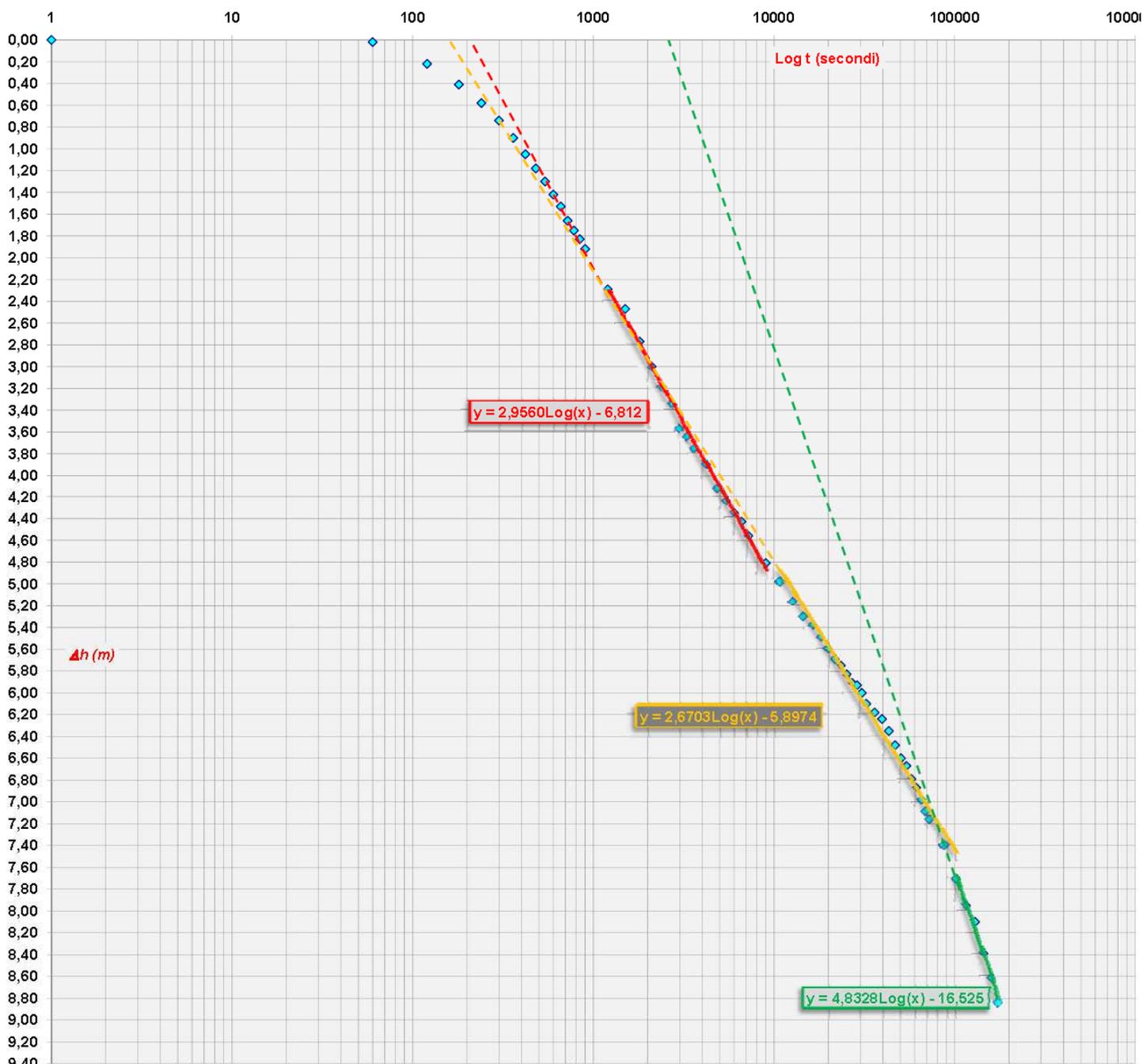


Grafico 4.3 – Diagramma logaritmico degli abbassamenti riscontrati nel piezometro nelle 48 ore di prova; sono rappresentate anche le rette di regressione da cui si ricavano i coefficienti angolari C da adottare nelle formule di Jacob (cfr. § 6.4.2); le linee tratteggiate rappresentano i prolungamenti delle rette per intersecare l'asse x.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 42 di 70

L'elaborazione dei dati secondo la teoria illustrata nel § 2.2.1 ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

CICLO 4 (intervallo 20'-2h30')	
PARAMETRI IDRODINAMICI	
$T = 0,183Q/C =$	1,11E-04 mq/s
$K = T / e =$	5,57E-06 m/s
$S = 2,25Tt_0 / r^2 =$	1,3E-04
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} =$	133 m

CICLO 5 (intervallo 3h-28h)	
PARAMETRI IDRODINAMICI	
$T = 0,183Q/C =$	1,23E-04 mq/s
$K = T / e =$	6,17E-06 m/s
$S = 2,25Tt_0 / r^2 =$	1,1E-04
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} =$	500 m

CICLO 6 (intervallo 28h-48h)	
PARAMETRI IDRODINAMICI	
$T = 0,183Q/C =$	6,82E-05 mq/s
$K = T / e =$	3,41E-06 m/s
$S = 2,25Tt_0 / r^2 =$	1,0E-03
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} =$	162 m

Dove T è la trasmissività dell'acquifero (il cui spessore "e" risulta, dalle osservazioni stratigrafiche, mediamente pari a 20 m), K la permeabilità, S il coefficiente di immagazzinamento, R il raggio del cono di depressione indotto dall'emungimento al termine del ciclo logaritmico temporale di riferimento.

La diagrammazione dei valori degli abbassamenti (Δh) registrati nel piezometro SI42 nel tempo ($\text{Log}_{10}T$) ha permesso di ottenere la ricostruzione, per ogni ciclo logaritmico temporale, della

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: <i>RELAZIONI GEOLOGICHE</i>	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	<i>Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3</i>	Pagina 43 di 70

relativa retta di regressione con andamento logaritmico ($y = C \log_{10} X + a$) in cui il coefficiente angolare C rappresenta l'abbassamento indotto nel piezometro nel ciclo logaritmico considerato, valore che, secondo la metodologia adottata (§ 6.4.2), è pari al rapporto tra la portata adottata e la trasmissività dell'acquifero indagato ($C = 0,183Q/T$). Tralasciando i primi tre cicli temporali logaritmici, relativi ai primi 30' di prova, le variazioni degli andamenti delle rette ricostruite nel 4°, 5° e 6° ciclo (*cfr. grafico 11.3*) sono interpretabili con le caratteristiche fisiche del mezzo acquifero indagato, in particolare:

- ⇒ La prima e la seconda retta (4° e 5° ciclo) hanno coefficienti angolare simili ($C_4 = 2,959$ e $C_5 = 2,6703$) e sono indicative del fatto che l'azione di emungimento interessa una zona dell'acquifero con caratteristiche abbastanza omogenee e leggere anisotropie;
- ⇒ La terza retta (6° ciclo) ha un coefficiente angolare ($C_6 = 4,8328$) con valore quasi doppio rispetto a quelli delle altre due rette e rappresenta un aumento sensibile degli incrementi di depressione, con relativa diminuzione della trasmissività e della permeabilità.

Dal punto di vista del regime idraulico, la prima e la seconda retta rappresentano il deflusso transitorio nell'intorno della zona indagata, mentre la terza retta è indicativa di una diminuzione della permeabilità lungo la direzione orizzontale.

Si è, quindi, in una situazione in cui si riscontrano dei limiti laterali a minore permeabilità ossia dei limiti idrogeologici coincidenti con discontinuità idrogeologiche e/o idrologiche che, in particolari condizioni idrodinamiche (naturali o influenzate artificialmente), inducono un diminuzione della circolazione idrica sotterranea.

I parametri da adottare sono quelli derivanti dal 5° ciclo logaritmico del tempo (intervallo tra le 3 h e le 28 h), in quanto maggiormente rappresentativo delle condizioni al contorno della stazione di prova e, conseguentemente, dei volumi sotterranei interessati dalle operazioni di scavo.

Se, inoltre, si considera la retta rappresentativa del 5° ciclo e l'intersezione di questa con la retta indicativa del 6° ciclo, si può calcolare la distanza teorica (D) esistente tra il pozzo ed i limiti a minore permeabilità con la seguente formula (CASTANY, 1982):

$$D = [(r'/2) \sqrt{(t_1/t_0)}] + r'/2$$

dove:

r' = distanza tra pozzo e piezometro

t_1 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la due rette a pendenza diversa

t_0 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la retta rappresentativa del regime transitorio e l'asse dei tempi

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 44 di 70

Nel caso specifico si ha:

$$r' = 20 \text{ m}$$

$$t_1 = 80000 \text{ secondi}$$

$$t_0 = 161 \text{ secondi}$$

Quindi da tali valori si ottiene :

$$D = 233 \text{ m}$$

Che dovrebbe corrispondere alla distanza del limite idrogeologico che ha causato la variazione di pendenza della retta rappresentativa dell'andamento degli abbassamenti.

Poiché la variazione di permeabilità non è rilevante (da $3,08 \times 10^{-6}$ m/s a $1,7 \times 10^{-6}$ m/s), delle informazioni provenienti dalle indagini geognostiche dirette e indirette e dagli studi geologici condotti nell'area, ne deriva che tale limite non può essere imputato a passaggi di formazione dalle breccie calcaree, in cui insiste la falda oggetto della prova, alle argille circostanti, che dovrebbero avere valori di permeabilità minori di almeno 10 grandezze, ma a variazioni di facies con maggiore matrice limoso-argillosa.

FASE DI RISALITA

T [secondi]	Abbassamenti in PZ2 (m)	Abbassamenti in S142 (m)	Livello PZ2 (m da p.c.)	Livello S142 (m da p.c.)	T [minuti]	t'	(t+t')/t'	T [ore]
1	30,93	8,84	64,55	43,32	0			
60	23,22	8,83	56,84	43,31	1	60	4321,00	
120	20,00	8,81	53,62	43,29	2	120	2161,00	
180	17,28	8,74	50,90	43,22	3	180	1441,00	
240	15,40	8,61	49,02	43,09	4	240	1081,00	
300	13,72	8,49	47,34	42,97	5	300	865,00	
360	12,63	8,36	46,25	42,84	6	360	721,00	
420	11,53	8,31	45,15	42,79	7	420	618,14	
480	10,58	8,08	44,20	42,56	8	480	541,00	
540	9,90	7,95	43,52	42,43	9	540	481,00	
600	9,50	7,78	43,12	42,26	10	600	433,00	
660	9,08	7,68	42,70	42,16	11	660	393,73	
720	8,65	7,54	42,27	42,02	12	720	361,00	
780	8,40	7,43	42,02	41,91	13	780	333,31	
840	8,21	7,28	41,83	41,76	14	840	309,57	
900	8,05	7,16	41,67	41,64	15	900	289,00	
1200	7,45	6,68	41,07	41,16	20	1200	217,00	
1500	7,07	6,31	40,69	40,79	25	1500	173,80	
1800	6,76	6,03	40,38	40,51	30	1800	145,00	
2100	6,56	5,81	40,18	40,29	35	2100	124,43	
2400	6,37	5,64	39,99	40,12	40	2400	109,00	
2700	6,25	5,49	39,87	39,97	45	2700	97,00	
3000	6,10	5,36	39,72	39,84	50	3000	87,40	
3300	6,03	5,24	39,65	39,72	55	3300	79,55	
3600	5,90	5,14	39,52	39,62	60	3600	73,00	1
4200	5,68	4,94	39,30	39,42	70	4200	62,71	
4800	5,57	4,79	39,19	39,27	80	4800	55,00	

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 45 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

T [secondi]	Abbassamenti in PZ2 (m)	Abbassamenti in SI42 (m)	Livello PZ2 (m da p.c.)	Livello SI42 (m da p.c.)	T [minuti]	t'	(t+t')/t'	T [ore]
5400	5,43	4,67	39,05	39,15	90	5400	49,00	
6000	5,36	4,59	38,98	39,07	100	6000	44,20	
6600	5,24	4,48	38,86	38,96	110	6600	40,27	
7200	5,19	4,39	38,81	38,87	120	7200	37,00	2
9000	5,02	4,21	38,64	38,69	150	9000	29,80	
10800	4,81	4,05	38,43	38,53	180	10800	25,00	3
12600	4,66	3,92	38,28	38,40	210	12600	21,57	
14400	4,57	3,80	38,19	38,28	240	14400	19,00	4
16200	4,47	3,58	38,09	38,06	270	16200	17,00	
18000	4,38	3,56	38,00	38,04	300	18000	15,40	5
19800	4,30	3,51	37,92	37,99	330	19800	14,09	
21600	4,22	3,46	37,84	37,94	360	21600	13,00	6
23400	4,14	3,41	37,76	37,89	390	23400	12,08	
25200	4,07	3,37	37,69	37,85	420	25200	11,29	7
27000	4,00	3,31	37,62	37,79	450	27000	10,60	
28800	3,90	3,25	37,52	37,73	480	28800	10,00	8
30600	3,82	3,21	37,44	37,69	510	30600	9,47	
32400	3,75	3,18	37,37	37,66	540	32400	9,00	9
36000	3,65	3,10	37,27	37,58	600	36000	8,20	10
39600	3,57	3,00	37,19	37,48	660	39600	7,55	11
43200	3,49	2,92	37,11	37,40	720	43200	7,00	12
46800	3,38	2,84	37,00	37,32	780	46800	6,54	13
50400	3,30	2,73	36,92	37,21	840	50400	6,14	14
54000	3,21	2,63	36,83	37,11	900	54000	5,80	15
57600	3,11	2,55	36,73	37,03	960	57600	5,50	16
61200	3,03	2,46	36,65	36,94	1020	61200	5,24	17
64800	2,92	2,36	36,54	36,84	1080	64800	5,00	18
68400	2,83	2,28	36,45	36,76	1140	68400	4,79	19
72000	2,76	2,19	36,38	36,67	1200	72000	4,60	20
86400	2,71	2,14	36,33	36,62	1440	86400	4,00	24
100800	2,67	2,09	36,29	36,57	1680	100800	3,57	28
115200	2,63	2,03	36,25	36,51	1920	115200	3,25	32
129600	2,61	1,98	36,23	36,46	2160	129600	3,00	36
144000	2,56	1,93	36,18	36,41	2400	144000	2,80	40
158400	2,51	1,88	36,13	36,36	2640	158400	2,64	44
172800	2,46	1,84	36,08	36,32	2880	172800	2,50	48
201600	2,42	1,79	36,04	36,27	3360	201600	2,29	56
230400	2,38	1,75	36,00	36,23	3840	230400	2,13	64
259200	2,33	1,70	35,95	36,18	4320	259200	2,00	72

Tabella 4.4 – Dati registrati durante la fase di risalita alla fine della prova condotta sulla stazione di prova PZ2-SI42

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 46 di 70

PROVA DI EMUNGIMENTO PZ2 - SI42
Diagramma log tempi / abbassamenti - Fase di risalita

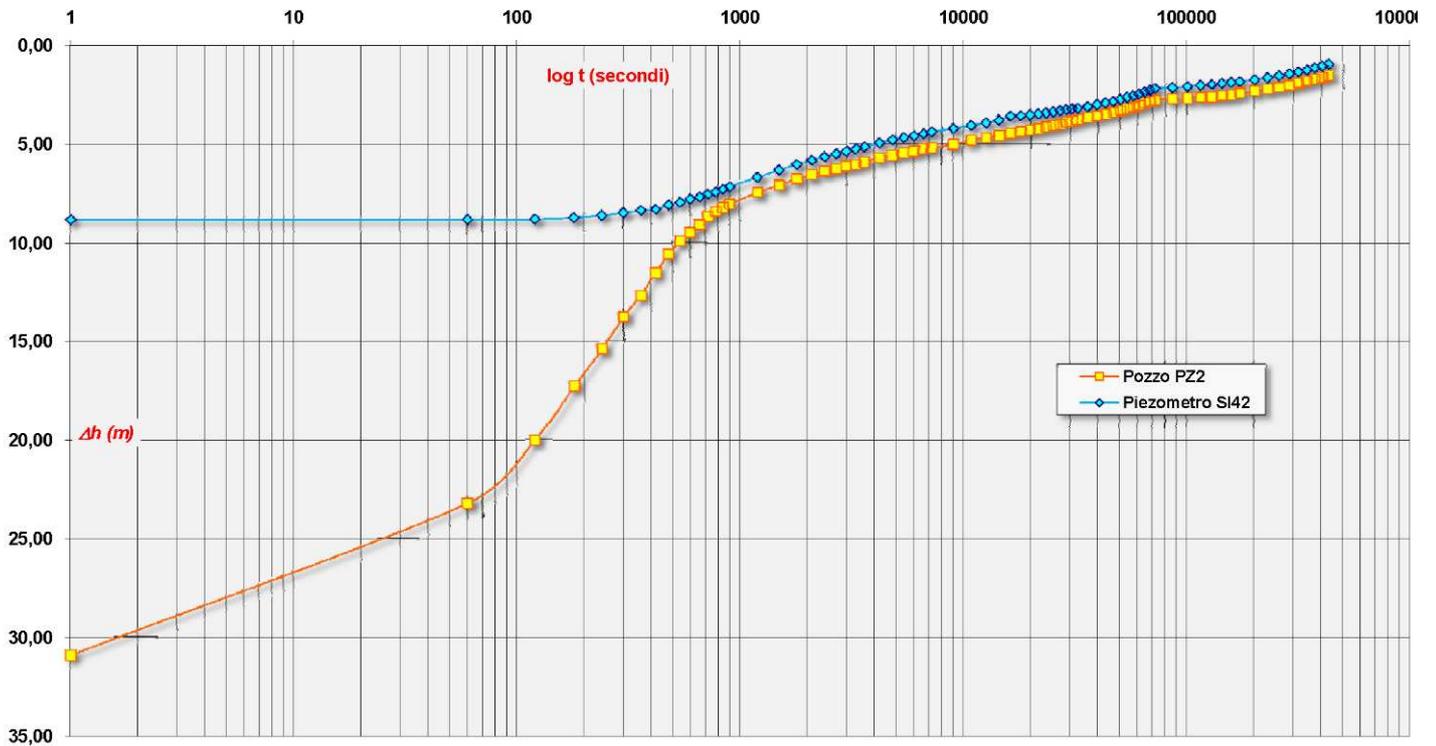


Grafico 4.4 – Andamenti dei valori di risalita nel pozzo e nel piezometro riscontrati successivamente alle 48 ore di prova

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 47 di 70

PROVA DI EMUNGIMENTO POZZO PZ2 - PIEZOMETRO SI42
Diagramma Log $[(t+t')/t']$ / abbassamenti nel piezometro - Fase di risalita

Rappresentazione delle rette di regressione

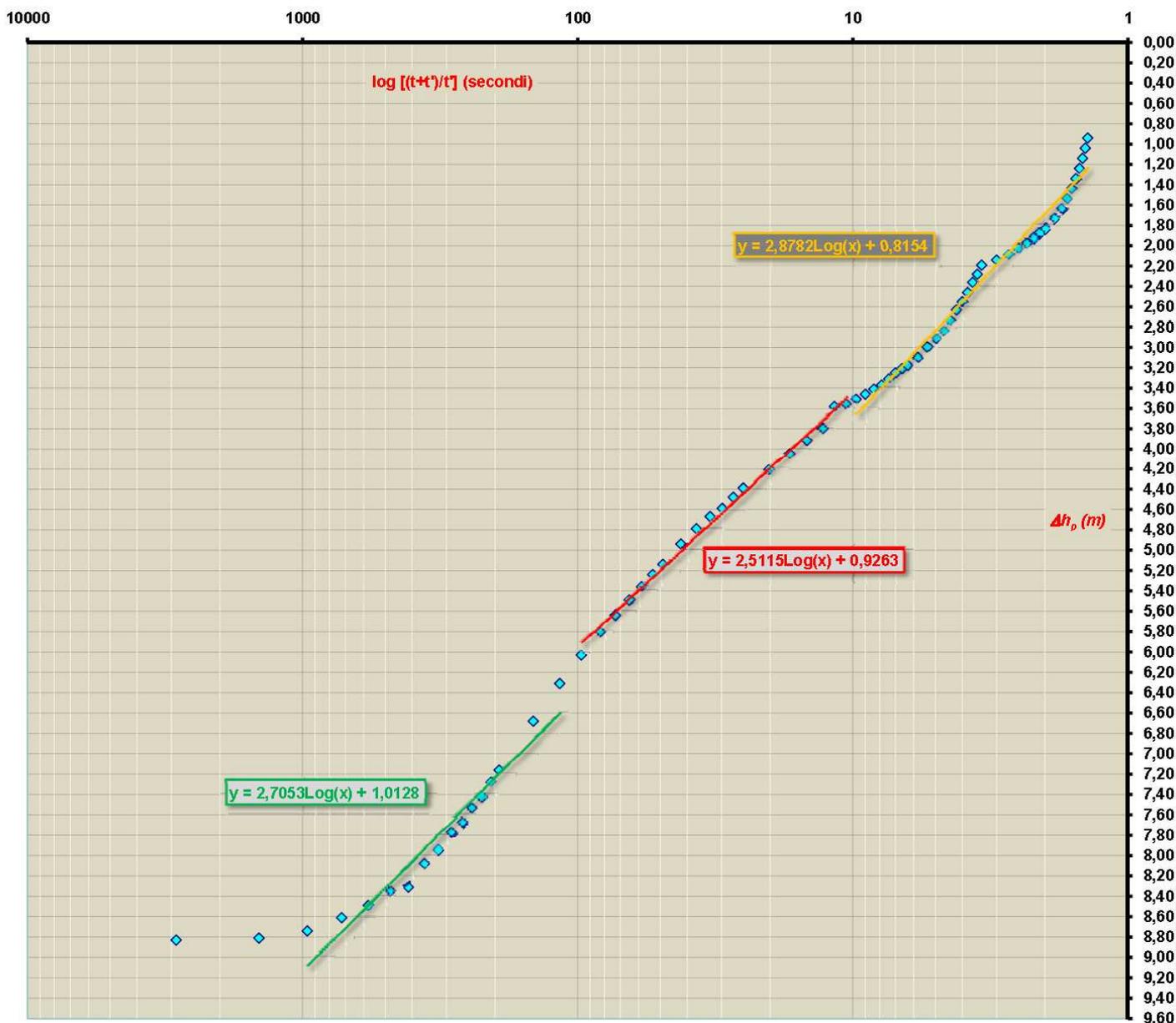


Grafico 4.5 – Diagramma logaritmico dei dai di risalita riscontrati nel piezometro successivamente alle 48 ore di prova; è rappresentata anche la retta di regressione da cui si ricava il coefficiente angolare C da adottare nelle formule di Jacob (cfr. § 2.2.1)

L'elaborazioni dei dati secondo la teoria illustrata nel § 2.2.1 ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 48 di 70

CICLO 2 (intervallo 5'-40')
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 1,22E-04 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 6,09E-06 \text{ m/s}$

CICLO 3 (intervallo 45'- 8h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 1,31E-04 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 6,56E-06 \text{ m/s}$

CICLO 4 (intervallo 8h - 120h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 1,14E-04 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 5,72E-06 \text{ m/s}$

I valori sopra riportati per i tre cicli temporali logaritmici sono alquanto simili tra di loro e, soprattutto a quelli ottenuti nel 5° ciclo logaritmico della prova in fase di emungimento.

Conclusioni

Considerando i parametri ottenuti dalla prova sia in fase di emungimento che in risalita e condizioni al contorno, per la zona circostante la stazione di prova considerata si può assumere come verosimile il valore medio di permeabilità pari a:

$$**K = 6,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}**$$

I valori ottenuti dei parametri idrogeologici e le caratteristiche della prova, rilevano che la falda idrica sotterranea gravante sul cavo della galleria, in corrispondenza della stazione di prova, ha caratteristiche di buona ricarica e condizioni idrauliche che permettono un rilevante afflusso idrico su tale opera, sia in fase di scavo che in fase di esercizio, con un carico idraulico di quasi 80 m.

4.2.2 Prova di emungimento sulla stazione PZ3-SI43

La **prova di emungimento** effettuata nel pozzo PZ3 ha utilizzato come piezometro il punto SI43 in cui è installata n. 1 cella di Casagrande a -105 m da p.c.. Il pozzo è profondo 120 m ed ha la fenestrazione tra -50 m e il fondo foro. La prova è stata condotta per 48 ore con una portata media di 0,1 l/s, valore derivante dalla prova di portata effettuata secondo la metodologia prevista nel §

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 49 di 70

2.1.1. Al termine della prova nel pozzo si è riscontrato un abbassamento di 68,44 m, mentre nel piezometro l'abbassamento è stato pari a 4,71 m.

In fig. 4.2 è riportato lo stralcio del profilo geologico (destro direzione AG-A19) ricostruito in corrispondenza della zona interessata dalla stazione di prova considerata.

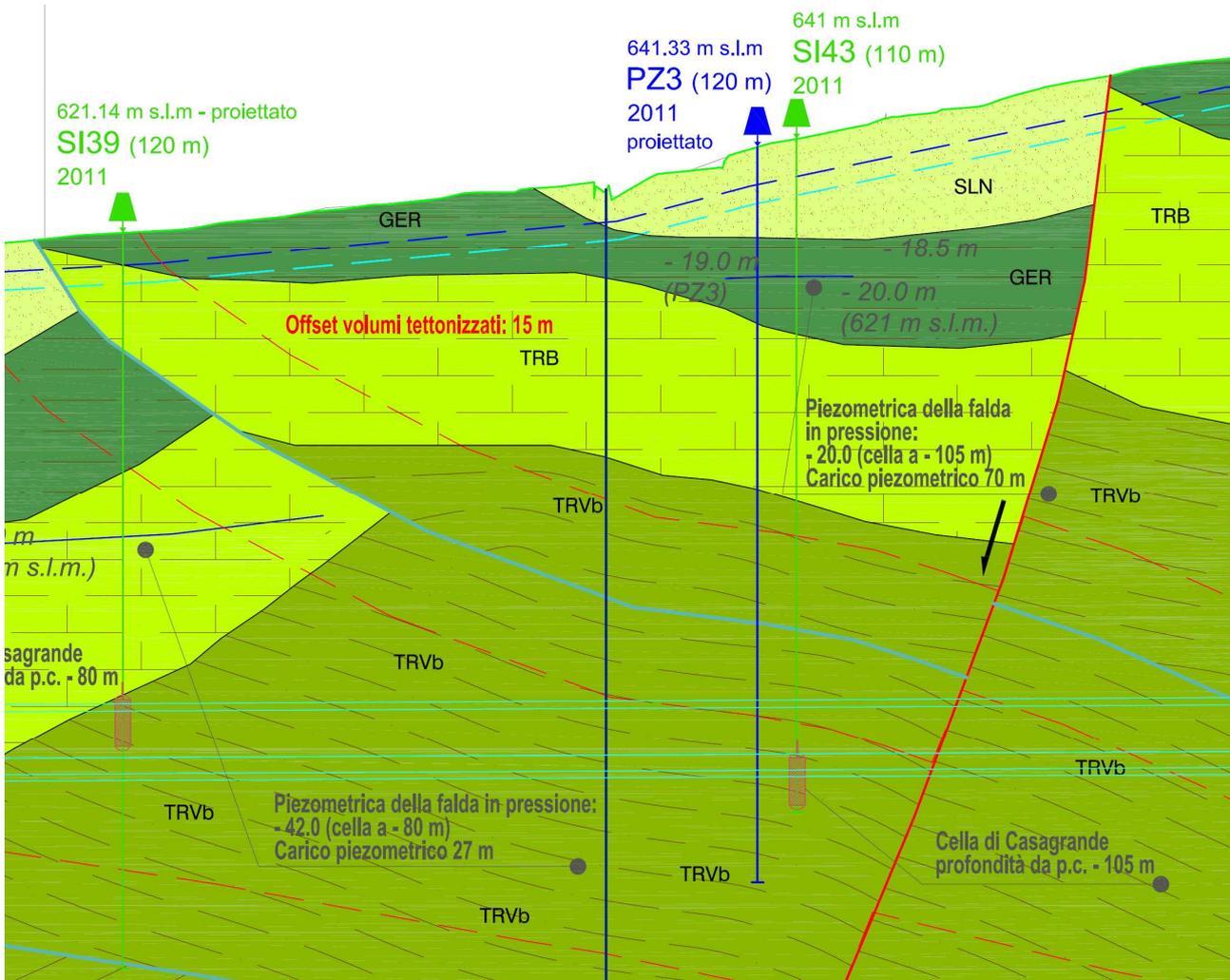


Fig. 4.2 – Stralcio del profilo geologico ricostruito in corrispondenza della stazione di prova considerata; in giallino le Sabbie di Lannari (SLN), in verde chiaro la formazione dei trubi (TRB), in verde scuro le argille marnose di geracello (GER) e in verde oliva le argille brecciate tortoniane (TRVb).

Nel seguito si riportano i dati registrati durante la prova in fase di emungimento e di risalita dei livelli e i grafici che sono stati ricostruiti.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 50 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

FASE DI EMUNGIMENTO (48 ORE)

T	Abbassamenti in PZ3	Abbassamenti in SI43	Livello PZ3	Livello SI43	T	T
[secondi]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[m da p.c.]	[minuti]	[ore]
0	0,00	0,00	19,02	18,55	0	
60	2,52	0,00	21,54	18,55	1	
120	2,60	0,00	21,62	18,55	2	
180	2,25	0,00	21,27	18,55	3	
240	2,98	0,00	22,00	18,55	4	
300	3,52	0,00	22,54	18,55	5	
360	3,83	0,00	22,85	18,55	6	
420	3,97	0,00	22,99	18,55	7	
480	4,12	0,00	23,14	18,55	8	
540	4,44	0,00	23,46	18,55	9	
600	4,82	0,00	23,84	18,55	10	
660	5,05	0,01	24,07	18,56	11	
720	5,19	0,01	24,21	18,56	12	
780	5,22	0,01	24,24	18,56	13	
840	5,69	0,01	24,71	18,56	14	
900	6,02	0,02	25,04	18,57	15	
1200	6,91	0,02	25,93	18,57	20	
1500	7,86	0,02	26,88	18,57	25	
1800	8,53	0,02	27,55	18,57	30	
2100	9,28	0,03	28,30	18,58	35	
2400	9,60	0,04	28,62	18,59	40	
2700	9,72	0,06	28,74	18,61	45	
3000	9,91	0,08	28,93	18,63	50	
3300	10,16	-0,01	29,18	18,54	55	
3600	10,43	0,13	29,45	18,68	60	1
4200	10,89	0,18	29,91	18,73	70	
4800	11,18	0,22	30,20	18,77	80	
5400	11,50	0,27	30,52	18,82	90	
6000	11,83	0,32	30,85	18,87	100	
6600	12,14	0,38	31,16	18,93	110	
7200	12,45	0,43	31,47	18,98	120	2
9000	13,21	0,58	32,23	19,13	150	
10800	13,86	0,70	32,88	19,25	180	3
12600	14,34	0,92	33,36	19,47	210	
14400	14,87	1,09	33,89	19,64	240	4
16200	15,34	1,29	34,36	19,84	270	
18000	15,69	1,44	34,71	19,99	300	5
19800	15,91	1,60	34,93	20,15	330	
21600	16,66	1,75	35,68	20,30	360	6
23400	17,51	1,88	36,53	20,43	390	
25200	18,49	2,00	37,51	20,55	420	7
27000	18,85	2,14	37,87	20,69	450	
28800	19,52	2,29	38,54	20,84	480	8
30600	20,37	2,39	39,39	20,94	510	
32400	21,53	2,54	40,55	21,09	540	9
36000	23,55	2,78	42,57	21,33	600	10
39600	24,61	3,00	43,63	21,55	660	11
43200	25,76	3,16	44,78	21,71	720	12
46800	28,07	3,35	47,09	21,90	780	13
50400	30,43	3,64	49,45	22,19	840	14
54000	32,43	3,75	51,45	22,30	900	15
57600	34,43	3,85	53,45	22,40	960	16
61200	35,88	3,95	54,90	22,50	1020	17
64800	38,24	4,04	57,26	22,59	1080	18
68400	41,72	4,09	60,74	22,64	1140	19
72000	43,78	4,09	62,80	22,64	1200	20
86400	51,78	4,25	70,80	22,80	1440	24

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 51 di 70

T	Abbassamenti in PZ3	Abbassamenti in SI43	Livello PZ3	Livello SI43	T	T
[secondi]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[m da p.c.]	[minuti]	[ore]
100800	56,98	4,46	76,00	23,01	1680	28
115200	61,68	4,50	80,70	23,05	1920	32
129600	66,22	4,53	85,24	23,08	2160	36
144000	67,28	4,53	86,30	23,08	2400	40
158400	68,21	4,65	87,23	23,20	2640	44
172800	68,44	4,71	87,46	23,26	2880	48

Tabella 4.5 – Dati registrati durante la prova condotta sulla stazione di prova PZ3-SI43

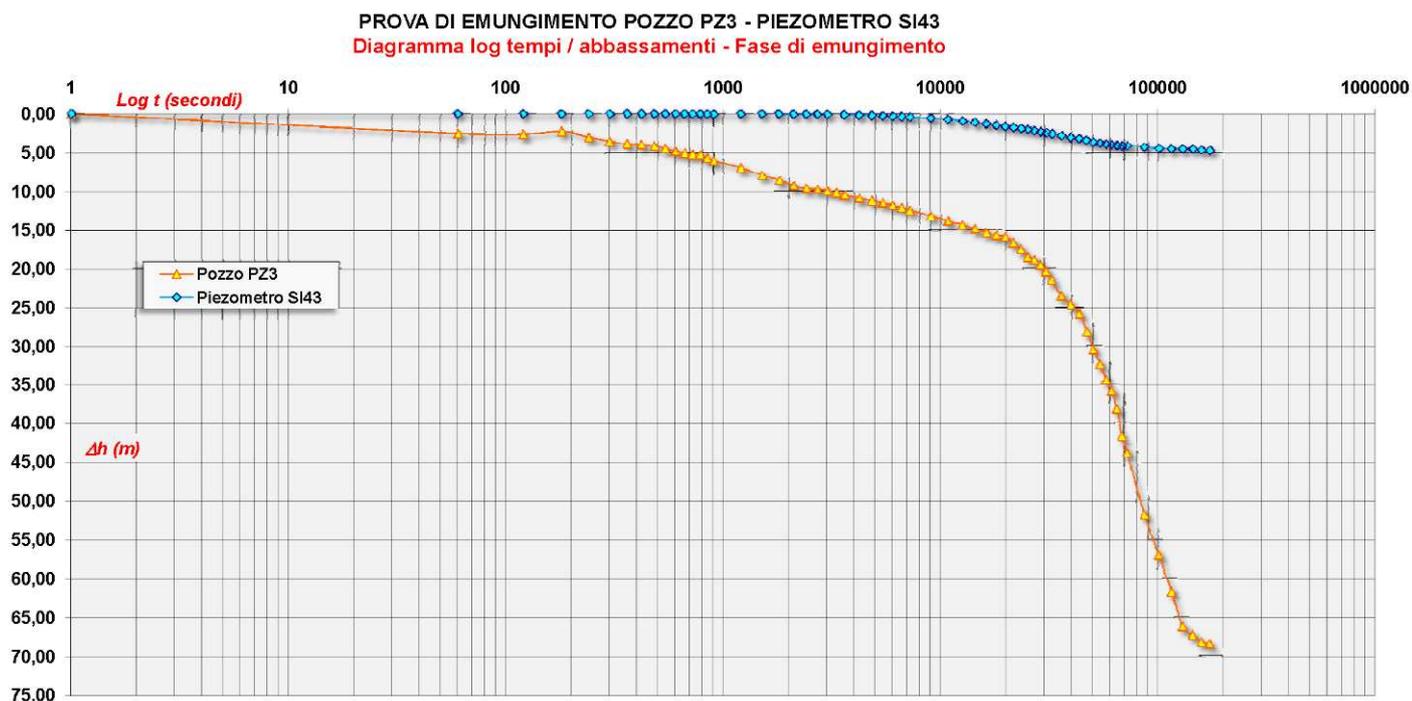
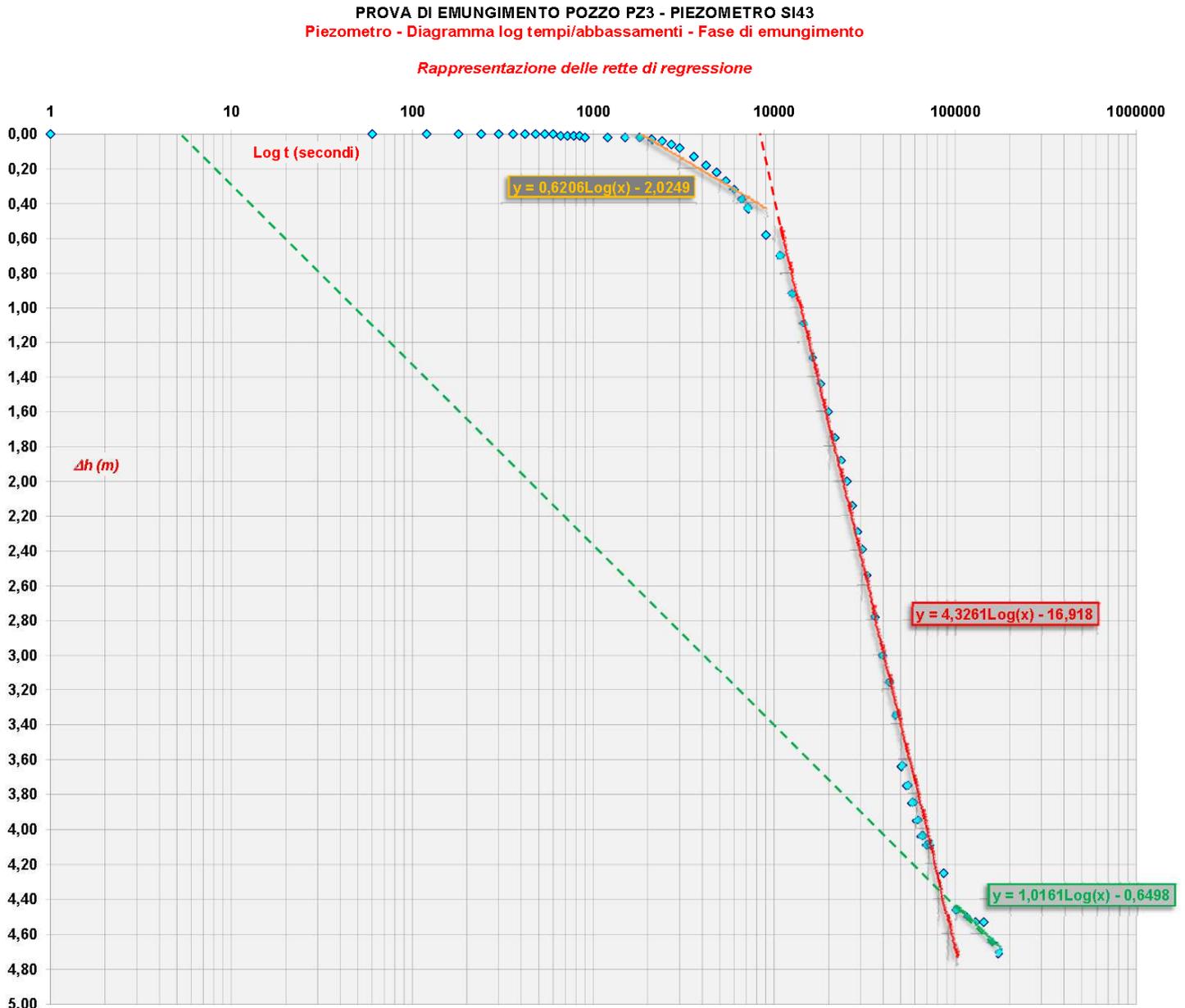


Grafico 4.6 – Andamenti dei valori di abbassamenti riscontrati nel pozzo e nel piezometro nelle 48 ore di prova



L'elaborazioni dei dati secondo la teoria illustrata nel § 2.2.1 ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 53 di 70

CICLO 4 (intervallo 20'- 2h30')
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 2,95E-05 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 1,47E-06 \text{ m/s}$
$S = 2,25Tt_0 / r'^2 = 7,6E-03$
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} = 9 \text{ m}$

CICLO 5 (intervallo 3h - 28h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 4,23E-06 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 2,12E-07 \text{ m/s}$
$S = 2,25Tt_0 / r'^2 = 4,8E-03$
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} = 14 \text{ m}$

CICLO 6 (intervallo 28h-48h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
$T = 0,183Q/C = 1,80E-05 \text{ mq/s}$
$K = T / e = 9,01E-07 \text{ m/s}$
$S = 2,25Tt_0 / r'^2 = 1,1E-05$
$R = 1,5 \sqrt{(Tt/S)} = 796 \text{ m}$

Dove T è la trasmissività dell'acquifero (il cui spessore "e" risulta, dalle osservazione stratigrafiche, mediamente pari a 20 m), K la permeabilità, S il coefficiente di immagazzinamento, R il raggio del cono di depressione indotto dall'emungimento al termine del ciclo logaritmico temporale di riferimento.

La diagrammazione dei valori degli abbassamenti (Δh) registrati nel piezometro S143 nel tempo ($\text{Log}_{10}T$) ha permesso di ottenere la ricostruzione, per ogni ciclo logaritmico temporale, della relativa retta di regressione con andamento logaritmico ($y = C\text{Log}_{10}X + a$) in cui il coefficiente angolare C rappresenta l'abbassamento indotto nel piezometro nel ciclo logaritmico considerato,

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 54 di 70

valore che, secondo la metodologia adottata (§ 6.4.2), è pari al rapporto tra la portata adottata e la trasmissività dell'acquifero indagato ($C = 0,183Q/T$). Tralasciando i primi tre cicli temporali logaritmici, relativi ai primi 30' di prova, le variazioni degli andamenti delle rette ricostruite nel 4°, 5° e 6° ciclo (*cfr. grafico 11.7*) sono interpretabili con le caratteristiche fisiche del mezzo acquifero indagato, caratterizzato da disomogeneità e anisotropie. In particolare:

- ⇒ La prima retta (4° ciclo) ha coefficiente angolare pari a $C_4 = 0,6206$, indicativo di una permeabilità media, sebbene riferita ad una zona molto circoscritta nell'intorno del pozzo;
- ⇒ La seconda retta (5° ciclo) ha coefficiente angolare pari a $C_5 = 4,3261$, molto più alto della prima retta e indicativo di una zona a minore permeabilità che influenza la prova sino a 28 ore;
- ⇒ La terza retta (6° ciclo) ha un coefficiente angolare ($C_6 = 1,0161$) che ritorna a valori inferiori e rappresenta una diminuzione rilevante degli incrementi di depressione, con relativo aumento della trasmissività e della permeabilità, come se ci si fosse avvicinati ad una zona di alimentazione.

Dal punto di vista del regime idraulico, la prima e la seconda retta rappresentano il deflusso transitorio nell'intorno della zona indagata, mentre la terza retta è indicativa di un aumento della permeabilità lungo la direzione orizzontale e/o ad una sovralimentazione proveniente da un altro acquifero confinante.

Si è, quindi, in una situazione in cui si riscontrano dei limiti a potenziale imposto ossia dei limiti idrogeologici coincidenti con discontinuità idrogeologiche e/o idrologiche che, in particolari condizioni idrodinamiche (naturali o influenzate artificialmente), consentono di tenere fissi determinati livelli idrici sia in entrata che in uscita dell'acquifero, tramite apporti di alimentazione.

Se si considera la retta rappresentativa del 5° ciclo e l'intersezione di questa con la retta indicativa del 5° ciclo, si può calcolare la distanza teorica (D) esistente tra il pozzo ed i limiti a potenziale imposto con la seguente formula (CASTANY, 1982):

$$D = [(r'/2) \sqrt{(t_1/t_0)}] + r'/2$$

dove:

r' = distanza tra pozzo e piezometro

t_1 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la due rette a pendenza diversa

t_0 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la retta rappresentativa del regime transitorio e l'asse dei tempi

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 55 di 70

Nel caso specifico si ha:

$$r' = 4 \text{ m}$$

$$t_1 = 83000 \text{ secondi}$$

$$t_0 = 8141 \text{ secondi}$$

Quindi da tali valori si ottiene :

$$D = 8,4 \text{ m}$$

Che dovrebbe corrispondere alla distanza del limite idrogeologico che ha causato la variazione di pendenza della retta rappresentativa dell'andamento degli abbassamenti.

Dalle informazioni provenienti dalle indagini geognostiche dirette e indirette e dagli studi geologici condotti nell'area, ne deriva che tale limite può essere imputato a passaggi intraformazionali verso zone più tettonizzate, e quindi maggiormente fratturate.

Nel caso, invece della variazione di pendenza tra il 4° e il 5° ciclo, se si considera la retta rappresentativa del 4° ciclo e l'intersezione di questa con la retta indicativa del 5° ciclo, si può calcolare la distanza teorica (D) esistente tra il pozzo ed i limiti a minore permeabilità con la seguente formula (CASTANY, 1982):

$$D = [(r'/2) \sqrt{(t_1/t_0)}] + r'/2$$

dove:

r' = distanza tra pozzo e piezometro

t_1 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la due rette a pendenza diversa

t_0 = tempo corrispondente al punto di intersezione tra la retta rappresentativa del regime transitorio e l'asse dei tempi

Nel caso specifico si ha:

$$r' = 4 \text{ m}$$

$$t_1 = 10000 \text{ secondi}$$

$$t_0 = 1831 \text{ secondi}$$

Quindi da tali valori si ottiene :

$$D = 6,7 \text{ m}$$

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 56 di 70

Che dovrebbe corrispondere alla distanza del limite idrogeologico che ha causato la variazione di pendenza della retta rappresentativa dell'andamento degli abbassamenti.

Dalle informazioni provenienti dalle indagini geognostiche dirette e indirette e dagli studi geologici condotti nell'area, ne deriva che tale limite può essere imputato a passaggi intraformazionali da zone più tettonizzate, e quindi più fratturate, a zone meno fratturate .

I parametri da adottare sono quelli derivanti dal 6° ciclo logaritmico del tempo (intervallo tra le 28 h e le 48 h), in quanto maggiormente rappresentativo delle condizioni al contorno della stazione di prova e, conseguentemente, dei volumi sotterranei interessati dalle operazioni di scavo. Il 5° ciclo, difatti, rappresenta una zona interposta tra i due punti della stazione (pozzo e piezometro) di ampiezza pari a qualche metro e con minore fratturazione rispetto alla zona circostante.

FASE DI RISALITA

T [secondi]	Abbassamenti in PZ3 (m)	Abbassamenti in SI43 (m)	Livello PZ3 (m da p.c.)	Livello SI43 (m da p.c.)	T [minuti]	t'	(t+t')/t'	T [ore]
1	68,44	4,70	64,55	43,32	0			
60	64,18	4,70	56,84	43,31	1	60	4321,00	
120	53,01	4,70	53,62	43,29	2	120	2161,00	
180	52,08	4,70	50,90	43,22	3	180	1441,00	
240	51,54	4,70	49,02	43,09	4	240	1081,00	
300	50,79	4,70	47,34	42,97	5	300	865,00	
360	50,08	4,70	46,25	42,84	6	360	721,00	
420	50,47	4,70	45,15	42,79	7	420	618,14	
480	48,68	4,70	44,20	42,56	8	480	541,00	
540	47,99	4,70	87,46	23,25	9	540	481,00	
600	47,34	4,70	83,20	23,25	10	600	433,00	
660	46,85	4,70	72,03	23,25	11	660	393,73	
720	46,12	4,70	71,10	23,25	12	720	361,00	
780	45,16	4,70	70,56	23,25	13	780	333,31	
840	44,93	4,70	69,81	23,25	14	840	309,57	
900	44,26	4,70	69,10	23,25	15	900	289,00	
1200	41,40	4,70	69,49	23,25	20	1200	217,00	
1500	38,29	4,70	67,70	23,25	25	1500	173,80	
1800	35,51	4,70	67,01	23,25	30	1800	145,00	
2100	32,61	4,70	66,36	23,25	35	2100	124,43	
2400	29,66	4,70	65,87	23,25	40	2400	109,00	
2700	26,91	4,70	65,14	23,25	45	2700	97,00	
3000	24,42	4,70	64,18	23,25	50	3000	87,40	
3300	22,36	4,70	63,95	23,25	55	3300	79,55	
3600	21,66	4,70	63,28	23,25	60	3600	73,00	1
4200	19,52	4,70	60,42	23,25	70	4200	62,71	
4800	17,88	4,70	57,31	23,25	80	4800	55,00	
5400	16,23	4,70	54,53	23,25	90	5400	49,00	
6000	14,79	4,70	51,63	23,25	100	6000	44,20	
6600	13,41	4,70	48,68	23,25	110	6600	40,27	
7200	11,94	4,70	45,93	23,25	120	7200	37,00	2
9000	8,30	4,67	43,44	23,25	150	9000	29,80	
10800	6,28	4,63	41,38	23,25	180	10800	25,00	3
12600	4,83	4,53	40,68	23,25	210	12600	21,57	
14400	3,94	4,46	38,54	23,25	240	14400	19,00	4
16200	3,31	4,28	36,90	23,25	270	16200	17,00	
18000	2,92	4,13	35,25	23,25	300	18000	15,40	5

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 57 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

T [secondi]	Abbassamenti in PZ3 (m)	Abbassamenti in SI43 (m)	Livello PZ3 (m da p.c.)	Livello SI43 (m da p.c.)	T [minuti]	t'	(t+t')/t'	T [ore]
19800	2,64	4,00	33,81	23,25	330	19800	14,09	
21600	2,43	3,81	32,43	23,25	360	21600	13,00	6
23400	2,24	3,65	30,96	23,25	390	23400	12,08	
25200	2,13	3,40	27,32	23,22	420	25200	11,29	7
27000	2,00	3,22	25,30	23,18	450	27000	10,60	
28800	1,88	3,07	23,85	23,08	480	28800	10,00	8
30600	1,78	2,92	22,96	23,01	510	30600	9,47	
32400	1,69	2,77	22,33	22,83	540	32400	9,00	9
36000	1,59	2,59	21,94	22,68	600	36000	8,20	10
39600	1,47	2,41	21,66	22,55	660	39600	7,55	11
43200	1,35	2,23	21,45	22,36	720	43200	7,00	12
46800	1,23	2,05	21,26	22,20	780	46800	6,54	13
50400	1,12	1,88	21,15	21,95	840	50400	6,14	14
54000	1,03	1,70	21,02	21,77	900	54000	5,80	15
57600	0,91	1,54	20,90	21,62	960	57600	5,50	16
61200	0,81	1,36	20,80	21,47	1020	61200	5,24	17
64800	0,72	1,16	20,71	21,32	1080	64800	5,00	18
68400	0,66	0,95	20,61	21,14	1140	68400	4,79	19
72000	0,55	0,70	20,49	20,96	1200	72000	4,60	20
86400	0,44	0,46	20,37	20,78	1440	86400	4,00	24
100800	0,33	0,42	20,25	20,6	1680	100800	3,57	28
115200	0,21	0,25	20,14	20,43	1920	115200	3,25	32
129600	0,11	0,10	20,05	20,25	2160	129600	3,00	36
144000	0,03	-0,02	19,93	20,09	2400	144000	2,80	40

Tabella 4.6 – Dati registrati durante la fase di risalita alla fine della prova condotta sulla stazione di prova PZ3-SI43

PROVA DI EMUNGIMENTO PZ3 - SI43
 Diagramma log tempi / abbassamenti - Fase di risalita

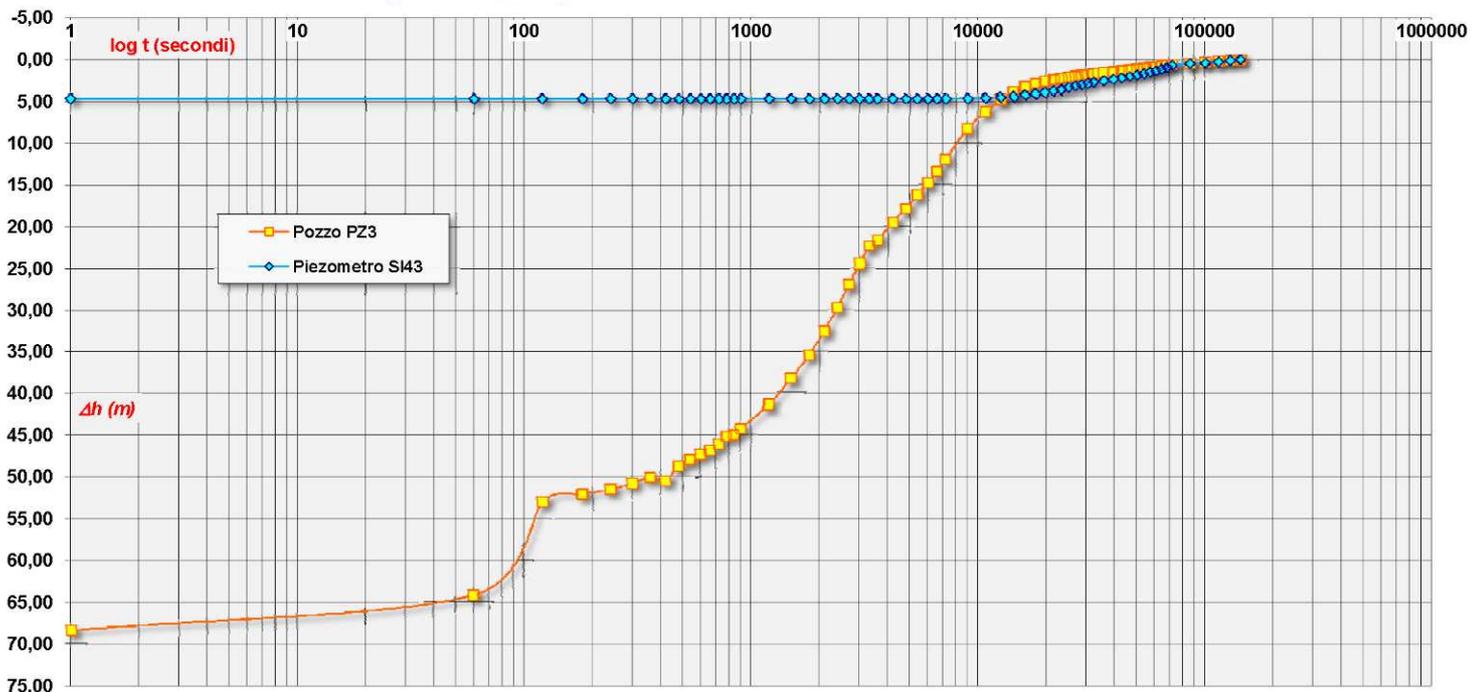


Grafico 4.8 – Andamenti dei valori di risalita nel pozzo e nel piezometro riscontrati successivamente alle 48 ore di prova

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 58 di 70

PROVA DI EMUNGIMENTO POZZO PZ3 - PIEZOMETRO SI43
 Diagramma Log $[(t+t')/t']$ / abbassamenti nel piezometro - Fase di risalita

Rappresentazione delle rette di regressione

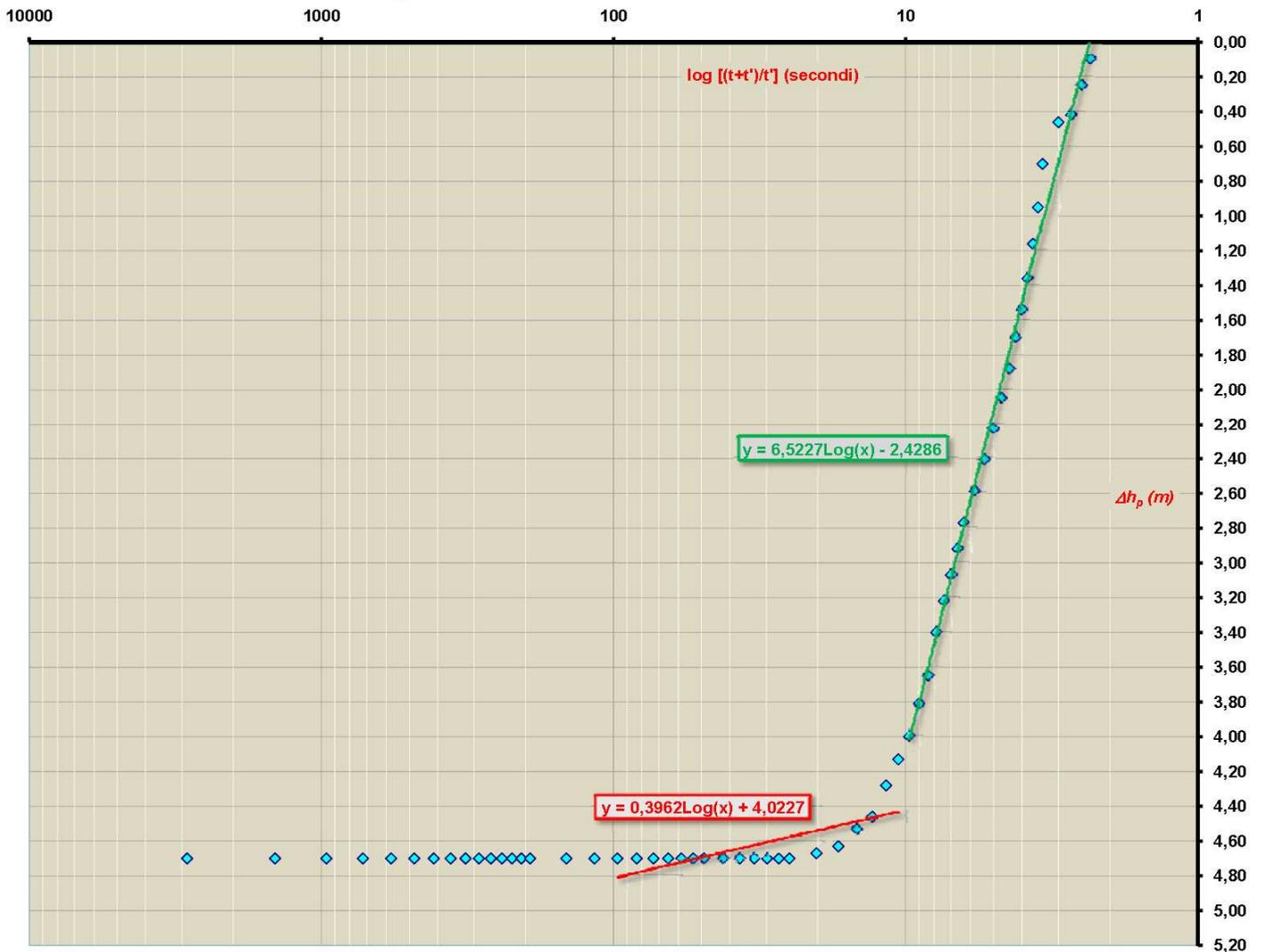


Grafico 4.9 – Diagramma logaritmico dei dati di risalita riscontrati nel piezometro successivamente alle 48 ore di prova; è rappresentata anche la retta di regressione da cui si ricava il coefficiente angolare C da adottare nelle formule di Jacob (cfr. § 2.2.1)

L'elaborazioni dei dati secondo la teoria illustrata nel § 2.2.1 ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

CICLO 3 (intervallo 30' - 5h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
T = 0,183Q/C = 4,62E-05 mq/s
K = T/e = 2,31E-06 m/s

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 59 di 70

CICLO 4 (intervallo 5h30' - 40h)
PARAMETRI IDRODINAMICI
T = 0,183Q/C = 2,81E-06 mq/s
K = T / e = 1,40E-07 m/s

I valori sopra riportati per il 3° ciclo temporale logaritmico sono alquanto simili a quelli ottenuti nel 4° e nel 6° ciclo logaritmico della prova in fase di emungimento, mentre quelli del 4° ciclo si avvicinano ai valori del 5° ciclo della prova in fase di emungimento.

Conclusioni

Considerando i parametri ottenuti dalla prova sia in fase di emungimento che in risalita e le condizioni al contorno, per la zona circostante la stazione di prova considerata si può assumere come verosimile il valore medio di permeabilità pari a:

$$**K = 2x10⁻⁷ m/s**$$

I valori ottenuti dei parametri idrogeologici e le caratteristiche della prova, rilevano che la falda idrica sotterranea gravante sul cavo della galleria, in corrispondenza della stazione di prova, ha caratteristiche di discreta ricarica e condizioni idrauliche che permettono un significativo afflusso idrico su tale opera, sia in fase di scavo che in fase di esercizio, con un carico idraulico di quasi 50 m.

4.2.3 Prova a gradini di portata sulla stazione PZ2-SI42

Sulla stazione di prova PZ2-SI42 al fine di verificare la capacità di immagazzinamento e rilascio di acqua da parte dell'acquifero interessato, è stata effettuata una ulteriore prova condotta a gradini di portata sino alla potenza massima della pompa utilizzata. Si è potuto, così verificare la risposta dell'acquifero in condizioni di stress idraulico.

La prova è stata condotta con tre gradini di portata, registrando manualmente gli abbassamenti e le risalite determinate dalla fase di funzionamento e spegnimento della pompa.

La portata indizionale è stata di 1,8 l/s per una durata della fase di pompaggio di 6 h, a cui è seguita la fase di spegnimento della pompa e, successivamente, gli altri due gradini con portate di 2,5 e 3,3 l/s, per una durata per ciascuna fase di emungimento di 12 h, cui è seguita la fase di stasi della pompa.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 60 di 70

Le modalità esecutive sono quelle riportate al § 2.2.2, mentre nel seguito se ne riportano sinteticamente i dati registrati.

Prova a 1,8 l/s

Fase di pompaggio

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello statico (t_0)	-34,42	-33,84

Fine emungimento (6 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico (t_6)	-55,96	-38,40

Risalita (2 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico	-35,73	-34,80
Residuo rispetto a t_0	1,31	0,96

Prova a 2,5 l/s

Fase di pompaggio

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello statico (t_0)	-35,01	-33,84

Fine emungimento (12 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico (t_6)	-68,98	-42,13

Risalita (2 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico	-38,08	-37,00
Residuo rispetto a t_0	3,07	3,16

Prova a 3,3 l/s

Fase di pompaggio

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello statico (t_0)	-36,38	-35,36

Fine emungimento (6 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico (t_6)	-78,79	-44,30

Risalita (2 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico	-39,89	-38,12
Residuo rispetto a t_0	3,51	2,76

Risalita (12 h)

	PZ2 (m da p.c.)	SI42 (m da p.c.)
Valore livello dinamico	-37,77	-36,38
Residuo rispetto a t_0	1,39	1,02

Nell'elaborato di progetto 000GE209GT03ZIG017 "Rapporto di prova generale - 3 fase" sono riportati tutti i dati registrati e i relativi diagrammi temporali.

4.3 SLUG TEST SUI PIEZOMETRI

Nel seguito si riporta quanto riscontrato in fase di esecuzione delle prove idrauliche dette "slug test", effettuate sui piezometri sotto riportati:

Sigla	Tipologia	Prof. (m)	Misure medie livello statico (m)	Formazione geologica interessata	Note
S8	Casagrande	130	34	Argille brecciate	
S9	Casagrande	110	12,3	Argille brecciate	
S10	Casagrande	130	19,5	Argille brecciate	
SI40	Casagrande	120	21,5	Argille brecciate	
SI41	Casagrande	100	26	Argille brecciate	
SI43	Casagrande	105	20	Argille brecciate	
SI45	Tubo aperto 3"	130	42	Trubi e Argille brecciate	Fenestratura tra 90 e 130 m
SI46	Casagrande	110	44,3	Argille brecciate	

4.3.1 Prova su SI40

Dopo aver avviato la prova, in data 20/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, raggiunta la pressione di 9 bar, il motocompressore è andato in protezione spegnendosi ed i livelli dei due tubi piezometrici, calandrati sulla cella di Casagrande posta a -120 m da p.c (nelle argille brecciate), da un livello piezometrico iniziale, stabilizzatosi a -28 m da p.c., si portavano entrambi

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 62 di 70

(senza differenza di quota reciproca) a -39 m, senza che vi fosse alcuna venuta d'acqua in superficie dal tubo scarico.

Dopo qualche minuto, successivo allo stacco (provocato, come detto, dal blocco di protezione) del compressore, i livelli piezometrici si riportavano alle condizioni iniziali, e cioè, di -28 m da p.c.. Si è provveduto perciò a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 2.8 bar sul tetto della piezometrica) osservando altresì un rapido abbassamento del livello idrico nei tubi; tale effetto ha costretto a continui rabbocchi. Raggiunto successivamente un equilibrio, seppure instabile, si è insufflata nel tubo di mandata, nuovamente, aria compressa in bassa pressione, regolandola, per circa 30 min. A seguito di rottura di detto tubo dell'aria compressa (per raggiunta resistenza) si sospendeva la prova e si leggevano i livelli freaticometrici; essi venivano riscontrati ad una quota di -39.50 m dal p.c., analogamente a quanto rilevato nella prima fase. Anche in questa seconda fase si è osservata una rapida risalita del livello piezometrico.

4.3.2 Prova su SI46

Prima di avviare la prova con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 4.4 bar sulla piezometrica); insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a -110 m, si è osservata una risalita di acqua nel tubo di scarico, che culminava dopo 75' con lo "svuotamento" del tubo. Completata la prima fase iniziava il monitoraggio della "risalita" che ha dato i seguenti risultati:

Data	Ora	Livello Piezometrico (prof. da p.c.)
20/07/11	13.15	44,35 (Prima dello spurgo)
20/07/11	14.30	105,80 (Dopo lo spurgo)
20/07/11	15.30	93.94
20/07/11	16.30	93.26
20/07/11	17.30	92.95
20/07/11	18.30	92.60
20/07/11	19.30	92.40
20/07/11	20.30	92.12
21/07/11	03.30	91.30
21/07/11	09.30	90.40
21/07/11	15.30	89.62
22/07/11	3.30	88.50
22/07/11	15.30	88.75
23/07/11	15.30	76.35
24/07/11	15.30	53.60

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 63 di 70

25/07/11	15.30	44.95
26/07/11	15.30	44.95
27/07/11	15.30	44.94

4.3.3 Prova su S8

Dopo aver avviato la prova, in data 20/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 3.3 bar sul tetto della piezometrica), insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a maggiore profondità. Si è osservata una risalita di aria nei due tubi della cella posta più in alto.

Dopo 120' di pompaggio di aria, non riscontrando nessuna variazione nel tubo di scarico e continuando a registrare la risalita di aria nei tubi posti a minore profondità, si è provveduto allo spegnimento del motocompressore ed all'interruzione della prova.

4.3.4 Prova su SI41

Prima di avviare la prova, in data 21/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 2.3 bar sul tetto della piezometrica), e successivamente insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a -100 m. Si è osservata una risalita molto lenta di acqua nel tubo di scarico. Tale risalita di acqua si concludeva dopo 100', avendo la consapevolezza che il tubo non si sarebbe riuscito a svuotare del tutto. Si staccava il compressore e si iniziava il monitoraggio che fino alla data del 27/07 è il seguente:

Data	Ora	Livello Piezometrico
21/07/11	11.45	23,75 (Prima dello spurgo)
21/07/11	13.25	58,50 (Dopo lo spurgo)
21/07/11	14.25	50.86
21/07/11	15.25	48.05
21/07/11	16.25	44.30
21/07/11	17.25	42.40
21/07/11	18.25	39.50
21/07/11	19.25	37.25
22/07/11	01.25	31.25
22/07/11	7.25	24.50
22/07/11	13.25	24.30
23/07/11	13.25	24.13
24/07/11	13.25	24.07
25/07/11	13.25	24.04

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 64 di 70

25/07/11	13.25	24.02
25/07/11	13.25	24.02

4.3.5 Prova su S9

Dopo aver avviato la prova, in data 21/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 1.2 bar sul tetto della piezometrica), insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a maggiore profondità. Si è osservato che nel tubo di scarico, da un livello piezometrico iniziale, stabilizzatosi a -12.50 m, si è giunti a -17.44 m, senza che vi fosse alcuna venuta d'acqua in superficie e si notava una risalita di aria nel terreno circostante i tubi.

Dopo 100' di pompaggio di aria non avvenendo nessuna risalita di acqua si provvedeva a sospendere la prova.

4.3.6 Prova su S10

Dopo aver avviato la prova, in data 21/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 1.9 bar sul tetto della piezometrica), insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a maggiore profondità. Si è osservato che nel tubo di scarico, da un livello piezometrico iniziale, stabilizzatosi a -19.50 m, si è giunti a -25.60 m, senza che vi fosse alcuna venuta d'acqua in superficie.

Dopo 120' di pompaggio di aria non avvenendo nessuna risalita di acqua si è provveduto a sospendere la prova.

4.3.7 Prova su SI43

Dopo aver avviato la prova, in data 21/07/2011, con le modalità concordate per lo spurgo, si è provveduto a riempire entrambi i tubi fino a livello di p.c. (dando cioè una pressione di 1.7 bar sul letto della piezometrica), insufflando aria compressa in uno dei due tubi della cella Casagrande posta a maggiore profondità si notava una risalita di aria nei due tubi della cella posta più in alto.

Nel dettaglio:

- dopo 90', si riscontrava la variazione di livello nel tubo di scarico (tra -15 m e -6 m in alternanza);
- dopo 150', il livello si abbassava a -28 m;
- dopo 180', si interrompeva la prova in quanto non si è registrato alcun effetto di risalita.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 65 di 70

4.3.8 Prova su SI45

Inserita la pompa ad una quota di 78 m dal p.c., si è riscontrato un livello di falda pari a 45,42 m. Avviata la fase di emungimento per 30' (oltre i quali non si pompava acqua per problemi di prevalenza della pompa) si riscontrava un livello di falda pari a 58,95 m.

Il monitoraggio effettuato ha registrato i seguenti dati:

Data	Ora	Livello Piezometrico
25/07/11	17.45	Lettura di zero 45.42
25/07/11	18.15	Termine emungimento 58.95
25/07/11	18.45	58.20
26/07/11	06.15	46.10
26/07/11	12.15	45.88
26/07/11	18.15	45.69
26/07/11	06.15	45.69

4.3.9 Risultati

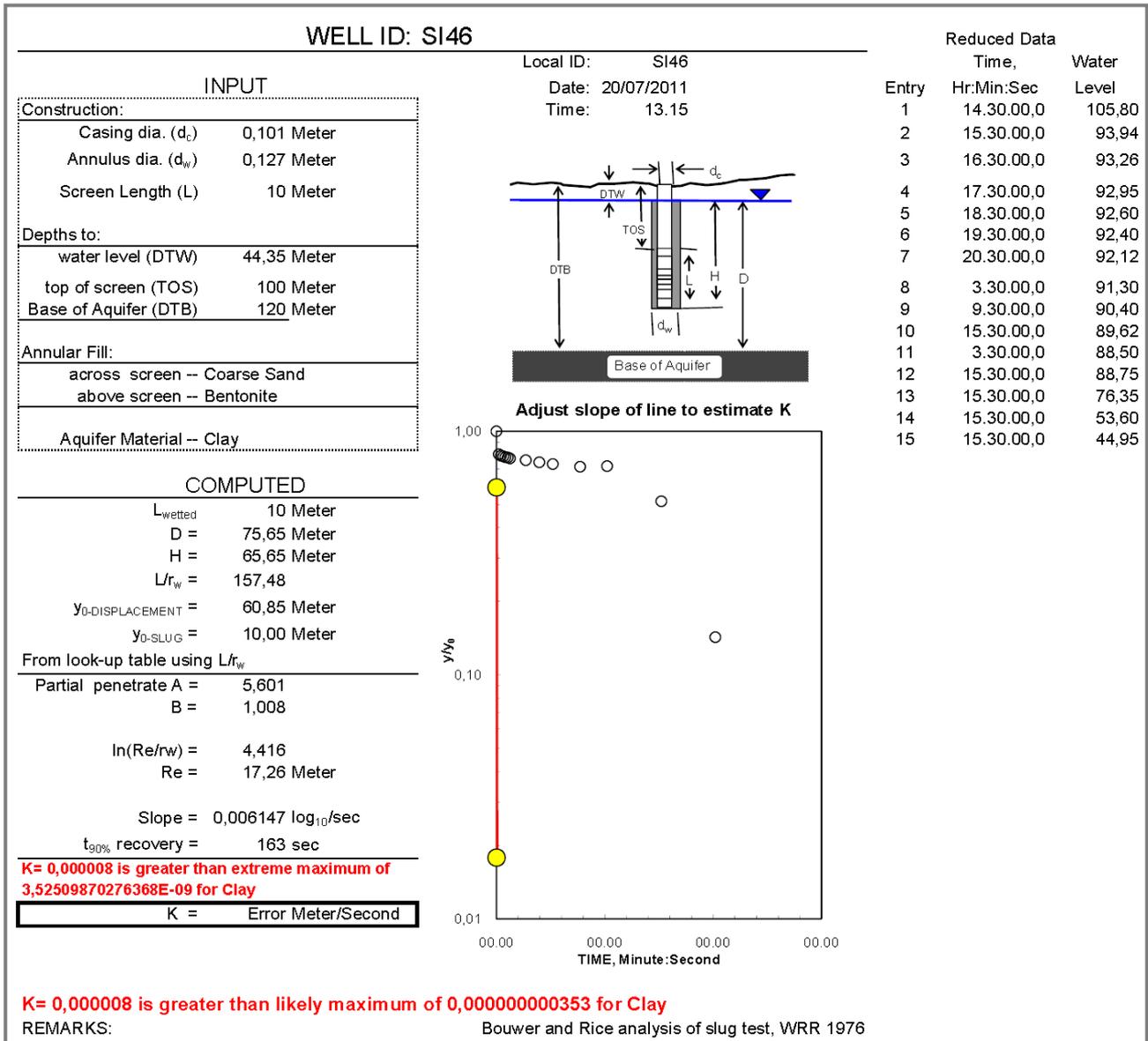
Per applicare la teoria esposta nel § 2.2.2 ai casi in esame si è utilizzato un software proveniente dal sito del USGS (*US Geological Survey* – www.usgs.gov) denominato *Slug_Bouwer-Rice.xls*, che gira su foglio di calcolo di *Excel*. Nel seguito si espongono le applicazioni ai piezometri SI46, SI41, SI45, unici punti in cui le prove, tra quelle sopra descritte, hanno avuto esito positivo.

SI46

La figura riportata nel seguito illustra l'output dell'iter di calcolo applicato al caso del piezometro SI46, tramite il suddetto software.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 66 di 70

PROGETTO ESECUTIVO



Il valore di permeabilità ottenuto è pari a:

$K = 8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

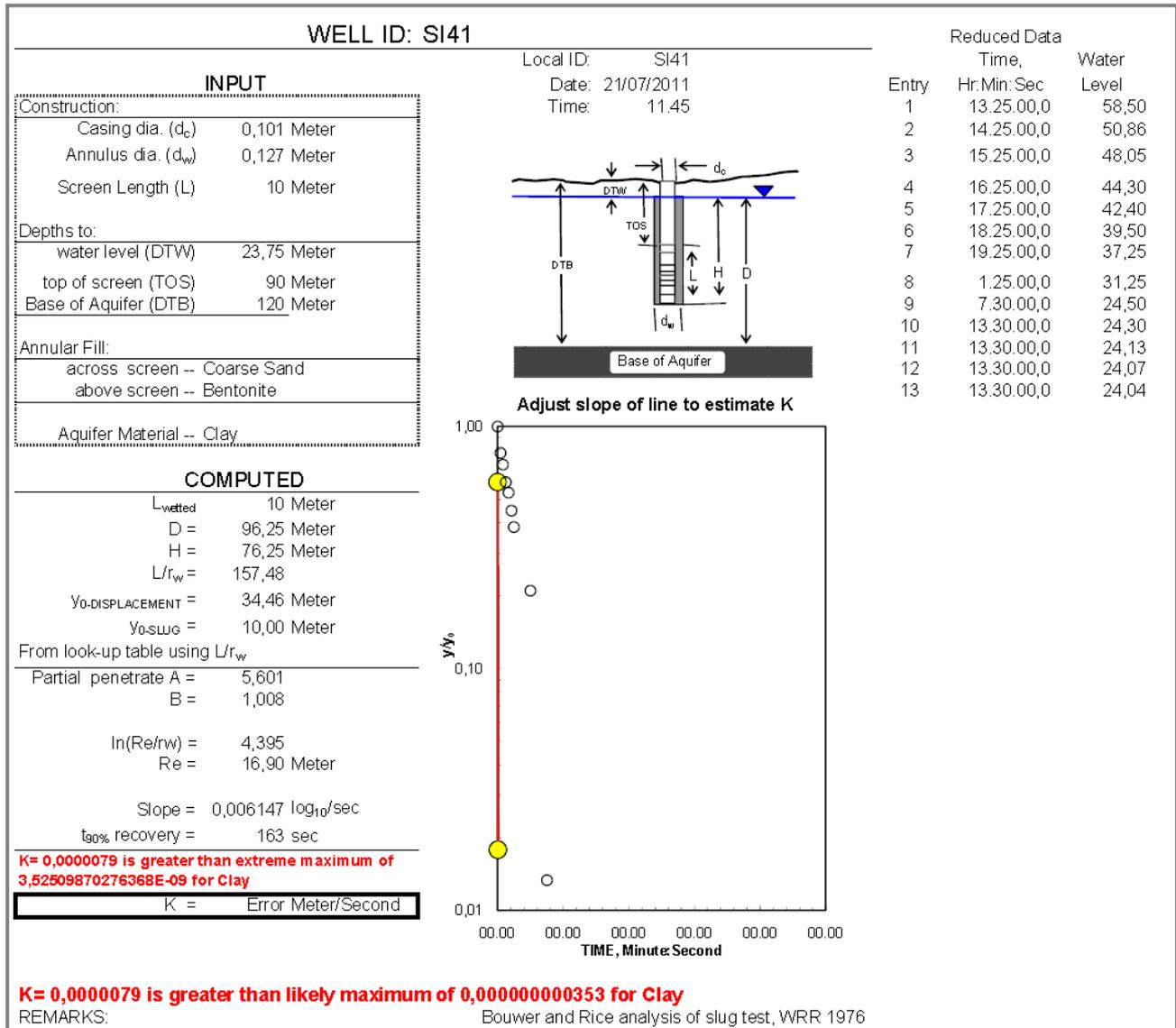
L'output grafico sopra riportato evidenzia che il valore di permeabilità ottenuto è anomalo rispetto al valore massimo standard per la litologia considerata (argille) nell'input del sistema di calcolo.

SI41

La figura riportata nel seguito illustra l'output dell'iter di calcolo applicato al caso del piezometro SI41, tramite il suddetto software.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 67 di 70

PROGETTO ESECUTIVO



Il valore di permeabilità ottenuto è pari a:

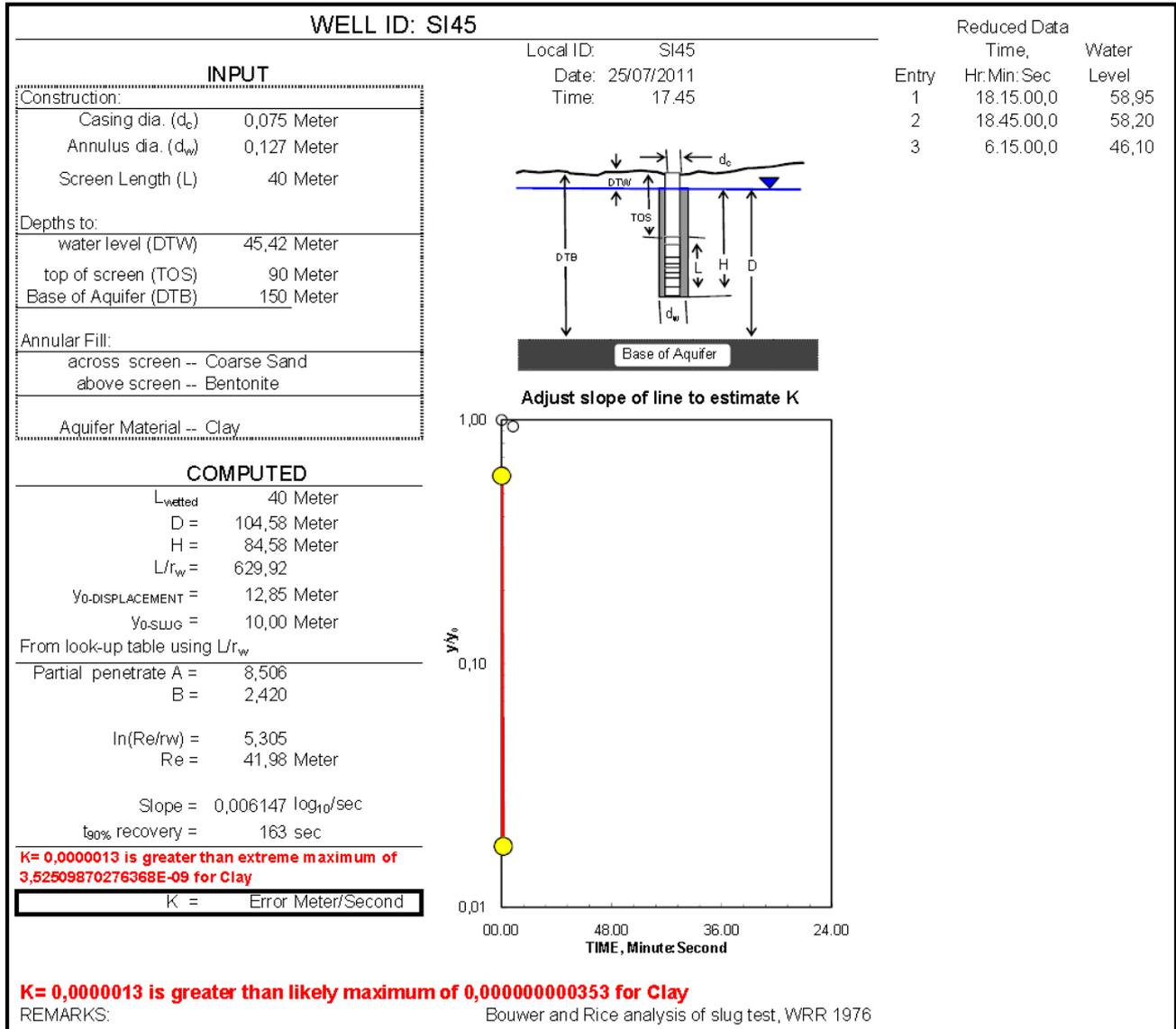
$K = 7,9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

L'output grafico sopra riportato evidenzia che il valore di permeabilità ottenuto è anomalo rispetto al valore massimo standard per la litologia considerata (argille) nell'input del sistema di calcolo.

SI45

La figura riportata nel seguito illustra l'output dell'iter di calcolo applicato al caso del piezometro SI45, tramite il suddetto software.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 68 di 70



Il valore di permeabilità ottenuto è pari a:

$$K = 1,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

L'output grafico sopra riportato evidenzia che il valore di permeabilità ottenuto è anomalo rispetto al valore massimo standard per la litologia considerata (argille) nell'input del sistema di calcolo.

4.4 SINTESI DEI DATI PIEZOMETRICI REGISTRATI LUNGO LA GN CALTANISSETTA

Tralasciando al relativo elaborato l'enumerazione di tutti i dati piezometrici sinora registrati, nel seguito si riporta una tabella sintetica di tutti i piezometri afferenti alla parte di tracciato interessato dalla Galleria Naturale Caltanissetta.

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 69 di 70

PROGETTO ESECUTIVO

Sigla (quota s.l.m.)	Prog.	Tipologia	N° celle	Prof. (m)	Misure medie livello piez. statico - soggiacenze (m)	Misure medie livello piez, statico - quote assolute (m s.l.m.)	Note
SI39 (621 m)	13+600	Casagrande	1	80	42	579	
SI43 (641 m)	13+710	Casagrande	1	110	20	621	
S8 (666 m)	13+880	Casagrande	2	15 130	Assente 34	Assente 632	
SI46 (672 m)	14+115	Casagrande	1	110	44	628	
SI40 (672 m)	14+150	Casagrande	1	120	21	651	
SI45 (680 m)	14+275	Tubo aperto 3"	-	130	42	638	<i>Fenestratura a 90÷130 m</i>
S9 (684 m)	14+680	Casagrande	2	15 110	12,5 12,3	671,5 671,7	
S10 (661 m)	15+500	Casagrande	2	15 130	Assente 19,5	Assente 641,5	
SI41 (637 m)	15+770	Casagrande	2	60 100	26,5 26	610,5 611	
S27 (632 m)	15+820	Tubo aperto 4"	-	80	23	609	<i>Fenestratura a 60÷80 m</i>
SI42 (633 m)	15+900	Casagrande	2	70 110	21 35	612 598	
SI44 (631 m)	16+000	Tubo aperto 3"	-	105	26	608	<i>Fenestratura a 6÷105 m</i>

Cod. elab.: GE208-GI01ZRD-008_B	Titolo: RELAZIONI GEOLOGICHE	Data: 26/08/11
Nome file: GE208-GI01ZRD-008_B.doc	Relazione tecnica conclusiva indagini integrative Fase 3	Pagina 70 di 70