Studio d'Impatto Ambientale

Per il rinnovo concessione di grande derivazione del Campo pozzi per uso idropotabile di Caperana – Chiavari



Allegato f
Prove di pompaggio realizzate nel Campo pozzi di Caperana:

- **su Pozzo P1 e Piezometri pz2 (P2) e pz3**
- **su Pozzo P5 singolo**

REDATTO DA	Dr.Geol. Luciano Minetti Dr.Geol. Vittorio Bonaria		EMISSIONE	Finale
			REVISIONE	0
			n° di pagine	33
Controllato da	Dr. Geol. Carlo baracco			
Data di emissione	Gennaio 2014			

Prova di pompaggio realizzata nel Campo di Caperana su Pozzo P1 e Piezometri pz2 e pz3 (P2)

Contenuti

1. Generalità sulle teorie applicate
- **1.1 Regime di equilibrio e regime di non-equilibrio**
- **1.2 Prova di pozzo con gradini di portata di breve durata**

2. La prova realizzata nel Campo di Caperana Pozzo P1 Piezometri pz2 e pz3 (P2)
- **2.1 Ubicazione**
- **2.2 Pozzo P1, pz1 e pz2 dati generali**
- **2.3 Elaborazione analitica a gradini di portata**
- **2.4 Considerazioni sui valori ottenuti**

1. Generalità sulle teorie applicate

Una prova di emungimento consiste nell'estrarre acqua dal sottosuolo mediante pozzi, misurando le portate emunte (Q), gli abbassamenti del livello piezometrico (Δh) e la risalita (Δh') dello stesso dopo l'arresto dell'emungimento.

Per realizzare però queste prove non è possibile stabilire un programma standard, poiché non esiste un tipo di prova universale che si applica a priori in ogni caso. Se le prove vengono eseguite senza tener conto delle condizioni idrogeologiche tipiche dell'area in esame o di altre variabili, si arriva di solito a conclusioni poco affidabili.
Per la corretta interpretazione delle prove di emungimento bisogna conoscere la stratigrafia, la struttura e l'idrodinamica sotterranea dell'area interessata alla realizzazione del pozzo.

Le prove eseguite sono del tipo stazioni ***stazioni di prova*** formate da un pozzo, detto pilota, e da due piezometri che ubicati all'interno del raggio d'azione del pozzo (R), parametro che però nella fase iniziale non è misurabile e quindi bisogna determinarlo sulla base delle caratteristiche dell'acquifero, dell'esperienza e di eventuali dati bibliografici (Tabella 1).

Tabella 1 – Ordini di grandezza di R in funzione della granulometria e della permeabilità degli acquiferi, per una depressione piezometrica di 5-6 metri (da Bogomolov, in Castany 1967; semplificato e modificato).

Acquifero	Frazione granulometrica dominante (mm)	Coefficiente di permeabilità (m/s)	Portata del pozzo (m^3/h)	Raggio d'azione del pozzo (m)
Sabbie argillose	0,01 – 0,05	$2 – 6 \cdot 10^{-5}$	0,18 – 0,36	65
Sabbie fini	0,10 – 0,25	$2 – 3 \cdot 10^{-4}$	0,72 – 7,2	75
Sabbie medie	0,25 – 0,50	$4 – 6 \cdot 10^{-4}$	14,4 – 36	100
Sabbie grosse	0,50 – 1,00	$7 – 9 \cdot 10^{-4}$	39,6 – 50,4	125
Ghiaie		$1 – 2 \cdot 10^{-3}$	75,6 – 104,4	150

Attraverso le prove di emungimento si calcolano i principali parametri idrodinamici dell'acquifero come la ***portata specifica*** (Qs), il ***coefficiente di permeabilità*** (K), la ***trasmissività*** (T).

1.1 Regime di equilibrio e regime di non-equilibrio

Il ***deflusso in regime di equilibrio o permanente***, (che corrisponde al nostro caso) detto così poiché si suppone che le variazioni di regime si verifichino esclusivamente nello spazio e non nel tempo, si ottiene quando in un'opera di captazione a portata costante, l'alimentazione compensa esattamente l'emungimento, la curva di depressione tende ad un profilo di equilibrio e la superficie piezometrica non si deprime ad una certa distanza R (***raggio d'azione*** del pozzo). Quindi è basato su una teoria (Dupuit, 1863) costruita su delle ipotesi che tendono a semplificare la fenomenologia.
Questa teoria dimostra che, in un ***acquifero libero*** (figura 1), la ***portata*** (Q) di un pozzo, di raggio r, è data da:

$$Q = \pi K \frac{\left(H_1^2 - H_2^2\right)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \ (m^3/s)$$

da cui è possibile ricavare la formula per il calcolo del ***coefficiente di permeabilità*** (K):

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{\left(H_1^2 - H_2^2\right)} \text{ (m/s)}$$

dove:

H_1 (m) = altezza della piezometrica indisturbata (***livello statico***) riferita al substrato impermeabile;

H_2 (m) = altezza del ***livello dinamico*** dell'acqua nel pozzo in emungimento, riferita al substrato impermeabile.

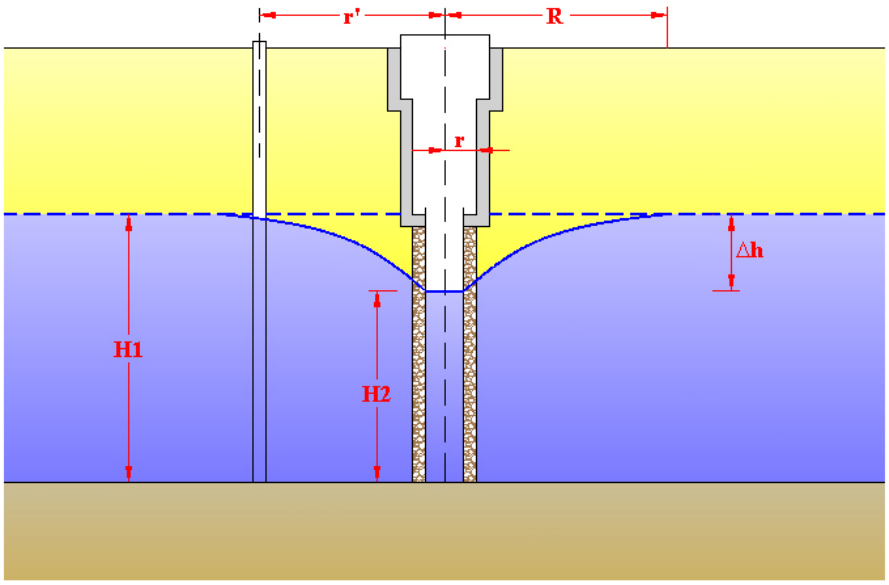


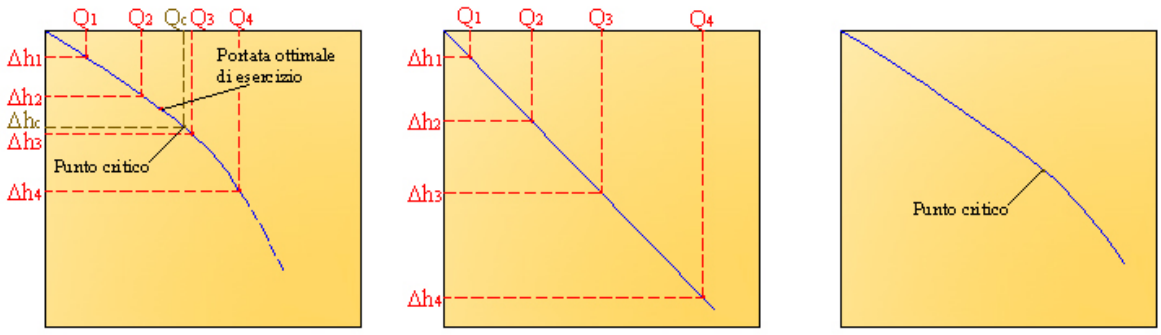
Figura 1

1.2 Prova di pozzo con gradini di portata di breve durata

Queste prove di pozzo vengono eseguite in regime di equilibrio a ***gradini di portata crescenti*** ed hanno una durata variabile da 48 a 72 ore (durata ottimale).

Si fissano più valori (***gradini***) di portata crescenti durante le operazioni di spurgo del pozzo o durante una prova preliminare di breve durata, dove si misurano le corrispondenti depressioni piezometriche. I gradini hanno durate uguali, da una a tre ore.

Con questi dati è possibile costruire un diagramma, con in ascissa le portate emunte (Q_1, Q_2 …..) e in ordinata le depressioni piezometriche (Δh_1, Δh_2 ……), che dà un primo andamento della ***curva caratteristica*** del pozzo (figura 3a, b, c).



a **b** **c**

Figura 2

Nelle falde libere, questa curva, è rappresentata da una parabola di secondo grado (figura 2°, corrispondente al nostro caso) mentre nelle falde confinate, se non caratterizzate da moto turbolento, è formata da una retta (figura 2b), inversamente da una parabola come nelle falde libere (figura 2c).

Questa prova preliminare consente di fissare i gradini di portata, in genere da un minimo di tre ad un massimo di sei, per la prova definitiva che inizia con l'emungimento della portata più bassa (Q_1), che spesso coincide con quella della potenza minima della pompa e prosegue con portate crescenti pari a $2Q_1$, $3Q_1$ … nQ_1. Ogni gradino di portata (figura 4) viene mantenuto fisso fino a quando il ***livello dinamico*** (Δh) nel pozzo diventa costante per alcune ore, fino a quando cioè raggiunge una condizione di equilibrio.

Con le coppie di valori Q_n-Δh_n, per ogni gradino di portata, si ottiene:

$$Q_{sn} = \frac{Q_n}{\Delta h_n} \left(\frac{m^3}{h \cdot m}\right)$$

dove Q_{sn} è la ***portata specifica***, cioè la portata emunta riferita all'abbassamento misurato nel pozzo per il gradino n = 1, 2, ecc……; il suo inverso è l'***abbassamento specifico***.
Nel caso delle curve di fig. 3a e 3c si osserva un primo tratto più rettilineo, cioè caratterizzato da una certa proporzionalità tra portate e depressioni piezometriche, ma, dopo quello che viene detto ***punto critico***, la curva presenta una maggiore convessità che sta a significare che a piccole variazioni di portata corrispondono notevoli aumenti della depressione piezometrica.
Individuato graficamente il *punto critico* si ottengono automaticamente la ***portata critica*** (Q_c), la ***depressione critica*** (Δh_c) e la ***portata ottimale di esercizio*** (Q_e). Essendo la *portata critica* legata alla ***velocità critica*** della falda, non deve essere superata se non si vuole entrare in regime turbolento. La *portata ottimale di esercizio* è sempre inferiore a quella critica ed è pari a circa:

$$Q_e = 0{,}9\, Q_c$$

Definiti i valori di Q_c e Δh_c, mediante la curva caratteristica, si calcola il valore della ***portata specifica*** del pozzo tramite la formula seguente:

$$Q_s = \frac{Q_c}{\Delta h_c}$$

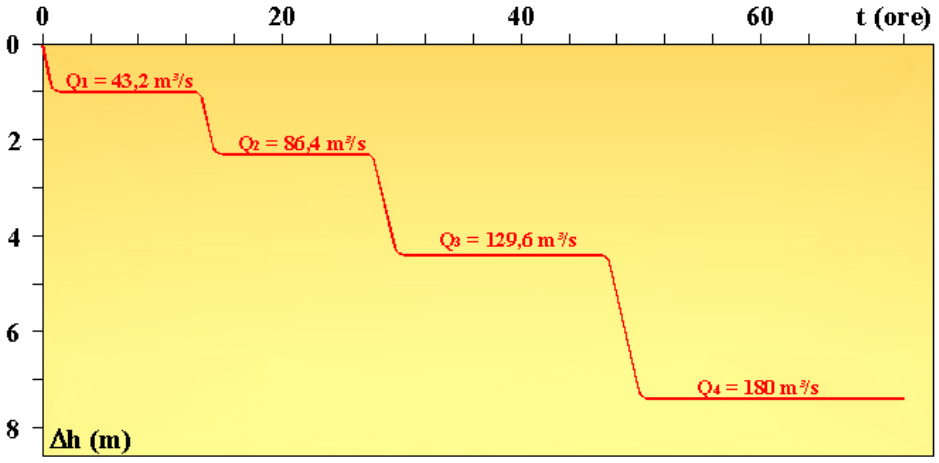


Figura 3

L'abbassamento misurato nell'opera di captazione può essere anche espresso mediante l'equazione di Dupuit per le falde artesiane, che può essere scritta anche nel modo seguente (Jacob, 1947) :

$$H_1 - H_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right) + CQ^2 \text{ (m)}$$

dove $(H_1 - H_2)$ è la depressione piezometrica (Δh) e poiché, per le ipotesi di Dupuit, è:

$$\frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{2\pi T} = B$$

la precedente formula si può scrivere (Jacob, 1947; Rorabangh, 1953):

$$\Delta h = BQ + CQ^2 \text{ (m)}$$

Da questa espressione si evince che l'abbassamento misurato nell'opera di captazione è la somma di due componenti chiamate ***perdite di carico*** (figura 4):

- Una ***perdita di carico lineare*** provocata nell'acquifero dal deflusso laminare nei pressi del pozzo, che viene indicata con BQ;
- Una ***perdita di carico quadratico***, funzione del condizionamento del pozzo, provocata dal deflusso turbolento nell'opera di captazione, definita CQ^2.

La formula di Jacob è la più conosciuta e, anche se è stata ricavata per le falde artesiane, può essere estesa anche agli acquiferi a falda libera quando la depressione piezometrica (Δh) riferita alla portata (Q) è:

$$\Delta h \leq 0{,}1\ H_1$$

dove H_1 è lo spessore della falda (figura 1).

L'espressione di Jacob può anche essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\Delta h}{Q} = B + CQ \text{ (m/m}^3\text{/h)}$$

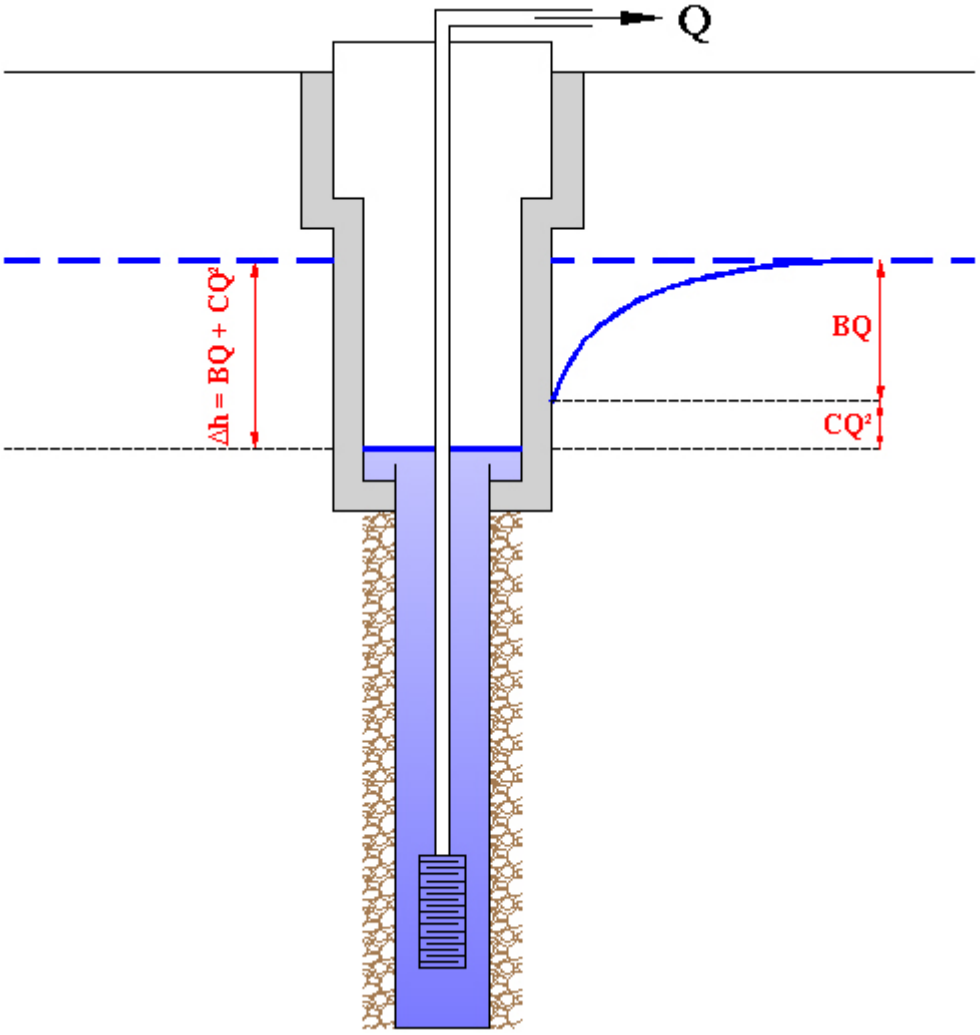


Figura 4

dove Δh/Q rappresenta la depressione piezometrica per unità di portata, cioè la ***depressione piezometrica specifica*** (Δh_S). Questa espressione rappresenta una retta di forma generale:

$$y = b + ax$$

di cui un esempio è riportato nella figura 6.
Il coefficiente B può essere letto nel punto di intersezione con l'asse delle ordinate, mentre C è dato dal coefficiente angolare della retta:

$$C = \tan \beta$$

L'esempio di figura 6 riporta uno dei casi che si possono presentare. Più in generale è possibile avere i tipi di curve riportate nella figura 7:

- La retta 1 rispecchia il caso riportato in figura 5 e dimostra che è valida l'espressione di Jacob;
- La retta 2, parallela all'asse delle portate, sta ad indicare un deflusso laminare con perdite di carico quadratiche nulle ($CQ^2 = 0$): $\Delta h = BQ\,(m)$;
- La retta 3 passa per l'origine degli assi e dimostra che le perdite di carico lineare (BQ = 0) sono trascurabili: $\Delta h = CQ^2\ (m)$;
- La curva 4, invece, indica che è valida l'espressione:

$$\Delta h = BQ + CQ^n \quad \text{con } n > 2$$

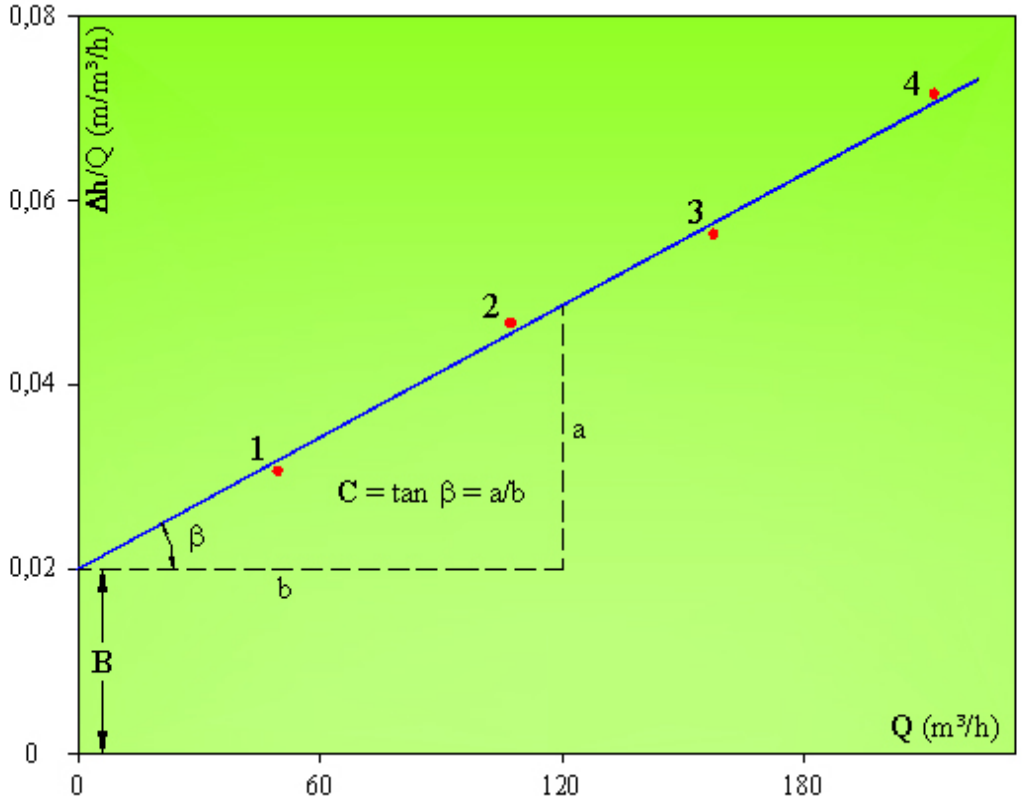


Figura 5 – I punti rappresentano i gradini di portata.

Si può evincere che le misure sono state prese male, oppure che nel corso del pompaggio si è verificata una messa in regime al di fuori della norma e perciò la prova non è da ritenersi valida e va rifatta.
Curve ad andamento diverso indicano che l'acquifero è eterogeneo e anisotropo o che le prove sono state eseguite in modo errato.
Calcolati i valori di B e C, è possibile ricostruire analiticamente la ***curva caratteristica***, calcolare l'efficienza del pozzo e le condizioni del pozzo (Tabella 1):

$$\text{Efficienza del pozzo}\,(\%) = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100$$

Tabella 1 – Relazione fra coefficiente di perdita del pozzo C e condizioni del pozzo (Walton, 1962)

Coefficiente di perdita del pozzo C (min^2/m^5)	Condizioni del pozzo
< 0,5	Correttamente progettato e sviluppato
0,5 – 1,0	Deterioramento moderato dovuto a intasamento
1,0 – 4,0	Deterioramento grave o intasamento
> 4,0	Difficoltà a riportare il pozzo nelle condizioni originali

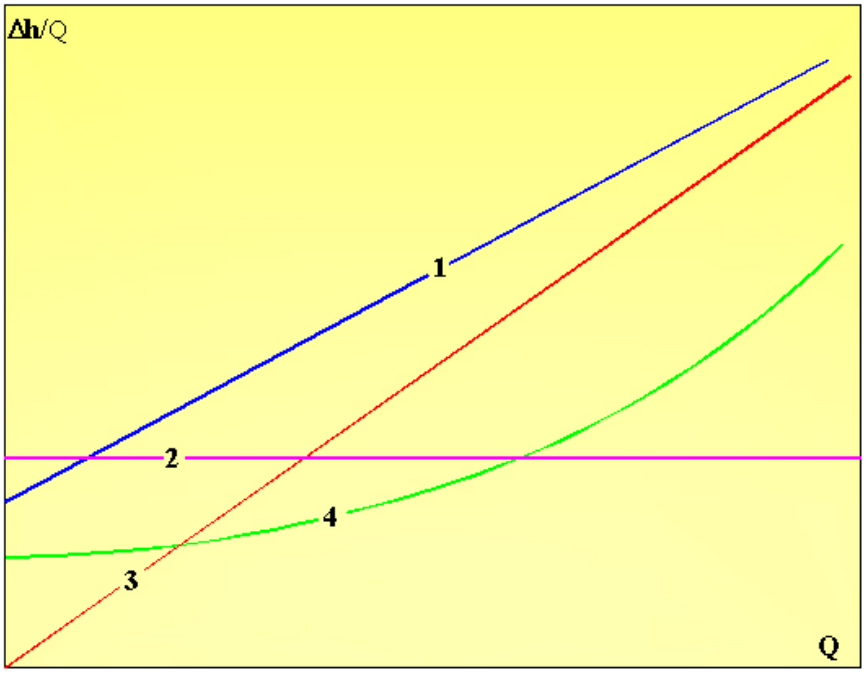


Figura 6 – Rette portate/abbassamenti specifici

La prova di pozzo a gradini di portata crescente, oltre che consentire di valutare la *portata critica*, la *portata ottimale di esercizio* e la *portata specifica*, permette di calcolare il ***raggio d'azione*** (R) del pozzo, il ***coefficiente di permeabilità*** (K) e la ***trasmissività*** (T). Però, per ottenere questi valori, la prova va eseguita su *stazioni di prova*.

Il *coefficiente di permeabilità* si può calcolare mediante la teoria di Dupuit riscrivendo la formula nel modo seguente:

$$K = 0{,}73\frac{Q}{\Delta h}\log\left(\frac{R}{r'}\right) = 0{,}73\frac{Q}{\Delta h}\left(\log R - \log r'\right)$$

dove r'rappresenta la distanza che intercorre tra il centro del pozzo e il piezometro (figure 1 e 2).
Se in un diagramma (figura 8) si riportano le depressioni piezometriche misurate nel pozzo e nei piezometri e sulle ascisse il logaritmo delle distanze tra pozzo e piezometri si ottiene una retta di forma:

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

$y = \Delta h$ e $\log x = \log r'$ sono le variabili della retta, mentre C è il suo coefficiente angolare, pari a:

$$C = 0{,}73\frac{Q}{K} = \tan\beta$$

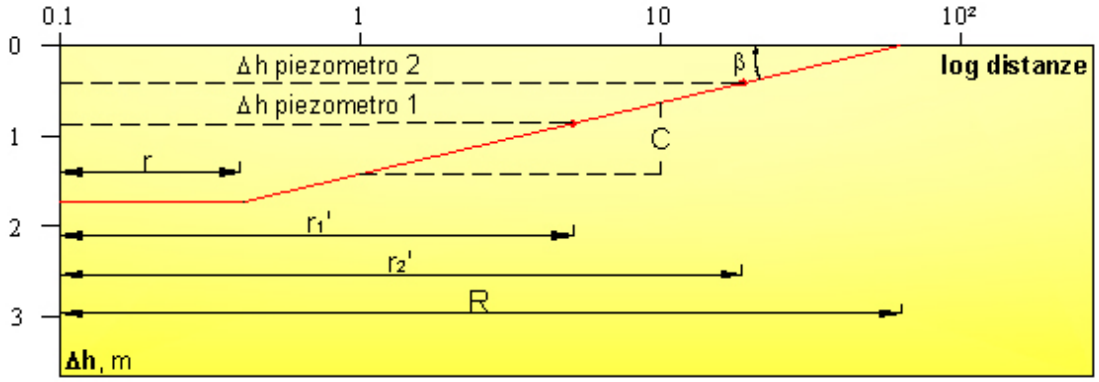


Figura 7 – Diagramma Δh/log distanze

Dalla espressione precedente è possibile derivare il valore del coefficiente di permeabilità per le falde libere:

$$K = 0{,}73\frac{Q}{C}\ (m/s)$$

Analogamente è possibile ricavare la trasmissività per le falde artesiane:

$$T = 0{,}366\frac{Q}{C}\ (m^2/s)$$

Invece il *raggio d'azione* del pozzo può essere misurato direttamente sul grafico oppure può essere calcolato nel modo seguente:

$$\log R = \frac{\Delta h}{C} + \log r'$$

dalla quale si ottiene:

$$R = 10^{\frac{\Delta h}{C} + \log r'}\ (m)$$

Quando si opera su pozzi singoli completi, dopo aver ricavato i valori della *portata critica* (Q_c) e dell'*abbassamento critico* (Δh_c) corrispondente dal grafico portate/depressioni piezometriche, si calcolano i valori del *coefficiente di permeabilità* (K) e della *trasmissività* (T) utilizzando le formule di Dupuit derivate dalla teoria del regime di equilibrio.
Quando invece si opera su pozzi singoli incompleti, bisogna distinguere tra pozzi in falde libere e pozzi in falde artesiane.
In falda libera il *coefficiente di permeabilità* (K) si può calcolare mediante l'equazione:

$$K = \frac{Q_c \ln\left(\frac{R}{r}\right)}{\pi\left[(H_1 - a)^2 - (H_2 - a)^2\right]\left[1 + \left(0{,}30 + 10\frac{r}{H_1}\right)\operatorname{sen}\left(1{,}8\frac{a}{H_1}\right)\right]}\ (m/s)$$

Se le prove di emungimento vengono eseguite su stazioni di prova, la loro interpretazione può essere basata sulle ipotesi del deflusso in regime di equilibrio con la ***formula di Dupuit-Thiem***, proposta nel 1906 da Thiem.
Se si hanno un pozzo di emungimento e due piezometri, posti alla distanza r'_1 e r'_2 (figura 8), per una *falda libera* è possibile scrivere:

$$K = \frac{Q_c}{\pi} \frac{\ln r_2' - \ln r_1'}{(h_1 + h_2)(\Delta h_{p1} - \Delta h_{p2})} (m/s)$$

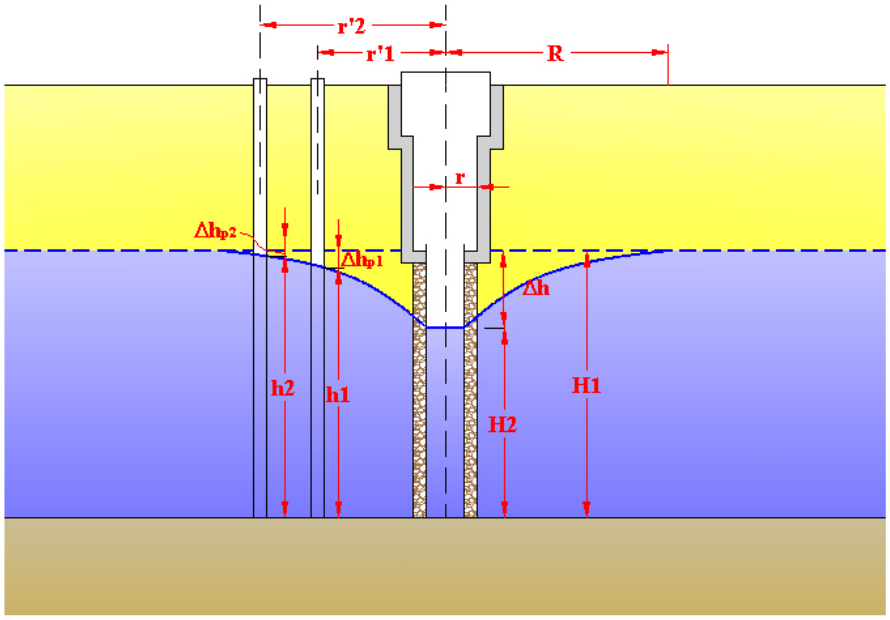


Figura 8 – Schema per Dupuit-Thiem

In modo analogo, per una *falda artesiana*, di spessore b, si ha:

$$T = \frac{Q_c}{2\pi} \frac{\ln r_2' - \ln r_1'}{(\Delta h_{p1} - \Delta h_{p2})} (m^2/s)$$

In caso si possiedono un pozzo di emungimento e un solo piezometro è ancora possibile calcolare i valori di K e T, utilizzando le seguenti formule:

$$K = \frac{Q_c}{\pi} \frac{\ln r_1' - \ln r}{(H_2 + h_1)(\Delta h - \Delta h_{p1})} (m/s)$$

$$T = \frac{Q_c}{2\pi} \frac{\ln r_1' - \ln r}{(\Delta h - \Delta h_{p1})} (m^2/s)$$

Quando necessario, in alcune situazioni, è possibile interpretare la prova a gradini crescenti con la teoria del non-equilibrio utilizzando la *formula di approssimazione logaritmica***.** La prova dà risultati attendibili se però, prima di superare la portata critica, è stata prolungata per un tempo sufficientemente lungo. Si costruisce un diagramma depressioni specifiche/logaritmo dei tempi da cui si ottengono il valore dell'accrescimento della depressione specifica (C) che si verifica in un ciclo logaritmico e il tempo t_0 (figura 9).

Ottenuti i due valori è possibile calcolare la trasmissività (T) e il coefficiente di immagazzinamento (S):

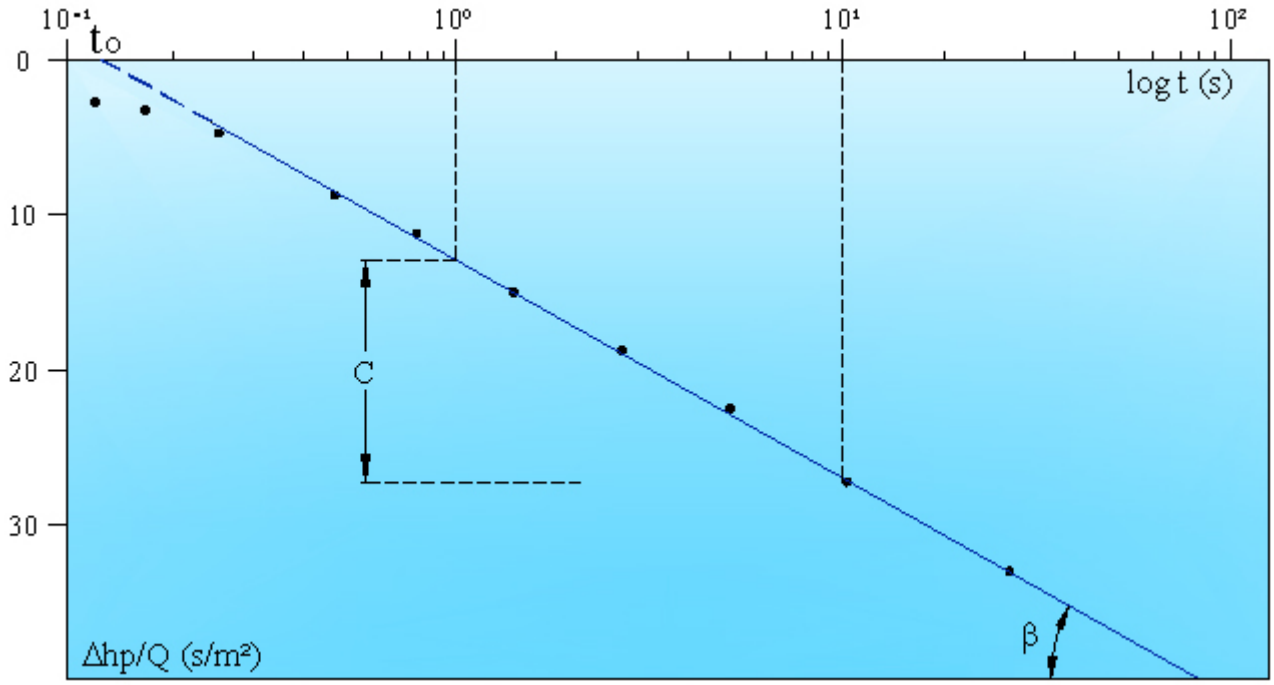


Figura 9 – Diagramma depressioni specifiche/log tempi

C, coefficiente angolare della retta, viene dato da:

$$C = \tan \beta = \frac{0,183}{T}$$

dalla quale si ottiene il valore della trasmissività e di conseguenza il valore del coefficiente di immagazzinamento:

$$T = \frac{0,183}{C}$$

$$S = \frac{2,25\, T\, t}{r'^2}$$

2. La prova realizzata nel Campo di Caperana Pozzo P1 Piezometri pz2 e pz3 (P2)

2.1 Ubicazione

I pozzi P1 P2(pz1) ed il pozzo, inattivo, usato come pz2 si trovano nel settore di valle del Campo Pozzi di Caperana, si veda cartografia generale (Fig.???) e rilievo di dettaglio qui di seguito riportata alle Fig.10 e 10bis.

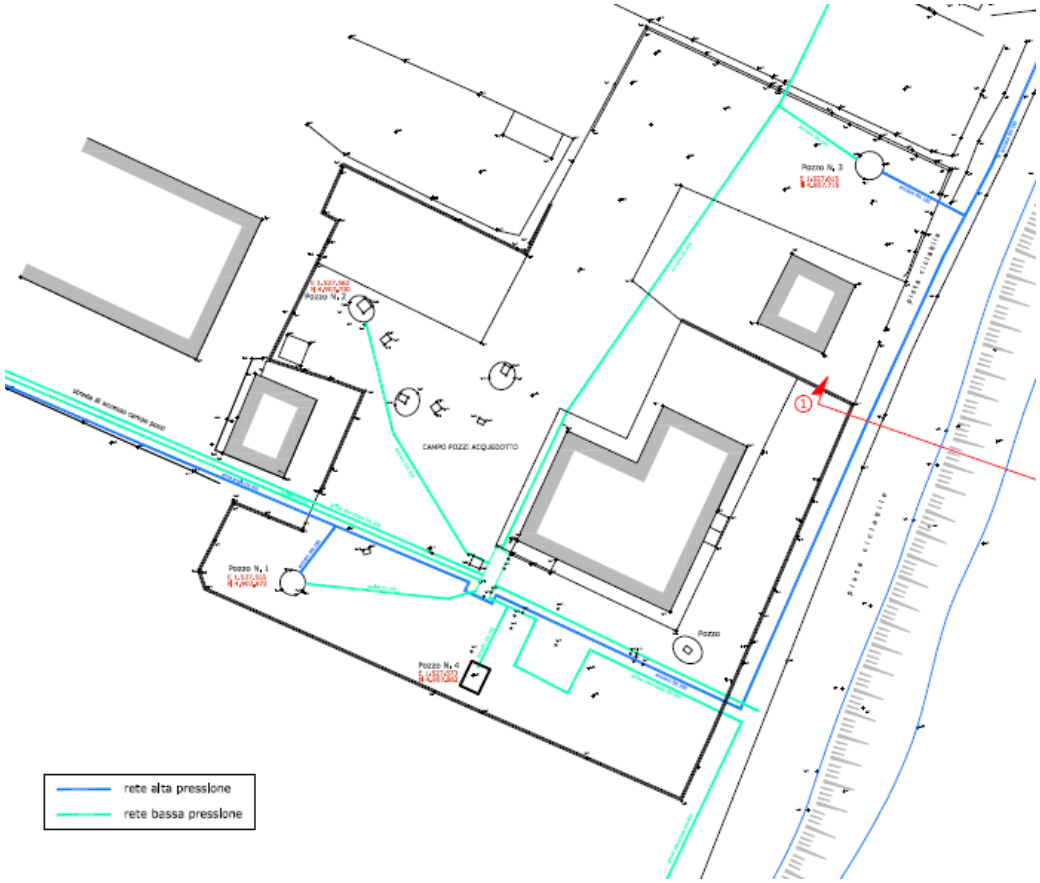


Fig.10 Stralcio rilievo dedicato

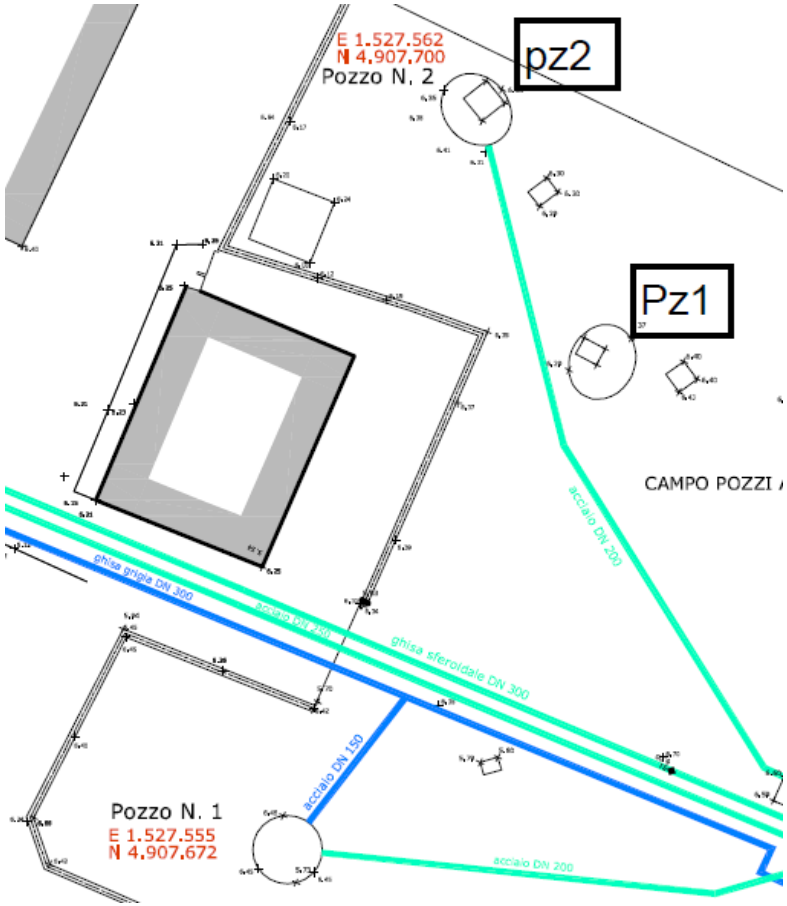


Fig.10 bis Dettaglio posizione pozzoP1 e piezometri pz1e pz2

2.2 Pozzo P1, pz1 e pz2 dati generali

Il pozzo P1, viste le condizioni stratigrafiche ed idrogeologiche del deposito alluvionale che lo ospita e dalle caratteristiche del pozzo stesso, è da considerare:

- completo
- in falda semi libera,

Alla scopo di caratterizzare il complesso acquifero è stata effettuata una prova di pompaggio su 3 scalini di portata per un tempo totale di 46h 44'

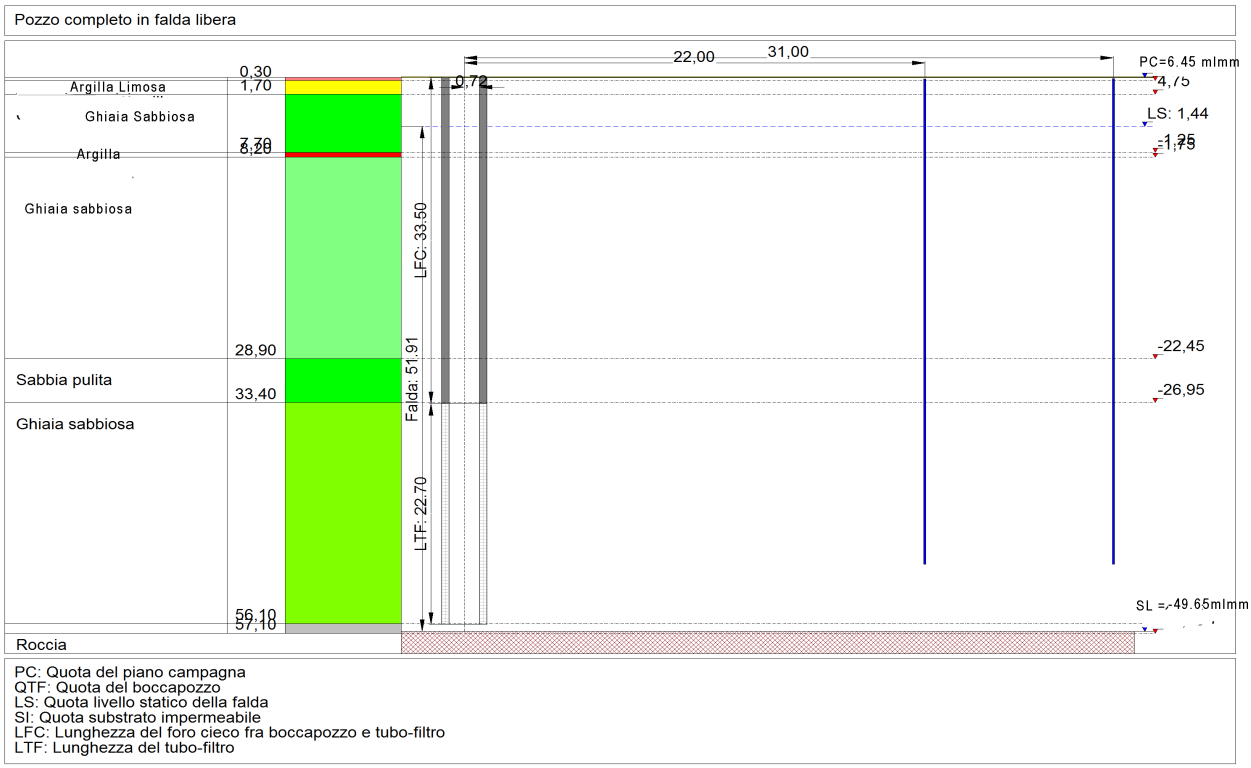


Fig. 11 Stratigrafia schematica

P1: dettagli :

- Piano campagna 6,45 mslmm
- Prof. 57.1 m;
- Diam. 1200mm da P.C. a – 33m , 760mm da – 30m a 56m;
- Filtri: da 33 a 56m; tipo *"a ponte"* ghiaetto ben gradato (Fiume Po)
- Pompe; 1 pompa B.P. + 1 pompa A.P. => tot. 130 lt/s
- PosizionePompe : BP a -22 m ; A.P. a 19m

pz1 dettagli (distanza dal P1 22m)

- Piano campagna 6,29 mslmm
- Prof. 50 m;
- Diam.: 300mm ;
- Filtri : da 16 a 50m
- Stratigrafia simile a P1

pz2 (P2) dettagli (distanza dal P1 31m)

- Piano campagna 6,35 mslmm
- Prof. 50 m;
- Diam.: 300mm ;
- Filtri : da 16 a 50m; tipo "a ponte
- Stratigrafia simile a P1

Dati relativi alla stratigrafia

Strato Nr.	Descrizione (-)	Profondità (m)
1	Terreni organici	0,3
2	Limo sabbioso-argilloso	1,4
3	Ghiaia sabbiosa	6
4	Argilla	0,5
5	Ghiaia sabbiosa	20,7
6	Sabbia pulita	4,5
7	Ghiaia sabbiosa	22,7
8	Roccia	1

Dati relativi al pozzo di emungimento

gradini di portata Input dati

Gradino Nr.	Data	Ore	Minuti	Secondi	Portata (m³/h)	Abbassamento nel pozzo (m)
1	20/12/2013 Da 10.40 a 18.46	8	6	0	270	1,07
2	21/12/2013 a 09.20	14	34	0	378	1,52
3	22/12/2013 a 10.30	25	10	0	540	2,63

Gradino Nr.	Abbassamento in P1 (m)	Abbassamento in P2 (m)
1	0,21	0,12
2	0,27	0,14
3	0,43	0,18

2.3 Elaborazione analitica a gradini di portata

Gradino Nr.	Portata specifica del pozzo(m²/h)	Abbassamento specifico nel pozzo (h/m²)	Abbass. Incrementale nel pozzo (m)
1	252,3364	3,963E-03	1,07
2	248,6842	4,0212E-03	0,45
3	205,3232	4,8704E-03	1,11

Gradino	Abbass. specifico in P1 (h/m²)	Abbass. incrementale in P1 (m)	Abbass. specifico in P2 (h/m²)	Abbass. incrementale in P2 (m)
1	7,7778E-04	0,21	4,4444E-04	0,12
0,00E+00	7,1429E-04	0,06	3,7037E-04	0,02
0,00E+00	7,963E-04	0,16	3,3333E-04	0,04

Coefficiente di perdita del pozzo C	3,5093E-06 h²/m^5
Coefficiente di perdita di carico B	2,8952E-03 m/m³h
Portata per il calcolo dell'efficienza	525,12 m³/h
Efficienza del pozzo	61,11 %

Pozzo “Correttamente progettato e sviluppato”

Gradino Nr.	Perdita di carico lineare (m)	Perdita di carico quadratico (m)	Somma delle perdite (m)
1	0,7817	0,2558	1,0375
2	1,0944	0,5014	1,5958
3	1,5634	1,0233	2,5867

Portata critica	583,47 m³/h
Portata ottimale	525,12 m³/h
Abbassamento critico	2,88 m
Portata specifica	202,32 m²/h

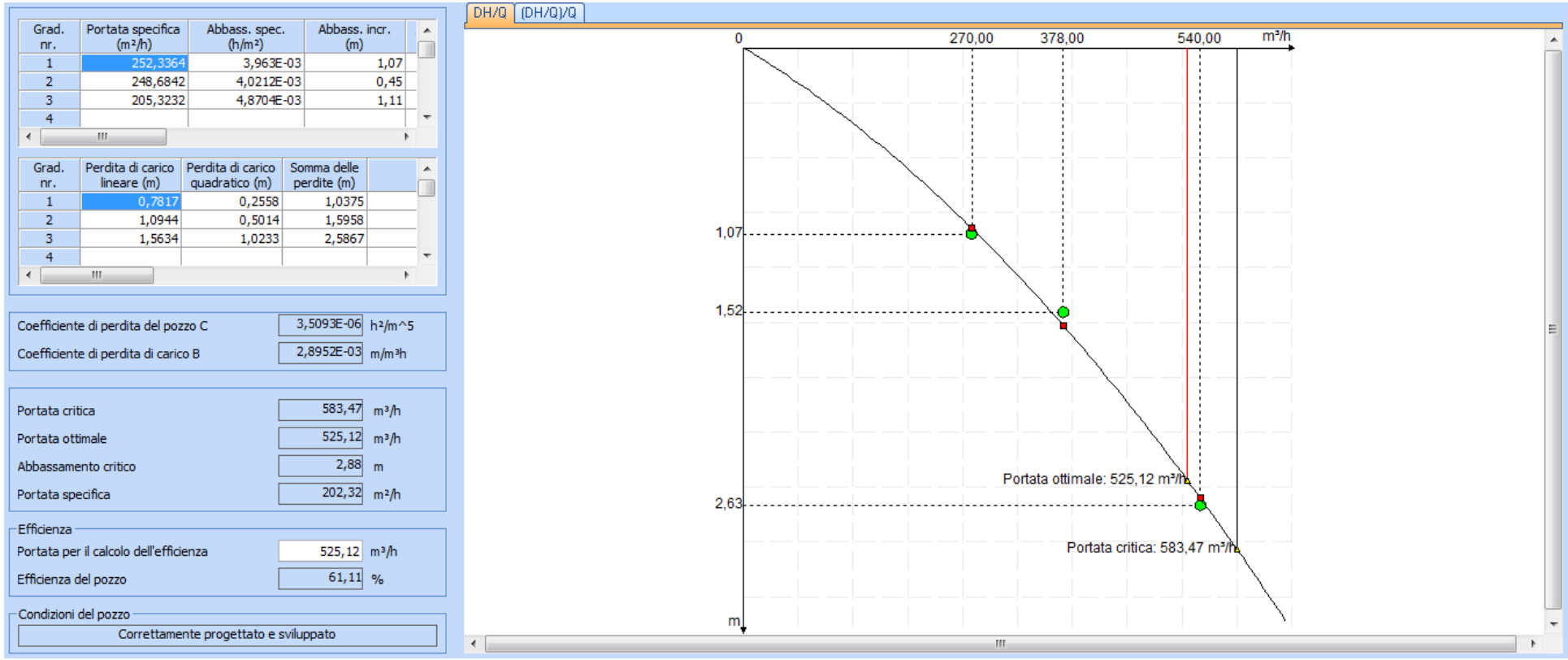


Fig.12 Elaborazione analitica a gradini di portata

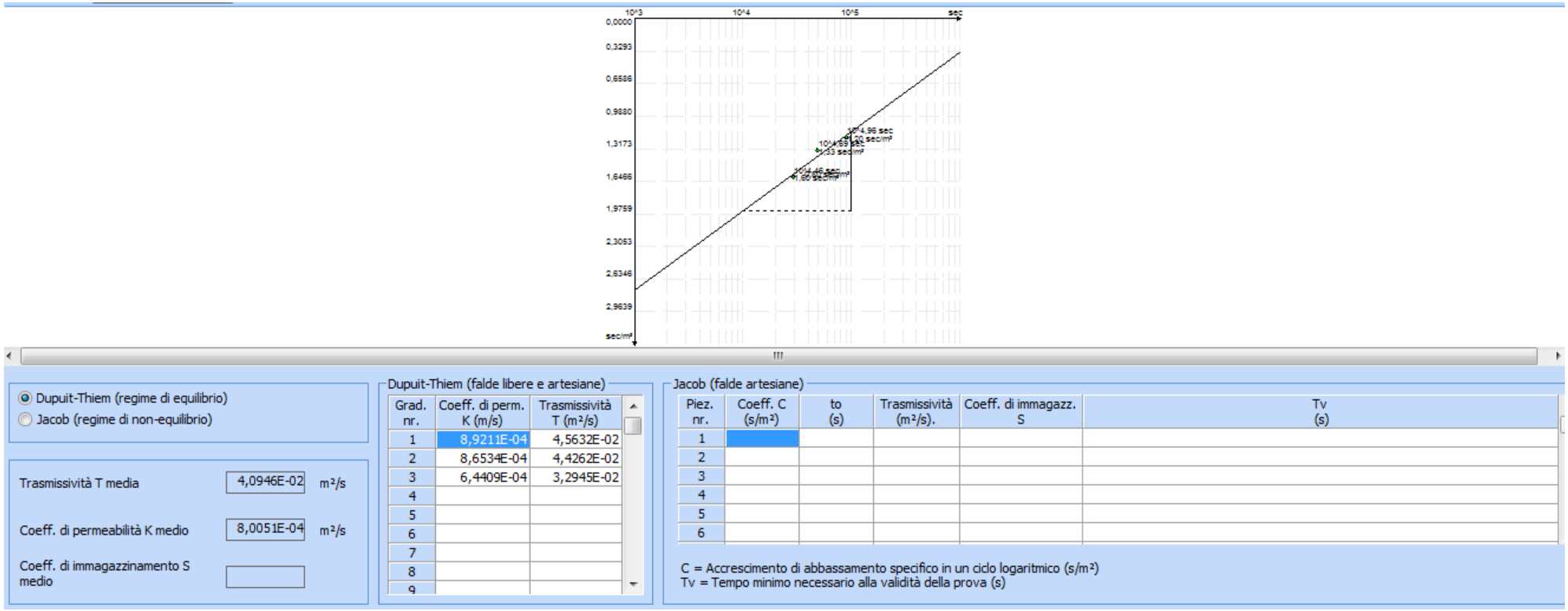


Fig.12 bis Elaborazione a gradini di portata su stazioni di prova

Metodo di Dupuit-Thiem

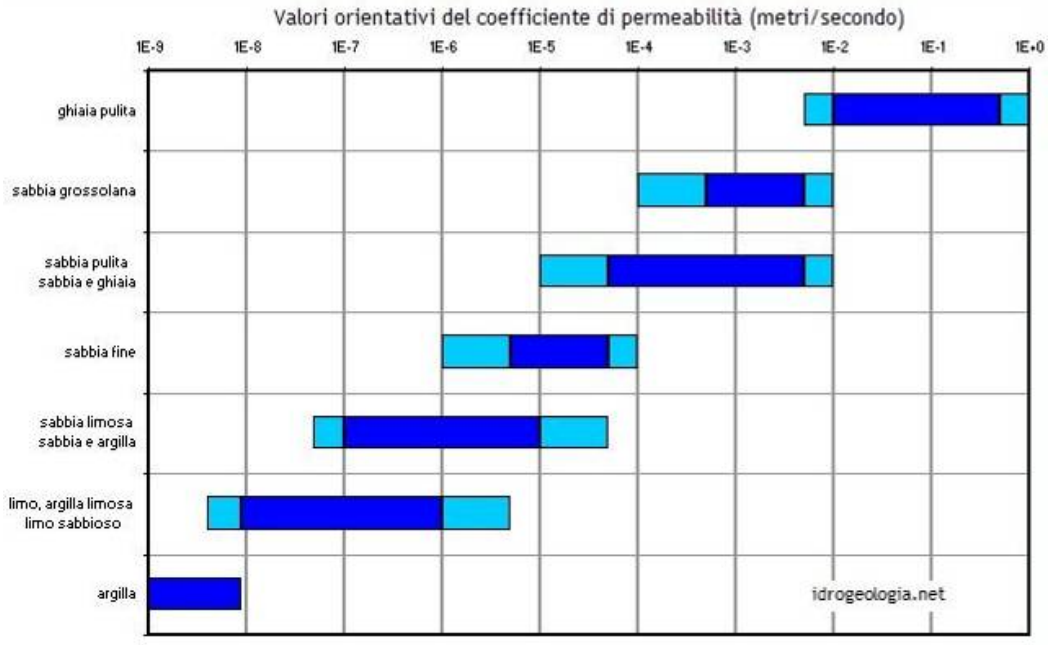
Gradino Nr.	Coefficiente di permeabilità K (m/s)	Trasmissività T (m²/s)
1	8,9211E-04	4,5632E-02
2	8,6534E-04	4,4262E-02
3	6,4409E-04	3,2945E-02

Trasmissività T media 4,0946E-02 m²/s

Coefficiente di permeabilità K medio 8,0051E-04 m/s

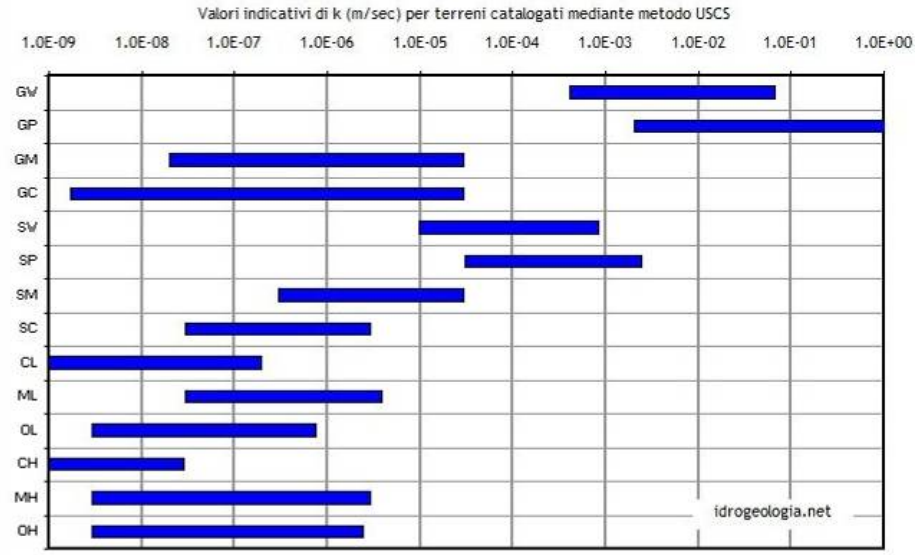
2.4 Considerazioni sui valori ottenuti

Il coefficiente di permeabilità "k" calcolato è compatibile con le caratteristiche stratigrafiche del settore idrogeologico investigato e corrispondono ai valori tipici dei depositi alluvionali incontrati (vedi Tab.1 e 2)



Tab.1

La Tab.1 riporta i valori tipici del coefficiente di permeabilità orizzontale (kh) per un aserie di terreni sciolti a granulometria decrescente dalle ghiaie alle argille. Per via della natura usualmente stratificata dei terreni, il valore del coefficiente di permeabilità verticale (kv) è di solito inferiore al oscilla da 2 a 20 ma può arrivare fino a 100 in presenza di terreni molto stratificati.I valori riportati in colore blu rappresentano la fascia di variazione di permeabilità più usuale, mentre i valori riportati in colore azzurro indicano la fascia di variazione un po' più estrema. E' opportuno comunque precisare che il reale valore del coefficiente di permeabilità di uno specifico campione di terreno può anche essere esterno al campo di variabilità riportato in figura. I valori di riferimento per le varie litologie possono variare leggermente ma tali differenze non sono significative in quanto occorre sempre considerare il livello puramente orientativo dell'informazione.



Tab.2

La Tab.2, tratta anch'essa da una elaborazione di dati bibliografici, mostra i valori indicativi di permeabilità per una serie di terreni classificati mediante il metodo 'Unified Soil Classification.

La permeabilità misurata durante la prova di emungimento corrisponde ad un valore medio tra permeabilità orizzontale (k_h) e permeabilità verticale (k_v) per cui Coefficiente di permeabilità K= 8,0051E-0 4m/s corrisponde granulometricamente, in considerazione di un valore medio tra k_h e k_v, ad una ghiaia e sabbia e sabbia pulita e GW per USCS (ghiaia ben assortita granulometricamente) che corrispondono alla tipologia dei materiali presenti nel deposito alluvionale studiato.

Bibliografia delle schede

-Peck **R.B.,** Terzaghi K. (1974): ***Geotecnica.*** UTET (Torino), pp 1-643 - *ISBN 88-02-03010-3*
-Celico P. (1990): ***Prospezioni Idrogeologiche.*** Liguori (Napoli), pp 1-735 - *ISBN 88-207-1331-4*
-Colleselli F., Colombo P. (1996): ***Elementi di Geotecnica.*** Zanichelli (Bologna), pp 1-500 - *ISBN 88-0809784-6*
-Lancellotta R. (1987): ***Geotecnica.*** Zanichelli (Bologna), pp 1-531 - *ISBN 88-08-04362-2*
-Custodio E. (2005): ***Teoria elementare di fluodinamica in mezzi porosi.*** In: Idrologia sotterranea, a cura di:
-Custodio E., Llamas **M.R..** Dario Flaccovio Editore (Palermo), pp 429-586 - *ISBN 88-7758-623-0*

Prova di pompaggio realizzata nel Campo di Caperana su Pozzo singolo P5

Contenuti

1. Generalità sulle teorie applicate
1.1 Prova di pozzo di lunga durata

2. La prova realizzata nel Campo di Caperana Pozzo P5
2.1 Ubicazione
2.2 Pozzo P1, pz1 e pz2 dati generali
2.3 Elaborazione analitica a gradini di portata
2.4 Considerazioni sui valori ottenuti

1. Generalità sulle teorie applicate

1.1 Prova di pozzo di lunga durata

Le prove di pozzo di lunga durata vengono eseguite a portata costante, con un solo gradino di portata e hanno una durata che varia tra le 48 e le 72 ore.
Durante la prova si misura l'abbassamento dei livelli, ma anche la risalita che deve essere osservata per una uguale durata (figura 13).
Il calcolo del coefficiente di permeabilità (K) e della trasmissività (T) può essere effettuato in regime di equilibrio, sia su falda libera che su falda artesiana, con la *formula di Dupuit-Thiem* di cui già si è discusso per le prove di pozzo di breve durata, con la differenza che la formula viene applicata ad un solo gradino di portata, a portata costante (Q_{cost}), quando il cono di depressione diventa stazionario. Perciò si avrà:

$$K = \frac{Q_{cost}}{\pi} \frac{\ln r_2' - \ln r_1'}{(h_1 + h_2)(\Delta h_{p1} - \Delta h_{p2})} (m/s)$$

$$T = \frac{Q_{cost}}{2\pi} \frac{\ln r_2' - \ln r_1'}{(\Delta h_{p1} - \Delta h_{p2})} (m^2/s)$$

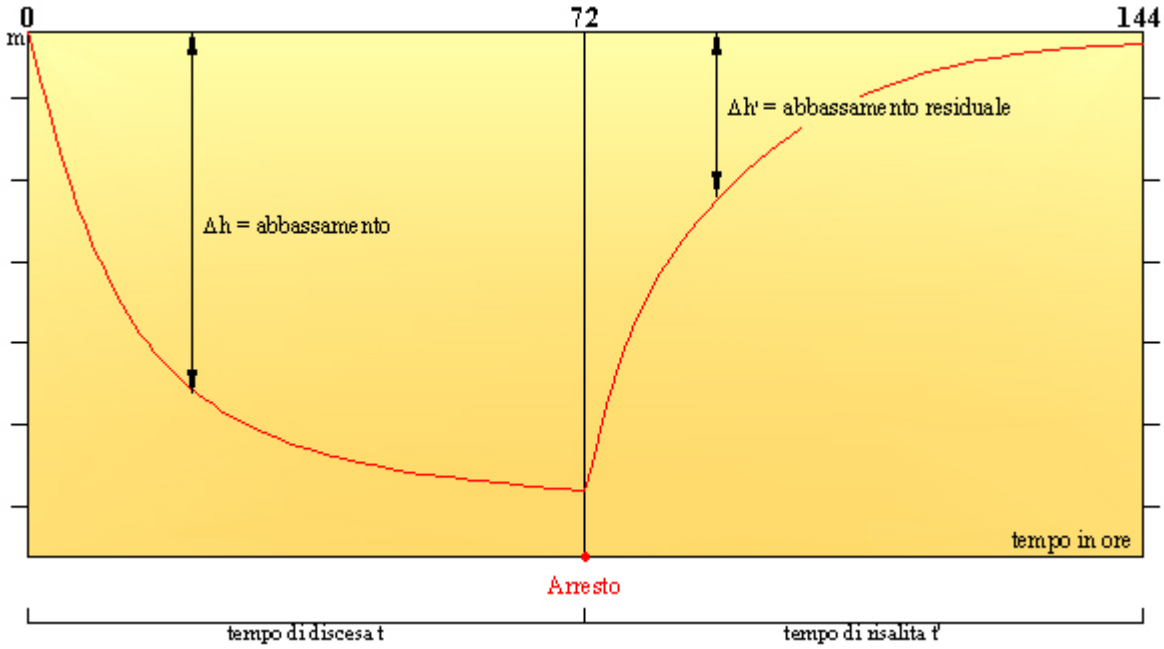


Figura 1

Quando si opera in un acquifero con falda artesiana, illimitato, con substrato e tetto impermeabile, in regime di non-equilibrio, per il calcolo della trasmissività T è possibile utilizzare la *formula di approssimazione logaritmica* di Jacob.
Inizialmente si riportano i dati in un diagramma semilogaritmico (figura 14), dove sull'asse delle ordinate vengono posti gli abbassamenti del livello dell'acqua (Δh_p), in metri, misurate in un piezometro della stazione di prova e sull'asse delle ascisse il logaritmo dei tempi (log t). Dopo un intervallo di tempo sufficientemente lungo i punti si allineano su di una retta di cui è possibile calcolare

il coefficiente angolare C che può essere misurato direttamente sul grafico essendo uguale all'accrescimento di depressione piezometrica Δh_p che si verifica in un ciclo logaritmico:

$$C = \tan \beta = \frac{0{,}183\,Q}{T}$$

Calcolato C è possibile ottenere il valore della trasmissività (T) e del coefficiente di immagazzinamento (S):

$$T = \frac{0{,}183\,Q}{C}$$

$$S = \frac{2{,}25\,T\,t}{r'^2}$$

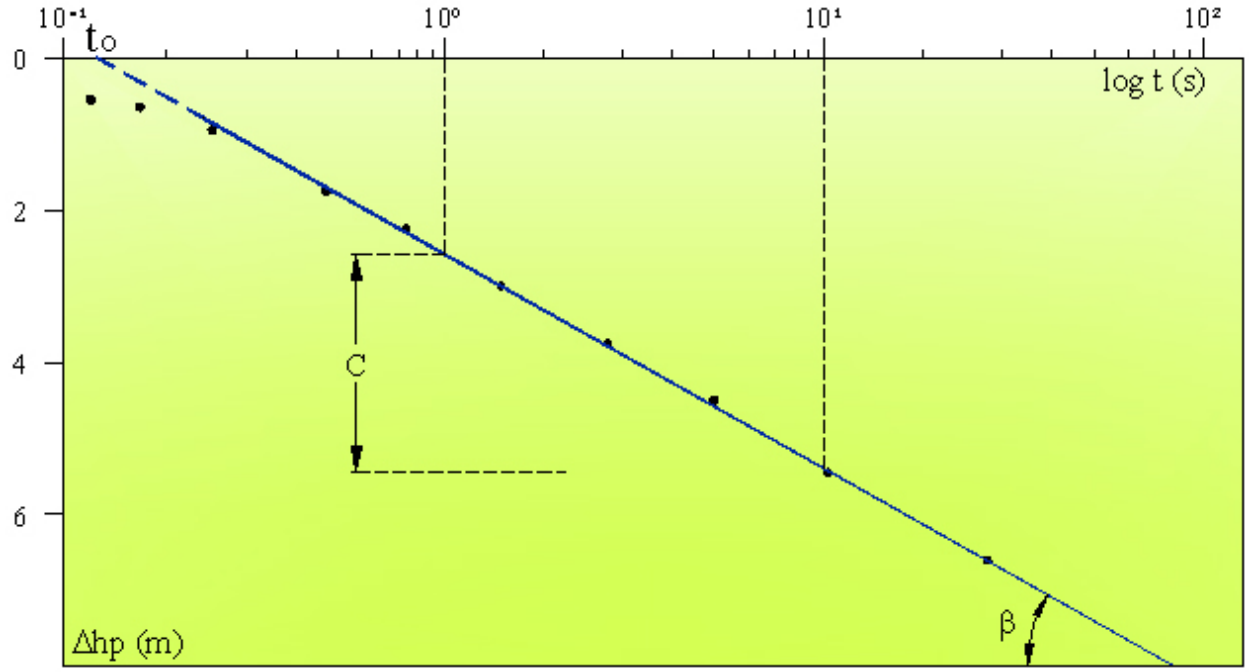


Figura 2 – Diagramma depressioni (Δh_p)/log tempi (t)

Il metodo di approssimazione di Jacob può essere utilizzato per interpretare la *curva di risalita* mediante la *formula di approssimazione logaritmica*:

$$\Delta h'_p = \frac{0{,}183\,Q}{T} \log \frac{t + t'}{t'} \text{ (m)}$$

Si pongono i dati in un diagramma semilogaritmico (figura 15), dove sull'asse delle ordinate vengono riportate le depressioni residue ($\Delta h'_p$) e in quello delle ascisse il logaritmo di (t + t')/t'.

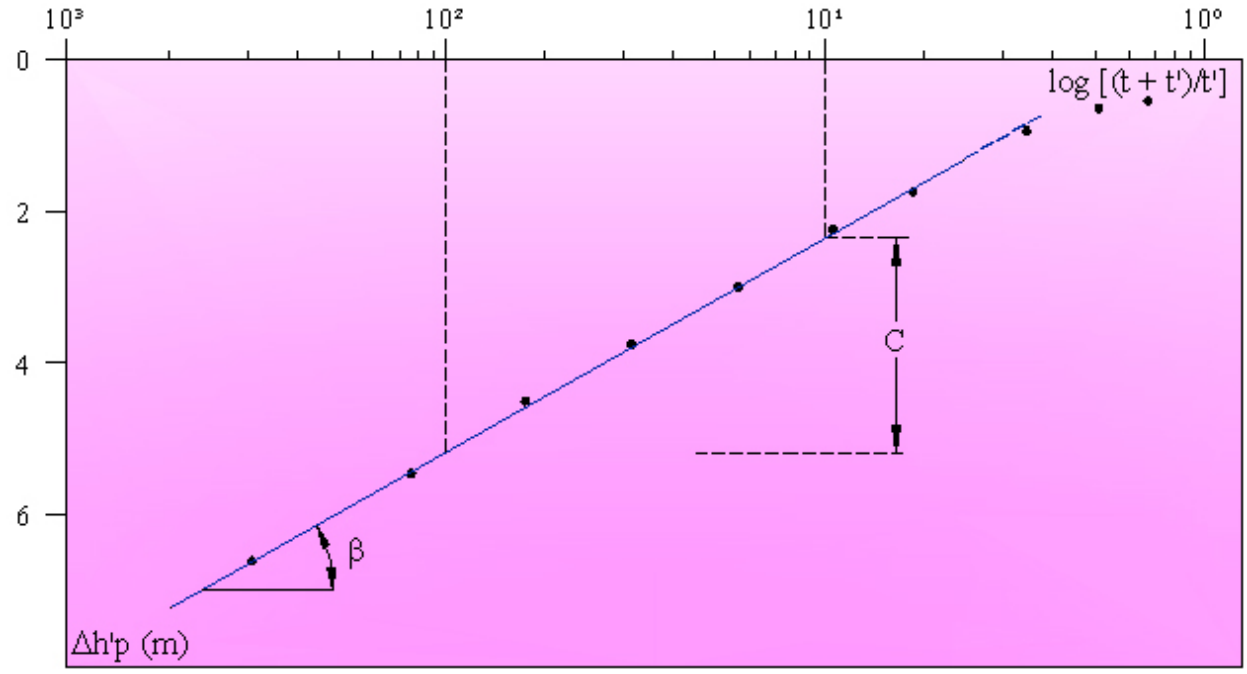


Figura 3 – Retta rappresentativa di una curva di risalita

Escludendo il tratto iniziale di risalita rapida e quello finale di risalita lenta, i punti si allineano su di una retta rappresentativa della curva il cui coefficiente angolare C si ottiene come nel caso della curva di abbassamento. Calcolato il valore di C è possibile ottenere la trasmissività (T), che se le prove sono state eseguite correttamente, risulta dello stesso ordine di grandezza di quella calcolata con la curva di abbassamento.

Quando però è $u = \frac{r'^2 S}{4 T t} > 0{,}01$ la formula di approssimazione logaritmica di Jacob non è più applicabile, per cui è necessario calcolare la trasmissività mediante la formula del regime di non-equilibrio di Theis.

L'analisi mediante Theis si esegue graficamente utilizzando la ***curva standard*** di Theis (figura 16), alla quale bisogna sovrapporre i valori ottenuti con la prova di emungimento.

La *curva standard* viene costruita su di un grafico logaritmico riportando sull'asse delle ascisse i valori della variabile u e sull'asse delle ordinate W(u).

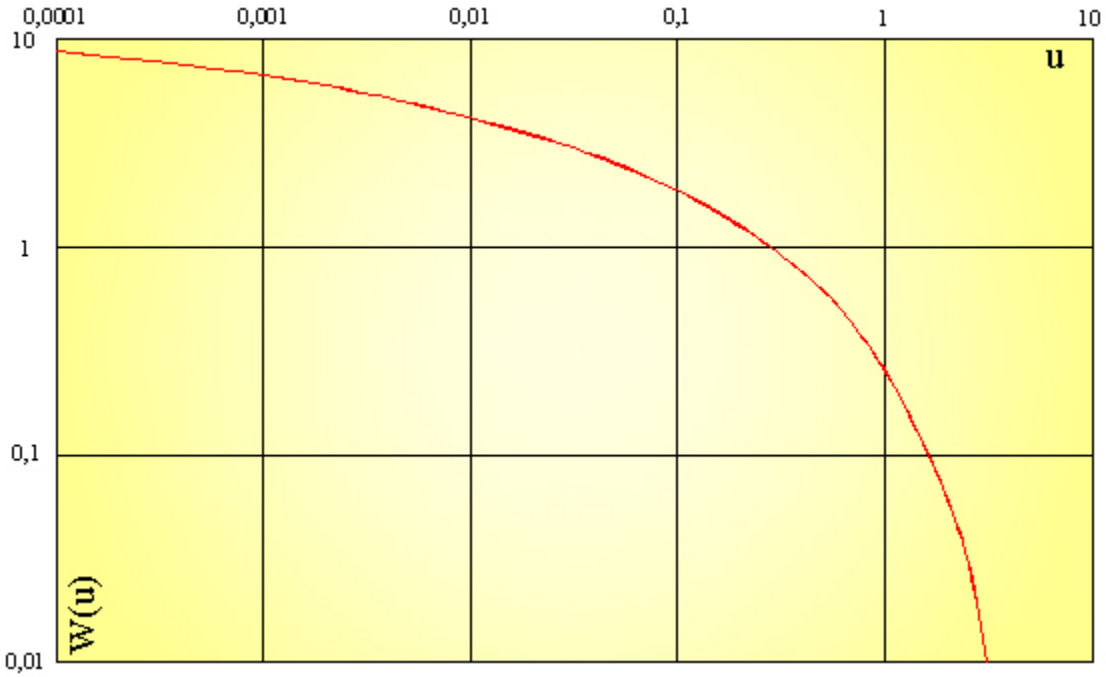


Figura 4 – Curva standard di Theis

Su un altro grafico logaritmico, con coordinate alla stessa scala della curva standard, si riportano sull'asse delle ascisse i valori di r'^2/t e sull'asse delle ordinate le depressioni Δh_p corrispondenti, ricavati dalla prova di emungimento. Così facendo si ottiene una curva sperimentale che rappresenta un tratto di quella standard, alla quale può essere sovrapposta.
Dalla sovrapposizione dei due diagrammi, scegliendo un punto sul tratto di curva sovrapponibile e tracciandone le coordinate, si ricavano due coppie di valori: $W(u)$-Δh_p e u-r'^2/t (figura 17).
I valori così ricavati andranno inseriti nelle formule per il calcolo della trasmissività (T) e del coefficiente di immagazzinamento (S):

$$T = \frac{Q}{4\pi\,\Delta h_p} W(u)\ (m^2/s)$$

$$S = \frac{4\,T\,u}{r'^2/t}$$

Queste formule sono valide quando si opera in acquiferi illimitati, confinati.

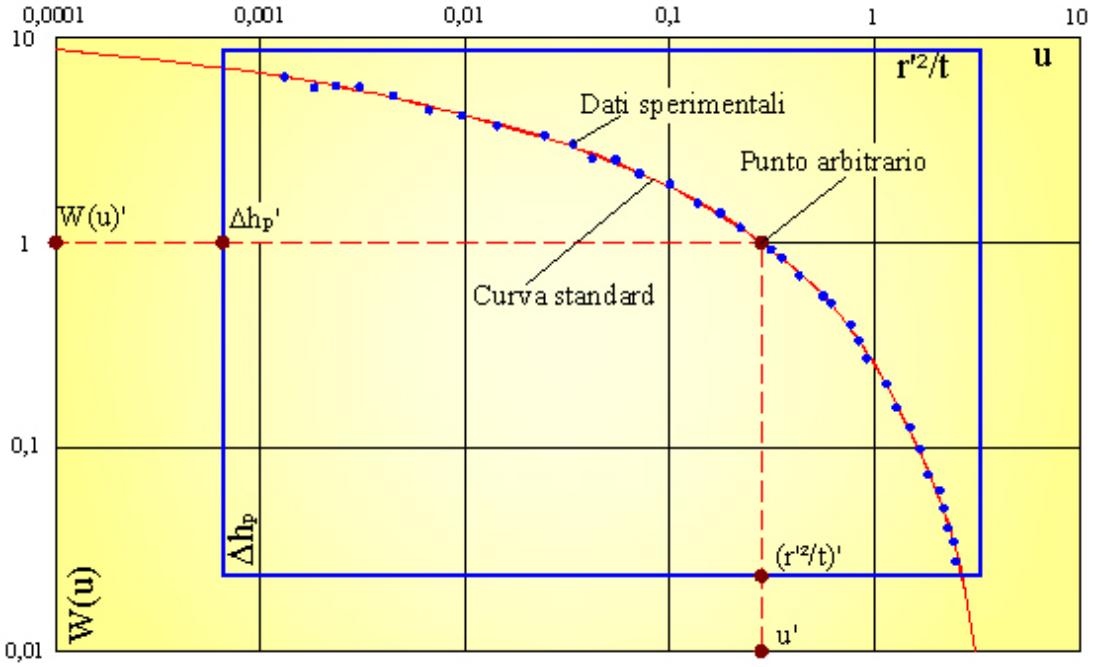


Figura 5 – Sovrapposizione di dati sperimentali sulla curva standard di Theis.

In falde *semiartesiane* si utilizza un metodo di sovrapposizione grafica simile al precedente, proposto da Hantush nel 1956.
In un diagramma logaritmico (figura 18) si rappresenta il log W(u, r'/B) in funzione del log 1/u si ottengono diverse curve per differenti valori del rapporto r'/B (quando r'/B = 0 si ottiene la curva standard degli acquiferi confinati).

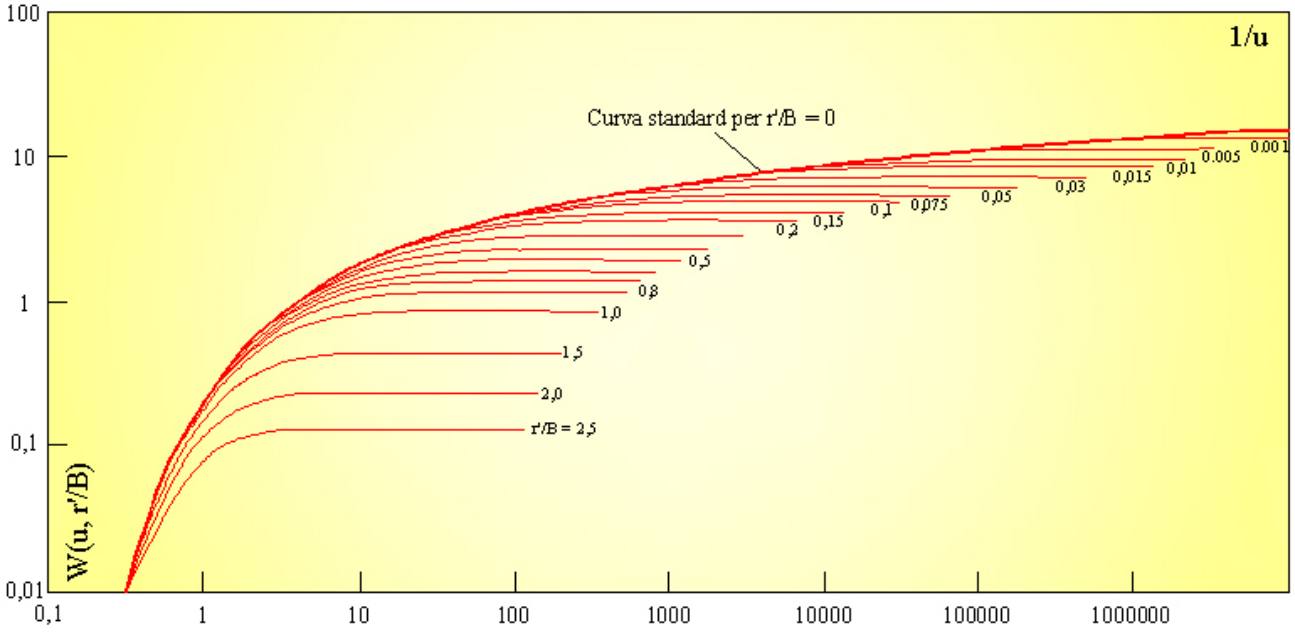


Figura 6 – Curve standard per acquiferi semiartesiani

Come per il caso degli acquiferi artesiani, si costruisce un altro grafico logaritmico su cui vengono riportati, rispettivamente sull'asse delle ordinate e sull'asse delle ascisse, i dati sperimentali di Δh_p e t, che poi vengono sovrapposti.

Così facendo, riferendosi ad un punto arbitrario posto sulla curva sovrapposta, si ottengono le coppie di valori W(u, r'/B)- Δh_p e 1/u-t, da inserire nelle formule per il calcolo della trasmissività (T) e del coefficiente di immagazzinamento (S):

$$T = \frac{Q}{4\pi\,\Delta h_p} W(u, r'/B)\ (m^2/s)$$

$$S = \frac{4\,T\,t}{(1/u)r'^2}$$

2. La prova realizzata nel Campo di Caperana Pozzo P5

2.1 Ubicazione

Il pozzo P5 è posizionato nel settore di monte del Campo Pozzi di Caperana, si veda cartografia generale (Fig.???) e rilievo di dettaglio riportato nelle Fig..

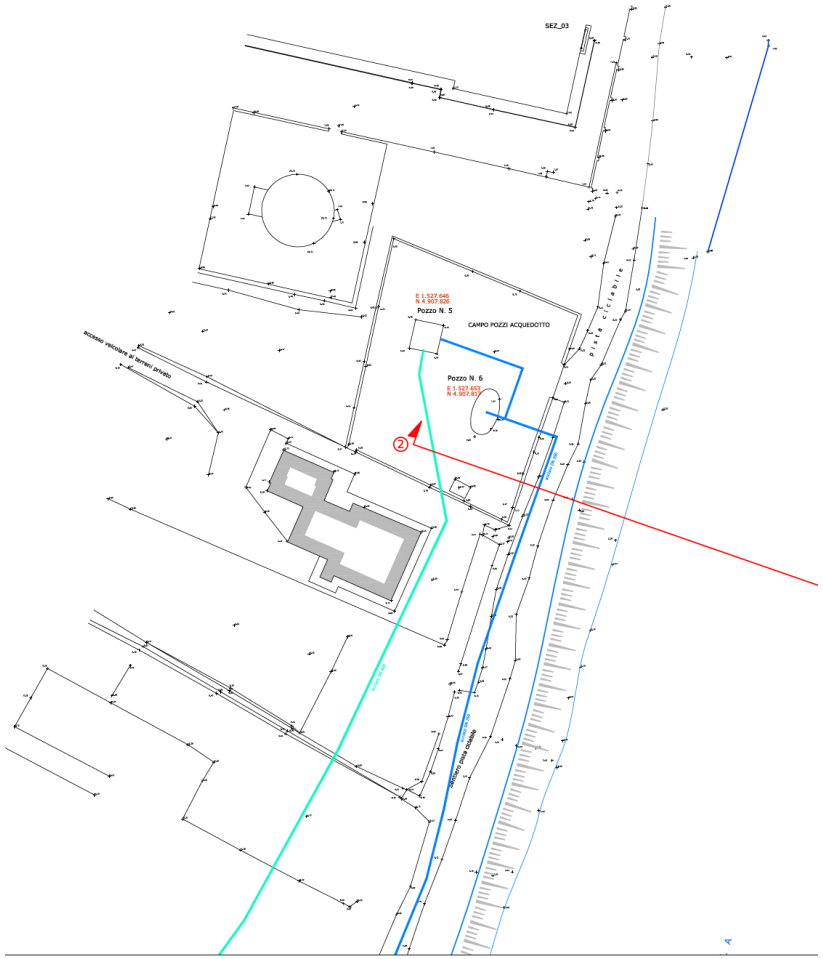


Fig.7 Stralcio rilievo dedicato

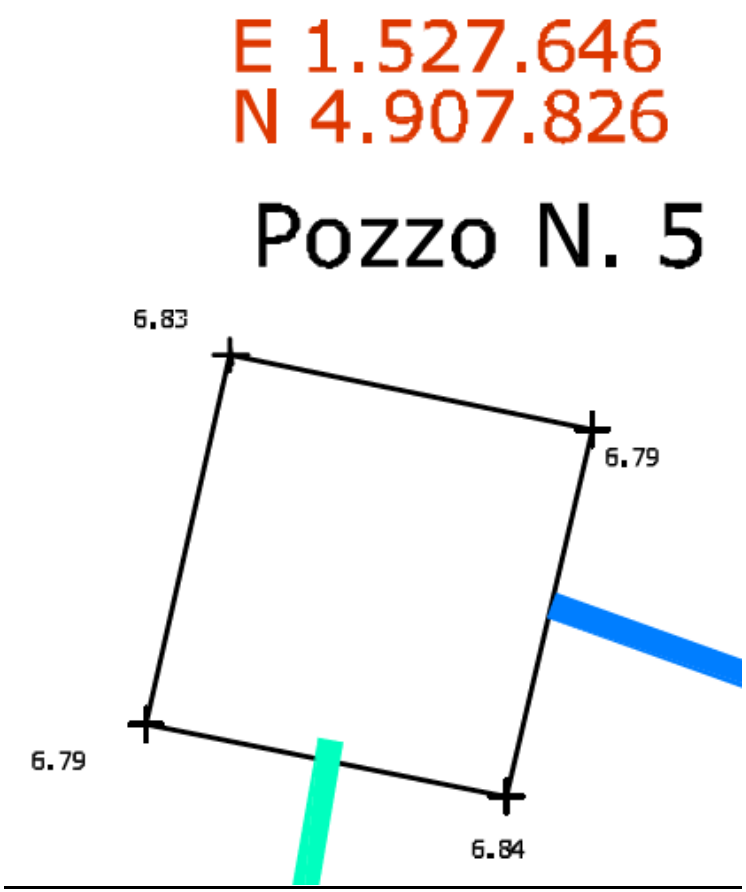


Fig.7 bis Dettaglio posizione pozzo

2.2 Pozzo P5 dati generali

Il pozzo P5, viste le condizioni stratigrafiche ed idrogeologiche del deposito alluvionale che lo ospita e dalle caratteristiche del pozzo stesso è da considerare:

- completo
- in falda semi libera,

Alla scopo di caratterizzare il complesso acquifero sono state effettuate due prove di pompaggio:

- La prima a scalini di portata
- La seconda a portata costante con rilievo dei tempi di risalita.

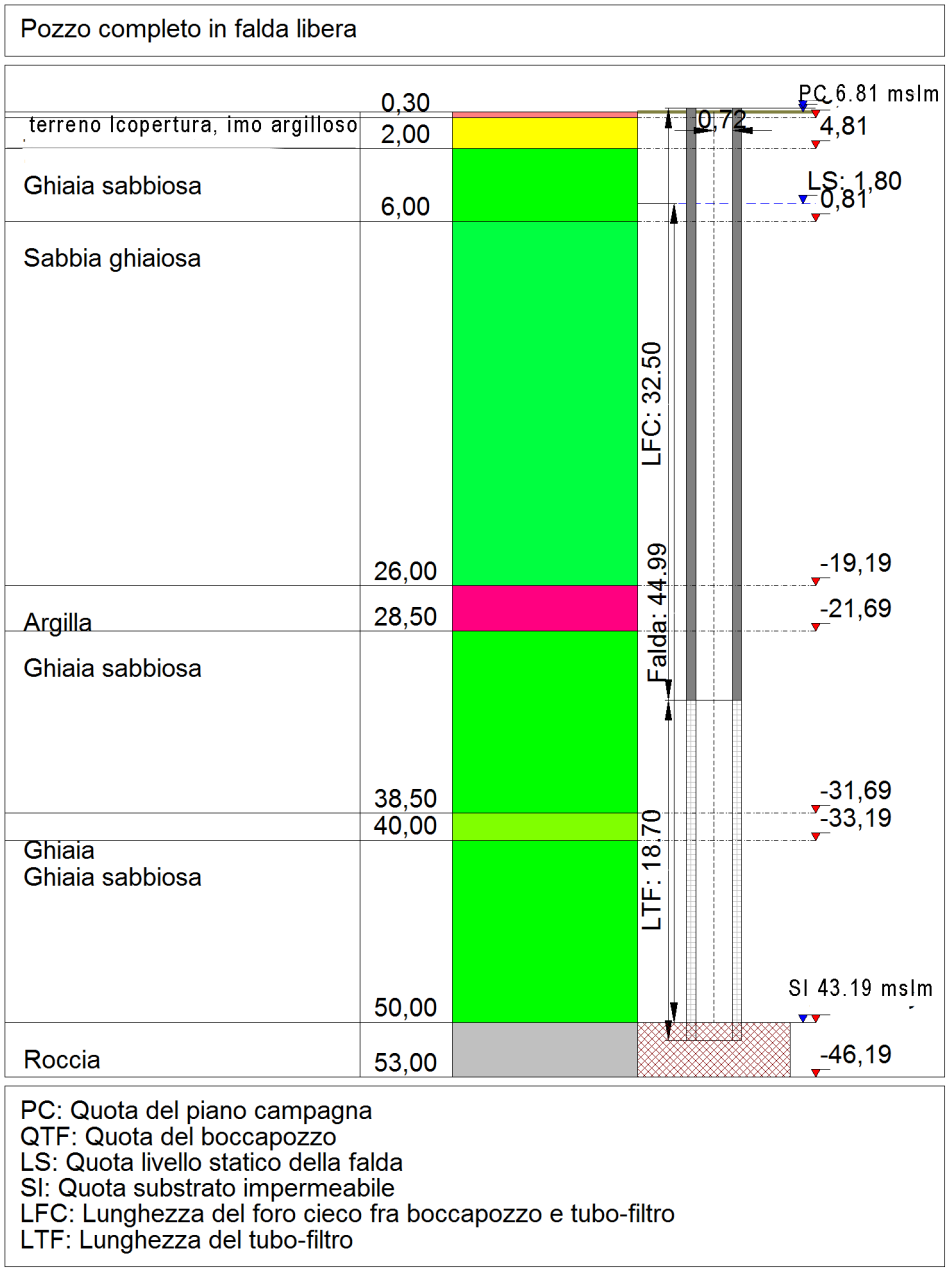


Fig. 8 Stratigrafia schematica P5

P5 Dettagli :

- Piano campagna 6,781mslmm
- Prof. 53 m;
- Diam. 1200mm da P.C. a – 33m , 760mm da – 30m a 51m;
- Filtri: da 30 a 50m; tipo *"a ponte";* ghiaetto ben gradato (Fiume Po)
- Pompe; 1 pompa B.P. + 1 pompa A.P. => tot max Q =. 130 lt/s
- Posizione Pompe : BP a -22 m ; A.P. a -19m
- Livello statico

Dati relativi alla stratigrafia

Strato Nr.	Descrizione (-)	Profondità (m)
1	Terreni organici	0,3
2	Limo sabbioso-argilloso	1,7
3	Ghiaia sabbiosa	4
4	Sabbia ghiaiosa	20
5	Argilla	2,5
6	Ghiaia sabbiosa	10
7	Ghiaia	1,5
8	Ghiaia sabbiosa	10
9	Roccia	3

Dati relativi ai gradini di portata

Input dati

Gradino Nr.	Data	Ore	Minuti	Secondi	Portata (m^3/h)	Abbassamento nel pozzo (m)
1	Da 29/10/2013 (11.30 a 19.36)	8	6	0	90	0,68
2	a 30/10/2013 (9.40)	14	4	0	144	1,29
3	a 30/10/2013 (19.00)	9	20	0	290	2,51

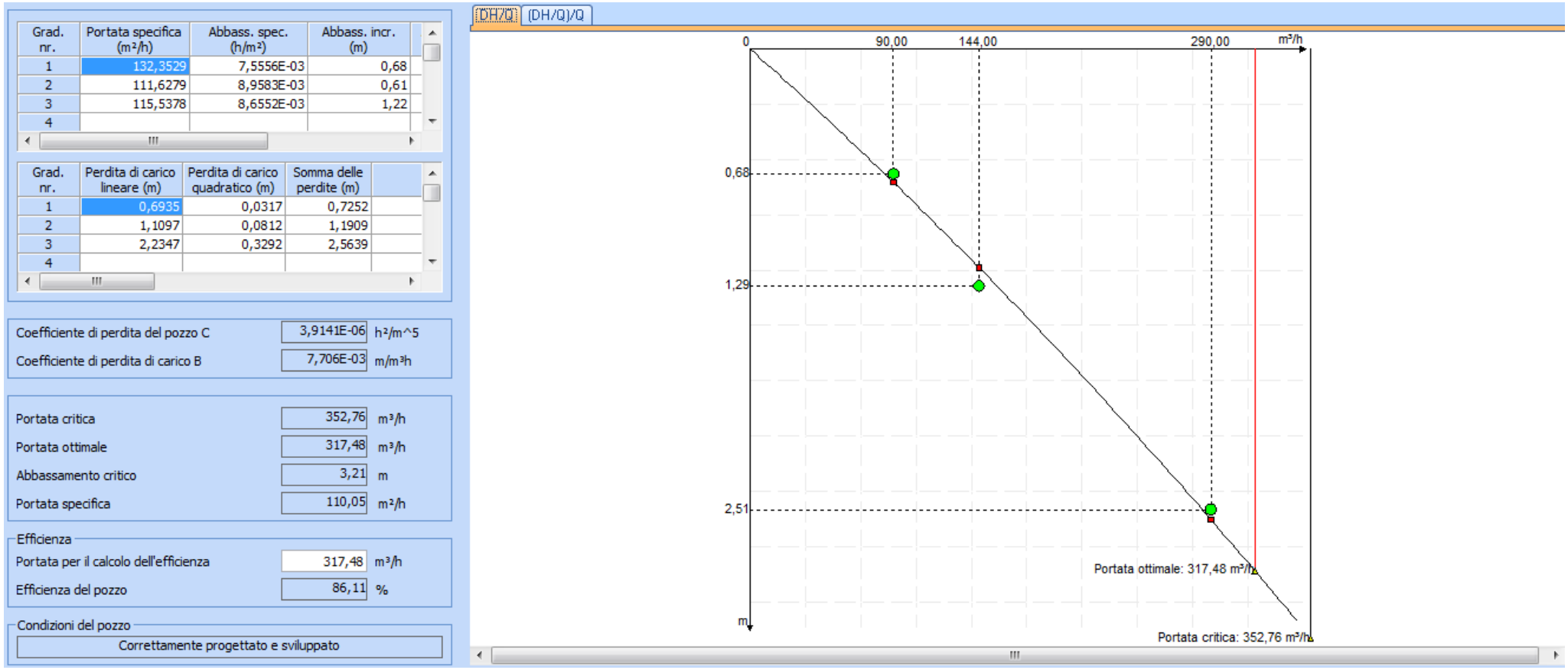


Fig.9 Elaborazione analitica a gradini di portata

2.3 Elaborazione analitica a gradini di portata

Gradino Nr.	Portata specifica del pozzo(m²/h)	Abbassamento specifico nel pozzo (h/m²)	Abbass. Incrementale nel pozzo (m)
1	132,3529	7,5556E-03	0,68
2	111,6279	8,9583E-03	0,61
3	115,5378	8,6552E-03	1,22

Coefficiente di perdita del pozzo C	3,9141E-06 h²/m^5
Coefficiente di perdita di carico B	7,706E-03 m/m³h
Portata per il calcolo dell'efficienza	317,48 m³/h
Efficienza del pozzo	86,11 %
Correttamente progettato e sviluppato	

Gradino Nr.	Perdita di carico lineare (m)	Perdita di carico quadratico (m)	Somma delle perdite (m)
1	0,6935	0,0317	0,7252
2	1,1097	0,0812	1,1909
3	2,2347	0,3292	2,5639

Portata critica	352,76 m³/h
Portata ottimale	317,48 m³/h
Abbassamento critico	3,21 m
Portata specifica	110,05 m²/h

2.4 Dati relativi alla portata costante

Portata	290,00 m³/h
Abbassamento nel pozzo	2,51 m

Fase di abbassamento

Fase Nr.	Ore	Minuti	Secondi
1	14	0	0

Fase di risalita

Fase Nr.	Ore	Minuti	Secondi
1	0	55	0

2.5 Valori di Permeabilità “K” e trasmissività “T”

Elaborazione a gradini di portata su pozzo singolo

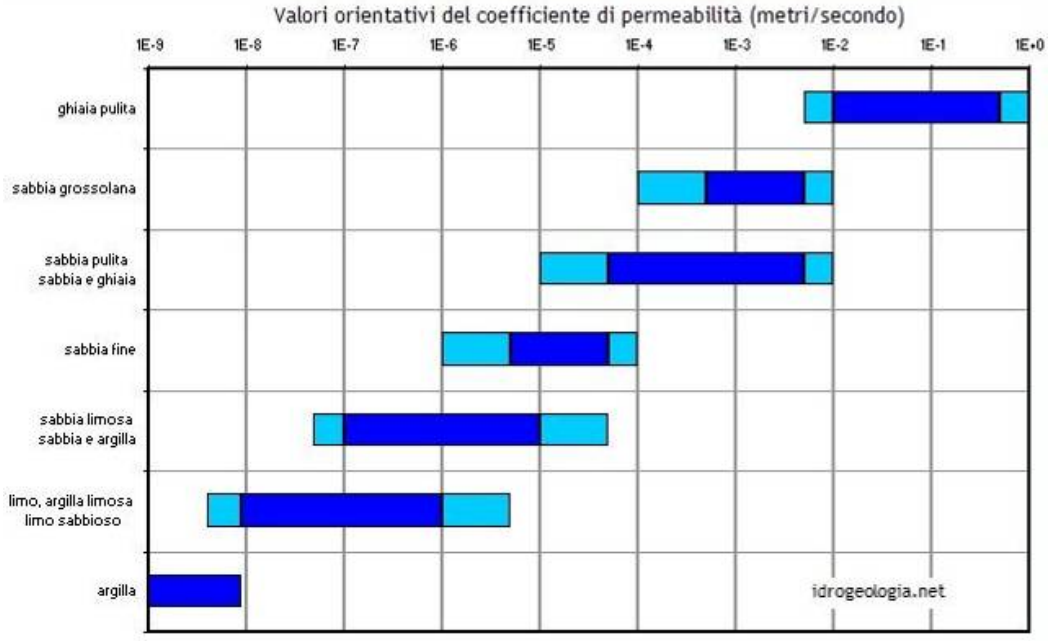
Raggio d'azione presunto del pozzo	60,00 m
Coefficiente di permeabilità K	4,9528E-04 m²/s
Trasmissività T	2,2283E-02 m²/s

Elaborazione a portata costante con il metodo di Dupuit-Thiem

Raggio d'azione R	60,00 m
Coefficiente di permeabilità K	5,1655E-04 m/s
Trasmissività T	2,324E-02 m²/s

Nota
Per il raggio d’azione è stato assunto un valore di 60m perché nel pozzo P6 presente ad una distanza di circa 15 mal P5, il pozzo P6 ha caratteristiche stratigrafiche simili al P5 e filtro continuo da -16 a -50 m. per cui intercetta tutti i livelli acquiferi al massimo del pompaggio il livello dinamico si è depresso al massimo di 10 cm.

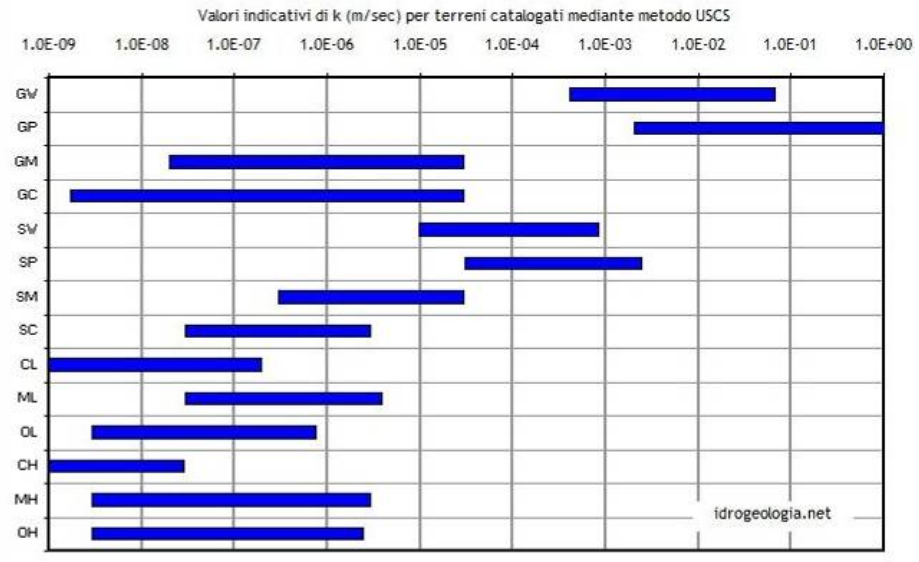
Il coefficiente calcolato è compatibile con le caratteristiche stratigrafiche del settore idrogeologico investigato e corrispondono ai valori tipici dei depositi alluvionali incontrati (vedi Tab.1 e 2)



Tab.1

La Tab.1 riporta i valori tipici del coefficiente di permeabilità orizzontale (kh) per un aserie di terreni sciolti a granulometria decrescente dalle ghiaie alle argille. Per via della natura usualmente stratificata dei terreni, il valore del coefficiente di permeabilità verticale (kv) è di solito inferiore al oscilla da 2 a 20 ma può arrivare fino a 100 in presenza di terreni molto stratificati.I valori riportati in colore blu rappresentano la fascia di variazione di permeabilità più usuale, mentre i valori riportati in colore azzurro indicano la fascia di variazione un po' più estrema. E' opportuno comunque precisare che il reale valore del coefficiente di permeabilità di uno specifico campione di

terreno può anche essere esterno al campo di variabilità riportato in figura. I valori di riferimento per le varie litologie possono variare leggermente ma tali differenze non sono significative in quanto occorre sempre considerare il livello puramente orientativo dell'informazione.



La Tab.2

La Tab.2, tratta anch'essa da una elaborazione di dati bibliografici, mostra i valori indicativi di permeabilità per una serie di terreni classificati mediante il metodo 'Unified Soil Classification.

La permeabilità misurata durante la prova di emungimento corrisponde ad un valore medio tra permeabilità orizzontale (k_h) e permeabilità verticale (k_v) per cui Coefficiente di permeabilità K= 8,0051E-0 4m/s corrisponde granulometricamente, in considerazione di un valore medio tra k_h e k_v, ad una ghiaia e sabbia e sabbia pulita e GW per USCS (ghiaia ben assortita granulometricamente) che corrispondono alla tipologia dei materiali presenti nel deposito alluvionale studiato.

Bibliografia delle tabelle 1 e 2

-Peck **R.B.,** Terzaghi K. (1974): ***Geotecnica.*** UTET (Torino), pp 1-643 - *ISBN 88-02-03010-3*
-Celico P. (1990): ***Prospezioni Idrogeologiche.*** Liguori (Napoli), pp 1-735 - *ISBN 88-207-1331-4*
-Colleselli F., Colombo P. (1996): ***Elementi di Geotecnica.*** Zanichelli (Bologna), pp 1-500 - *ISBN 88-0809784-6*
-Lancellotta R. (1987): ***Geotecnica.*** Zanichelli (Bologna), pp 1-531 - *ISBN 88-08-04362-2*
-Custodio E. (2005): ***Teoria elementare di fluodinamica in mezzi porosi.*** In: Idrologia sotterranea, a cura di:
-Custodio E., Llamas **M.R..** Dario Flaccovio Editore (Palermo), pp 429-586 - *ISBN 88-7758-623-0*