

Sommario

RICOSTRUZIONE DELLA PIEZOMETRIA DI UN'AREA CONTAMINATA.....	2
1.1 – Ricostruzione della superficie piezometrica.....	3
1.2 - Caratterizzazione dei parametri: conducibilità idraulica, portata e velocità effettiva	6
PREVISIONE DEGLI ABBASSAMENTI INDOTTI DA POMPAGGIO IN ACQUIFERI CONFINATI	
.....	8
2.1 Cenni teorici per il regime transitorio in acquifero confinato.....	8
2.2 Previsione degli abbassamenti.....	9
2.3 Interpretazione prova di pompaggio con metodo di Jacob.....	12
2.4 Interpretazione tramite Aqtesolv	14
INTERPRETAZIONE DI UNA PROVA DI FALDA E DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI IDRODINAMICI MEDIANTE AQTESOLV	17
3.1 Soluzione di Jacob.....	18
3.2 Interpretazione attraverso Aqtesolv	21
3.3 Deviazione dal comportamento reale.....	22
OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI APPROVVIGIONAMENTO IDRICO.....	24
4.1 Equazione caratteristica del pozzo.....	25
4.2 Interpretazione della prova di pozzo.....	26
4.3 Efficienza idraulica del pozzo.....	28
4.4 Calcolo delle perdite di carico e scelta della pompa idraulica	30
INTERPRETAZIONE DI UNO SLUG TEST MEDIANTE AQTESOLV	34
5.1 Abbassamento teorico iniziale.....	35
5.2 Metodo di Bower-Rice	36
5.3 Durata della prova.....	38
5.4 Interpretazione della prova con il metodo del KGS	38
5.5 Elaborazione dei dati relativi allo slug test effettuato sul campo.....	40

ESERCITAZIONE DI INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI**n. 1****RICOSTRUZIONE DELLA PIEZOMETRIA DI UN'AREA CONTAMINATA**

L'obiettivo dell'esercitazione è la ricostruzione, mediante il software Surfer, della piezometria relativa alla zona circostante una discarica di rifiuti, allo scopo di determinare

- la direzione del deflusso idrico sotterraneo;
- il gradiente idraulico della falda.

Punto di misura	Quota (m s.l.m.)	Soggiacenza (m)
-		
S2	275.37	20.10
S3	280.66	24.41
S4	280.69	24.69
S5	278.43	22.65
S6	275.11	20.14
S7	280.55	24.58

Sapendo che la stratigrafia è caratterizzata da tre livelli sabbioso-ghiaiosi-limosi aventi conducibilità idraulica pari a $4.2 \cdot 10^{-4}$, $1.1 \cdot 10^{-3}$ e $3.5 \cdot 10^{-5}$ m/s e spessore rispettivamente pari a 6, 4 e 10 m, calcolare:

- a) la conducibilità idraulica equivalente orizzontale e verticale;
- b) la portata di acqua che fluisce attraverso la sezione di massima ampiezza che sottende la discarica;
- c) la velocità effettiva dell'acqua di falda ($n_e=0.22$).

1.1 – Ricostruzione della superficie piezometrica

La figura 1.1.1 contiene la planimetria della discarica oggetto di studio e l'ubicazione dei sette piezometri in un sistema di coordinate spaziali locali.

La rappresentazione spaziale di tale sito è ottenuta grazie all'utilizzo del software Surfer, nel quale è stata importata la mappa fornita per l'esercitazione.

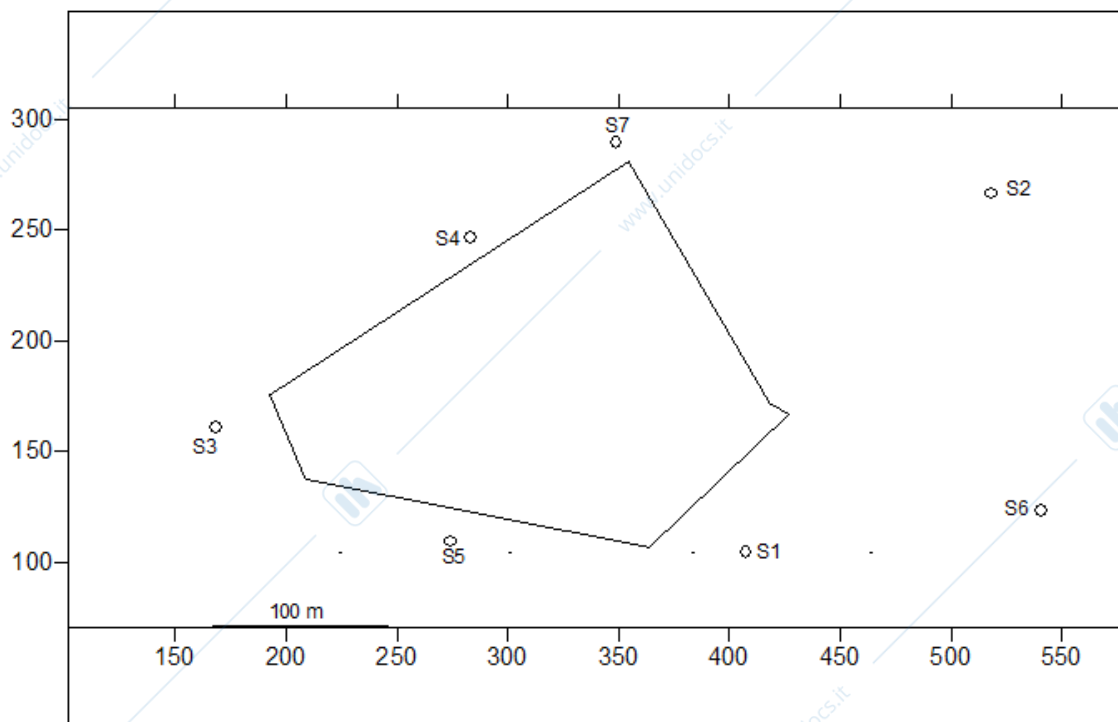


Figura 1.1.1 - Planimetria della discarica e disposizione dei piezometri

Le coordinate spaziali dei sette piezometri (indicati in figura 1.1.1 con la lettera S) sono state ricavate tramite il comando *Digitise*. Inoltre, note la quota altimetrica (Z_t) e la soggiacenza (h_w) per ogni piezometro, è stato possibile calcolare il carico idraulico come differenza:

$$H = Z_t - h_w$$

La tabella 1.1.1 riporta i valori delle coordinate spaziali (X, Y) e del carico idraulico (H) relativi ai sette piezometri.

Tabella 1.1.1 – Coordinate spaziali e carico idraulico in corrispondenza dei piezometri.

Punto di misura	Coordinate X (m)	Coordinate Y (m)	H (m)
S1	406.35	69.78	255.37
S2	547.31	276.26	255.27
S3	101.60	142.24	256.25
S4	248.51	250.45	256
S5	236.60	76.73	255.78
S6	577.10	93.60	254.97
S7	330.91	305.05	255.97

Tramite i dati riportati in tabella 1.1.1 si è potuto ricostruire la superficie piezometrica. A tal fine è stato utilizzato il metodo della triangolazione con interpolazione lineare (attraverso il software Surfer) che utilizza i punti campione per tracciare le linee isopiezometriche.

Questo procedimento si basa su un algoritmo che, costruendo una serie di triangoli aventi i lati contigui e i punti di misura come vertici, interpola i valori lungo i lati di tali triangoli e ne associa un piano di interpolazione.

In questo modo viene individuato l'andamento delle isopieze, riportato in figura 1.1.2.

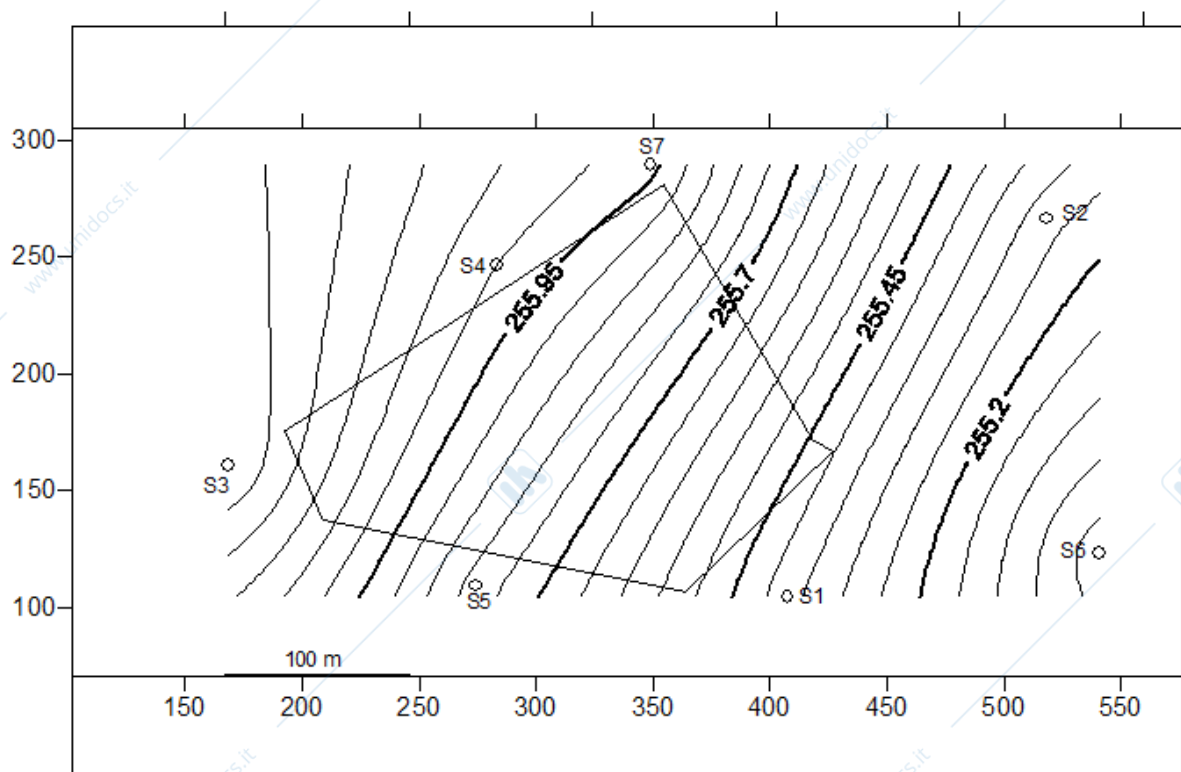


Figura 1.1.2 - Planimetria della discarica e disposizione dei piezometri

Osservando l'andamento delle isopieze (aventi un passo pari a 0.05m), si può notare come il valore del carico idraulico sia decrescente da sinistra verso destra. Sapendo che il flusso ha la direzione del gradiente piezometrico ma verso opposto e risulta quindi essere ortogonale alle linee isopiezometriche (ipotesi acquifero isotropo), nella figura 1.1.3 viene riportata la relazione fra le linee di flusso (freccie in rosso) e le isopieze.

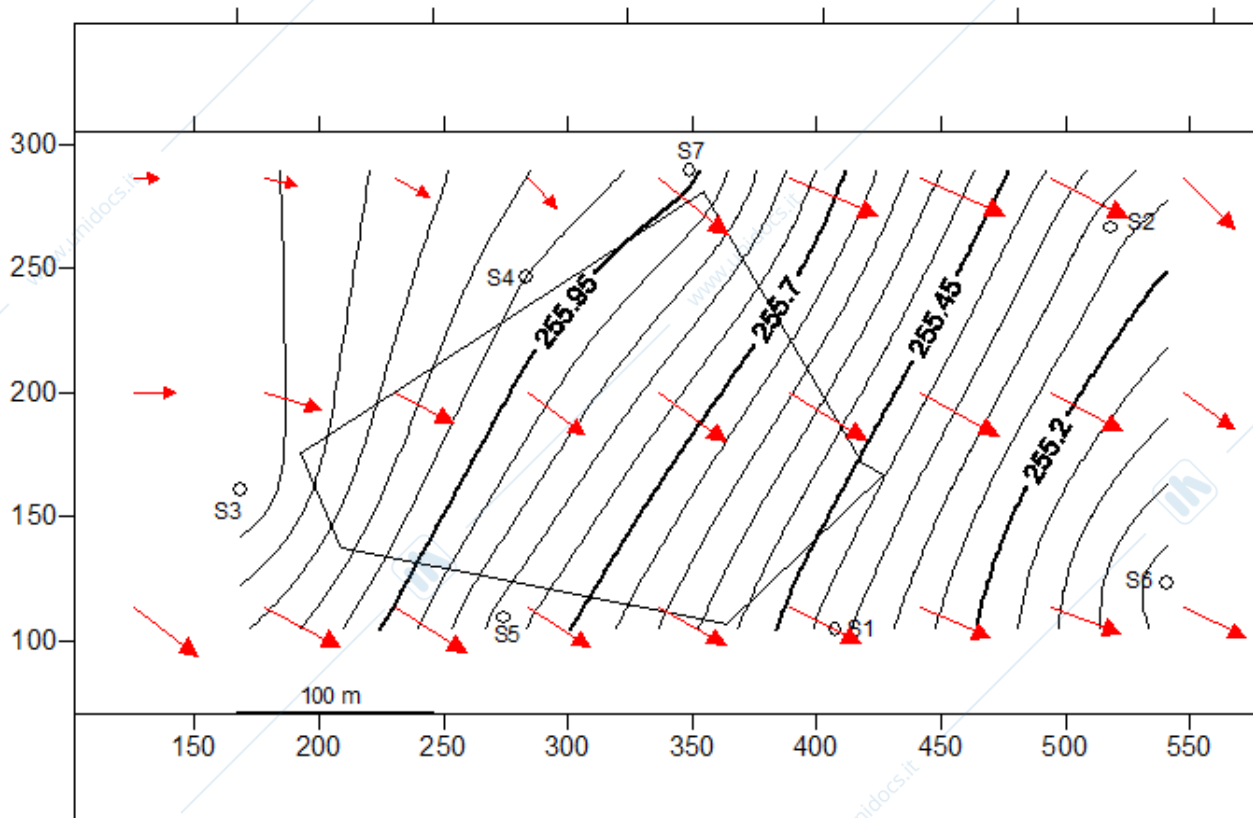


Figura 1.1.3 – Relazione tra linee di flusso e linee isopiezometriche

Lungo la direzione di flusso individuata è stato calcolato il gradiente idraulico della falda, definito dal rapporto:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Con:

- Δh : differenza di carico idraulico tra due linee equipotenziali;
- Δl : la distanza misurata perpendicolarmente alle due linee.

Il gradiente idraulico i è stato calcolato tra le isopieze rappresentate con una linea più ridotta, ottenendo valori rispettivamente pari a 0.00248, 0.00319 e 0.00314.

1.2 - Caratterizzazione dei parametri: conducibilità idraulica, portata e velocità effettiva

Nella tabella 1.2.1 vengono riportati i valori della conducibilità idraulica e dello spessore dei tre livelli sabbioso-ghiaioso-limoso che caratterizzano la stratigrafia del sito in esame.

Tabella 1.2.1 – Valori della conducibilità idraulica e dello spessore degli strati.

Strato	K	b
-	m/s	m
1	$4.2 \cdot 10^{-4}$	6
2	$1.1 \cdot 10^{-3}$	4
3	$3.5 \cdot 10^{-5}$	10

Dai dati di tabella 1.2.1 si è ricavato il valore della conducibilità idraulica equivalente orizzontale e verticale, rispettivamente $K_{eq,h}$ e $K_{eq,v}$, tramite le espressioni:

$$- K_{eq,h} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n K_i b_i = 3.64 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$- K_{eq,v} = \frac{b}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{K_i}} = 6.59 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Dove: $b = \sum_{i=1}^3 b_i$.

Per il calcolo della portata di acqua è stato necessario calcolare precedentemente la sezione di massima ampiezza che sottende la discarica, ottenuto moltiplicando la lunghezza più ampia (l_{max}) ortogonale alla direzione del flusso con lo spessore saturo dell'acquifero ($b=20m$).

La l_{max} , stimata geometricamente, risulta essere pari a 233.85 m. Di conseguenza la sezione di massima ampiezza (A_{max}) è pari a:

$$A_{max} = l_{max} \cdot b = 4677.00 \text{ m}^2$$

La figura 1.2.1 mostra, tramite la linea verde tratteggiata, la lunghezza utilizzata per il calcolo della sezione di massima ampiezza.

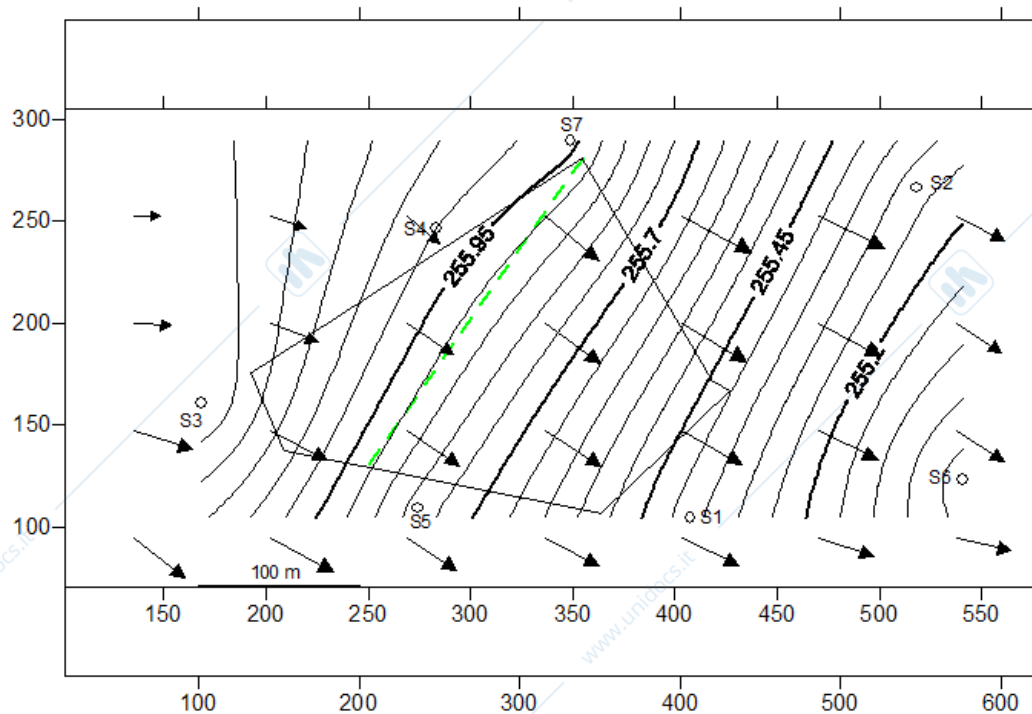


Figura 1.2.1 – Lunghezza massima ortogonale alle linee di flusso (linea verde tratteggiata)

Successivamente il valore dell'area sopra calcolato è stato inserito nell'equazione di *Darcy*, da cui si è ricavato un valore della portata di:

$$Q = K_{eq,h} A_{max} i = 4.22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Dove i rappresenta il gradiente idraulico nella zona considerata.

Conoscendo la porosità effettiva del mezzo (n_e), si ricava la velocità effettiva della portata che fluisce nella sezione di massima ampiezza come:

$$v_e = \frac{K_{eq,h} \cdot i}{n_e} = 4.10 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Dove $K_{eq,h} \cdot i$ viene anche detta velocità darcyana o apparente.

ESERCITAZIONE DI INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI

n. 2

PREVISIONE DEGLI ABBASSAMENTI INDOTTI DA POMPAGGIO IN ACQUIFERI CONFINATI

Un pozzo completato in un acquifero confinato avente trasmissività di $9.6 \cdot 10^{-4}$ m²/s e coefficiente di immagazzinamento di $2.0 \cdot 10^{-4}$ eroga una portata costante di 1.5 l/s.

Determinare, con le tabelle allegate e facendo uso dello sviluppo in serie della funzione di Theis arrestandolo al 1° (W1), 2° (W2) e 3° (W3) termine della sommatoria, gli abbassamenti indotti in corrispondenza di un ipotetico piezometro ubicato a distanza di 18 e di 50 m, dopo 5 minuti e 5 ore di pompaggio.

$$W_n(u) = -\gamma - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u^n}{n \cdot n!} \text{ dove } \gamma \text{ di Eulero è pari a } 0.577215664901532860$$

Infine, per il piezometro distante 50 m dal pozzo, confrontare e commentare i grafici dell'andamento degli abbassamenti in funzione del tempo per:

- Soluzione di Jacob (n=0);
- Soluzioni ottenute per le tre approssimazioni della soluzione di Theis di accuratezza crescente, ottenute arrestando la sommatoria al 1° (W1), 2° (W2), 3° (W3) e 4° (W4) termine.

2.1 Cenni teorici per il regime transitorio in acquifero confinato

L'equazione differenziale di flusso in un sistema radialpiano è:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Per la risoluzione si impongono le condizioni al contorno:

$$h(r, 0) = h_0$$

$$h(\infty, t) = h_0$$

La soluzione analitica che fornisce gli abbassamenti in funzione della distanza dal pozzo (r) e del tempo (t) è nota come equazione di Theis e risulta essere:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Essendo:

$$u = \frac{Sr^2}{4\pi T}$$

La funzione adimensionale $\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ è generalmente indicata come funzione di Theis $W(u)$.

I valori della funzione di Theis possono essere calcolati tramite sviluppo in serie dell'integrale esponenziale:

$$W_n(u) = -\gamma - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u^n}{nn!}$$

Per valori piccoli dell'argomento ($u < 0.02$), lo sviluppo in serie di Theis può essere arrestato ai primi due termini:

$$W(u) = -\gamma - \ln(u)$$

Di conseguenza:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln 2.25 \frac{T \cdot t}{Sr^2}$$

L'equazione approssimata di Theis così ottenuta prende il nome di equazione di Jacob.

2.2 Previsione degli abbassamenti

Utilizzando la tabella di riferimento allegata 2.2.1 si è potuto estrapolare, tramite interpolazione lineare, i valori di W_{tab} in funzione di u .

Tabella 2.2.1 – Valori numerici dell'integrale esponenziale o funzione di Theis.

N/u	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$	$N \times 10^{-6}$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
1.0	33.9616	31.6590	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8435	15.5409	13.2383	10.9357	8.6332	6.3315	4.0379	1.8229	0.2194
1.1	33.8662	31.5637	29.2611	26.9585	24.6559	22.3533	20.0507	17.7482	15.4456	13.1430	10.8404	8.5379	6.2363	3.9436	1.7371	0.1860
1.2	33.7792	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6611	15.3586	13.0560	10.7534	8.4509	6.1494	3.8576	1.6595	0.1584
1.3	33.6992	31.3966	29.0940	26.7914	24.4889	22.1863	19.8837	17.5811	15.2785	12.9759	10.6734	8.3709	6.0695	3.7795	1.5889	0.1355
1.4	33.6251	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.5070	15.2044	12.9018	10.5993	8.2968	5.9955	3.7054	1.5241	0.1162
1.5	33.5561	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.4380	15.1354	12.8328	10.5303	8.2278	5.9266	3.6374	1.4645	0.1000
1.6	33.4916	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3735	15.0709	12.7683	10.4657	8.1634	5.8621	3.5739	1.4092	0.08631
1.7	33.4309	31.1283	28.8258	26.5232	24.2206	21.9180	19.6154	17.3128	15.0103	12.7077	10.4051	8.1027	5.8016	3.5143	1.3578	0.07465
1.8	33.3738	31.0712	28.7686	26.4660	24.1634	21.8608	19.5583	17.2557	14.9531	12.6505	10.3479	8.0455	5.7446	3.4581	1.3089	0.06471
1.9	33.3197	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.2016	14.8990	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	3.4050	1.2649	0.05620
2.0	33.2684	30.9658	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.1503	14.8477	12.5451	10.2426	7.9402	5.6394	3.3547	1.2227	0.04890
2.1	33.2196	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	17.1015	14.7989	12.4964	10.1938	7.8914	5.5907	3.3069	1.1829	0.04261
2.2	33.1731	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	17.0550	14.7524	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	0.03719
2.3	33.1286	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	17.0106	14.7080	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	3.2179	1.1099	0.03250
2.4	33.0861	30.7835	28.4809	26.1783	23.8758	21.5732	19.2706	16.9680	14.6654	12.3628	10.0603	7.7579	5.4575	3.1763	1.0762	0.02844
2.5	33.0453	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.9272	14.6246	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	3.1365	1.0443	0.02491
2.6	33.0060	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1905	16.8880	14.5854	12.2828	9.9802	7.6779	5.3776	3.0983	1.0139	0.02185
2.7	32.9683	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.8502	14.5476	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	3.0615	0.9849	0.01918
2.8	32.9319	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4190	19.1164	16.8138	14.5113	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	3.0261	0.9573	0.01686
2.9	32.8968	30.5943	28.2917	25.9891	23.6865	21.3839	19.0813	16.7788	14.4762	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	2.9920	0.9309	0.01482
3.0	32.8629	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.7449	14.4423	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	0.9057	0.01305
3.1	32.8302	30.5276	28.2250	25.9224	23.6198	21.3172	19.0146	16.7121	14.4095	12.1069	9.8043	7.5020	5.2022	2.9273	0.8815	0.01149
3.2	32.7984	30.4958	28.1932	25.8907	23.5880	21.2855	18.9829	16.6803	14.3777	12.0751	9.7726	7.4703	5.1706	2.8965	0.8583	0.01013
3.3	32.7676	30.4651	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.6495	14.3470	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	2.8668	0.8361	0.008939
3.4	32.7378	30.4352	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.6197	14.3171	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	2.8379	0.8147	0.007971
3.5	32.7088	30.4062	28.1036	25.8010	23.4985	21.1959	18.8933	16.5907	14.2881	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	2.8099	0.7942	0.006970
3.6	32.6806	30.3780	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.5625	14.2599	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	2.7827	0.7745	0.006160
3.7	32.6532	30.3506	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.5351	14.2325	11.9300	9.6274	7.3252	5.0259	2.7563	0.7554	0.005448
3.8	32.6266	30.3240	28.0214	25.7188	23.4162	21.1136	18.8110	16.5085	14.2059	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	2.7306	0.7371	0.004820
3.9	32.6006	30.2980	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.4825	14.1799	11.8773	9.5748	7.2725	4.9735	2.7056	0.7194	0.004267
4.0	32.5753	30.2727	27.9701	25.6675	23.3649	21.0623	18.7598	16.4572	14.1546	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	2.6813	0.7024	0.003779
4.1	32.5506	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.4325	14.1299	11.8273	9.5248	7.2225	4.9236	2.6576	0.6859	0.003349
4.2	32.5265	30.2239	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.4084	14.1058	11.8032	9.5007	7.1985	4.8997	2.6344	0.6700	0.002969
4.3	32.5029	30.2004	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.3844	14.0823	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	2.6119	0.6546	0.002633
4.4	32.4800	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.3619	14.0593	11.7567	9.4551	7.1520	4.8533	2.5899	0.6397	0.002336
4.5	32.4575	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.3394	14.0368	11.7342	9.4317	7.1295	4.8310	2.5684	0.6253	0.002073
4.6	32.4355	30.1329	27.8303	25.5277	23.2252	20.9226	18.6200	16.3174	14.0143	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	2.5474	0.6114	0.001841
4.7	32.4140	30.1114	27.8088	25.5062	23.2037	20.9011	18.5985	16.2959	13.9933	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	2.5268	0.5979	0.001635
4.8	32.3929	30.0904	27.7878	25.4852	23.1826	20.8800	18.5774	16.2748	13.9723	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5068	0.5848	0.001453
4.9	32.3723	30.0697	27.7672	25.4646	23.1620	20.8594	18.5568	16.2542	13.9516	11.6491	9.3465	7.0444	4.7462	2.4871	0.5721	0.001291
5.0	32.3521	30.0495	27.7470	25.4444	23.1418	20.8392	18.5366	16.2340	13.9314	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	2.4679	0.5598	0.001148
5.1	32.3323	30.0297	27.7271	25.4246	23.1220	20.8194	18.5168	16.2142	13.9116	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	2.4491	0.5478	0.001021
5.2	32.3129	30.0103	27.7077	25.4051	23.1026	20.8000	18.4974	16.1948	13.8922	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	2.4306	0.5362	0.0009086
5.3	32.2939	29.9913	27.6887	25.3861	23.0835	20.7809	18.4783	16.1758	13.8732	11.5706	9.2681	6.9659	4.6681	2.4126	0.5250	0.0008086

Tabella 2.2.1 – cont.

5.4	32.2752	29.9726	27.6700	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	16.1571	13.8545	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	2.3948	0.5140	0.0007198
5.5	32.2568	29.9542	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	16.1387	13.8361	11.5336	9.2310	6.9289	4.6313	2.3775	0.5034	0.0006409
5.6	32.2388	29.9362	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	16.1207	13.8181	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	2.3604	0.4930	0.0005708
5.7	32.2211	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	16.1030	13.8004	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	0.4830	0.0005085
5.8	32.2037	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	16.0856	13.7830	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	2.3273	0.4732	0.0004532
5.9	32.1866	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	16.0685	13.7659	11.4633	9.1608	6.8588	4.5615	2.3111	0.4637	0.0004039
6.0	32.1698	29.8672	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	16.0517	13.7491	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	2.2953	0.4544	0.0003601
6.1	32.1533	29.8507	27.5481	25.2455	22.9429	20.6403	18.3378	16.0352	13.7326	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	2.2797	0.4454	0.0003211
6.2	32.1370	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	16.0189	13.7163	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	2.2645	0.4366	0.0002864
6.3	32.1210	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	16.0029	13.7003	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	2.2494	0.4280	0.0002555
6.4	32.1053	29.8027	27.5001	25.1975	22.8949	20.5923	18.2898	15.9872	13.6846	11.3820	9.0795	6.7775	4.4806	2.2346	0.4197	0.0002279
6.5	32.0898	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.9717	13.6691	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	2.2201	0.4115	0.0002034
6.6	32.0745	29.7719	27.4693	25.1667	22.8641	20.5616	18.2590	15.9564	13.6538	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2058	0.4036	0.0001816
6.7	32.0595	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.9414	13.6388	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	2.1917	0.3959	0.0001621
6.8	32.0446	29.7421	27.4395	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.9265	13.6240	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	2.1779	0.3883	

La tabella 2.2.2 contiene i valori di W_{tab} , di W_0 (ricavato tramite approssimazione di Jacob) e i valori W_1 , W_2 , W_3 (ottenuti tramite lo sviluppo in serie di Theis arrestato al primo, secondo e terzo termine).

Nella tabella 2.2.3 è riportata invece la stima degli abbassamenti calcolati con le equazioni precedentemente descritte nel paragrafo 2.1, rispettivamente a una distanza dal pozzo pari a 18 m e 50 m e dopo 5 minuti (300 s) e 5 ore (18000 s) di pompaggio.

Tabella 2.2.2 – Valori di u e della funzione di Thies relativi a piezometri distanti 18 e 50m dal pozzo, dopo 5 minuti e 5 ore di pompaggio

r (m)	18		50	
t (s)	300	18000	300	18000
U	0.0563	0.000938	0.434	0.00723
W0 (Jacob)	2.301	6.395	0.257	4.352
W1	2.357	6.396	0.691	4.359
W2	2.356	6.396	0.644	4.359
W3	2.356	6.396	0.649	4.359
W,tab	2.356	6.078	0.649	4.030

Tabella 2.2.3 – Stima degli abbassamenti in corrispondenza di piezometri posti a 18 e 50 metri dal pozzo, dopo 5 minuti e 5 ore di pompaggio.

r (m)	18		50	
t (s)	300	18000	300	18000
s1 (Jacob)	0.286	0.795	0.032	0.541
s2	0.293	0.795	0.086	0.542
s3	0.293	0.795	0.080	0.542
s4	0.293	0.795	0.081	0.542
s,tab	0.293	0.756	0.081	0.501

Osservando i risultati ottenuti, si nota come, dopo 5 ore, gli abbassamenti stimati con i valori tabulati della funzione di Theis si scostano maggiormente dagli abbassamenti stimati con lo sviluppo in serie dell'integrale esponenziale. Al contrario, gli abbassamenti ricavati con l'equazione di Jacob a $t = 5$ ore meglio approssimano gli abbassamenti stimati con lo sviluppo in serie della funzione di Theis. Se ne deduce quindi che l'influenza dei termini di ordine superiore diventa sempre meno significativa all'aumentare del tempo.

2.3 Interpretazione prova di pompaggio con metodo di Jacob

È stata considerata una prova di pompaggio multipozzo eseguita da Walton il 2 Luglio 1953 nei pressi di Gridley, in Illinois. L'acquifero esaminato è confinato, con spessore saturo di 5.49 m ed è costituito da sabbia grossolana e ghiaia.

Il pompaggio è stato realizzato per 8 ore, emulando una portata costante di $0.0139 \text{ m}^3/\text{s}$.

In un piezometro di osservazione posto a 251.15 m dal pozzo sono stati misurati gli abbassamenti nel tempo al fine di calcolare i parametri idrodinamici T e S del sistema acquifero.

Tramite la costruzione del diagramma diagnostico si è verificata la tipologia idraulica dell'acquifero.

Tabella 2.3.1 – abbassamenti in funzione del tempo.

time(s)	log time	drawdown(m)
180	2.255273	0.09144
300	2.477121	0.21336
480	2.681241	0.39624
720	2.857332	0.64008
1200	3.079181	0.97536
1440	3.158362	1.09728
1800	3.255273	1.24968
2280	3.357935	1.43256
2820	3.450249	1.55448
3000	3.477121	1.61544
3600	3.556303	1.73736
4200	3.623249	1.85928
4800	3.681241	1.92024
5400	3.732394	2.04216
6000	3.778151	2.1336
7800	3.892095	2.286
9600	3.982271	2.52984
12000	4.079181	2.5908
15600	4.193125	2.80416
19200	4.283301	2.95656
22800	4.357935	3.10896
30000	4.477121	3.32232

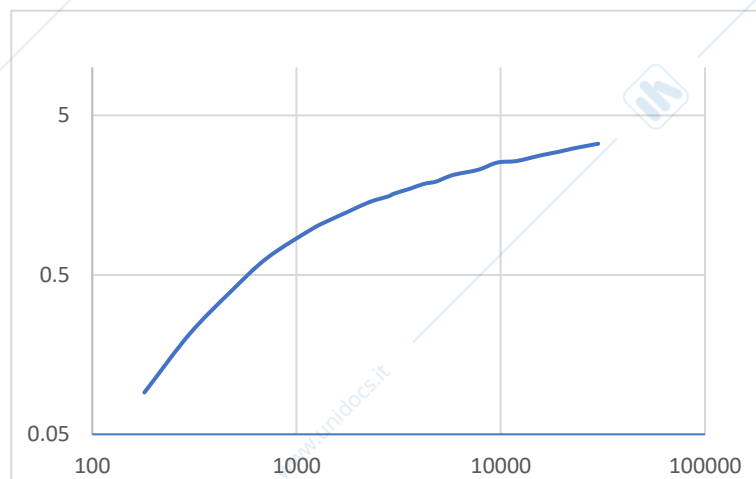


Figura 2.3.1 – diagramma diagnostico.

Dall'analisi del diagramma diagnostico si può ritenere l'acquifero in questione confinato, come dimostrano l'assenza di punti di flesso e di asintoti orizzontali.

In base a quanto dimostrato, si può procedere con la caratterizzazione dell'acquifero tramite il metodo semplificato di Jacob che si basa sull'approssimazione logaritmica di Theis. L'equazione di Jacob risulta essere:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \ln 2.25 \cdot \frac{tT}{Sr^2} \quad (\text{m})$$

Dove:

- S: coefficiente di immagazzinamento;
- T: trasmissività dell'acquifero (m^2/s);
- r: distanza tra il pozzo e il piezometro (m).

Per la stima dei parametri è stato utilizzato un grafico bilogarithmico in cui sono stati plottati gli abbassamenti in funzione del tempo. Tramite l'interpolazione dei punti di tale grafico si ottiene una retta di regressione che permette di stimare:

- Δs : l'abbassamento corrispondente alla variazione di un ciclo logaritmico
- m: intercetta sull'asse delle y;
- intercetta sull'asse delle x = $\frac{\text{intercetta y}}{\Delta s}$ (s);
- tempo relativo all'intercetta sull'asse delle x: $t_0 = 10^{\text{intercetta x}}$ (s);
- trasmissività: $T = 0.183 \cdot \frac{Q}{\Delta s}$ (m^2/s);
- coefficiente di immagazzinamento: $S = 2.25 \cdot \frac{T \cdot t_0}{r^2}$;
- t_{jacob} (s).

Il processo è stato reiterato fino a quando si è ottenuto: $t < t_{\text{jacob}}$, dove:

$$t_{\text{jacob}} = \frac{12.5 \cdot S \cdot r^2}{T} \quad (\text{s})$$

Tale condizione si è verificata alla quarta iterazione, come si osserva in tabella 2.3.2.

Tabella 2.3.2 – Determinazione di S e T con il metodo di Jacob.

t	log t	m	Ds	T (m^2/s)	S	t0 (s)	t_{jacob}
720	2.857	1.661	2.691	9.45E-04	1.06E-05	315.79	8881.59
1800	3.255	1.687	2.062	1.23E-03	1.46E-05	332.52	9351.99
6000	3.778	1.689	1.180	2.15E-03	2.56E-05	332.61	9354.70
9600	3.982	1.665	0.824	3.09E-03	3.45E-05	312.77	8796.63

I valori dei parametri idrodinamici ricavati sono $T = 3.09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 3.45 \cdot 10^{-5}$.

In figura vengono riportate le 4 iterazioni per via grafica.

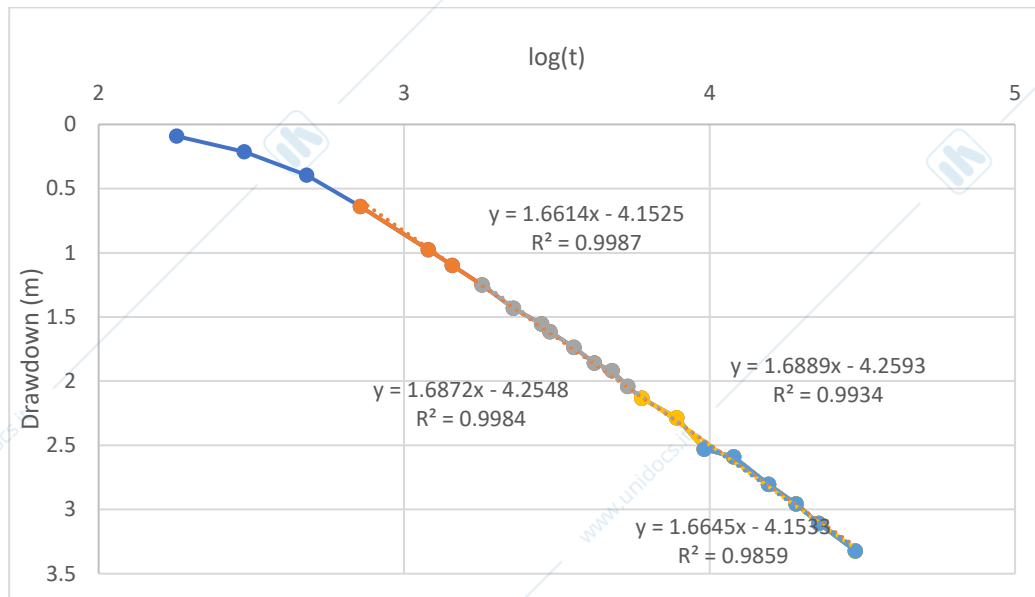


Figura 2.3.2 – Linearizzazione di Jacob.

2.4 Interpretazione tramite Aqtesolv

Lo studio dell'acquifero è stata reinterpretato tramite il software Aqtesolv, attraverso una prova multipozzo

I dati di input inseriti nel software sono:

- raggio e profondità del pozzo;
- portata emunta;
- distanza del piezometro dal pozzo;
- abbassamenti nel piezometro in funzione del tempo.

La prova è stata elaborata tramite due soluzioni:

Theis:

i dati vengono automaticamente elaborati dal software e l'interpolazione è realizzata manualmente adattando la curva di fitting ai dati sperimentali.

La curva ottenuta è riportata in Figura 2.3.1

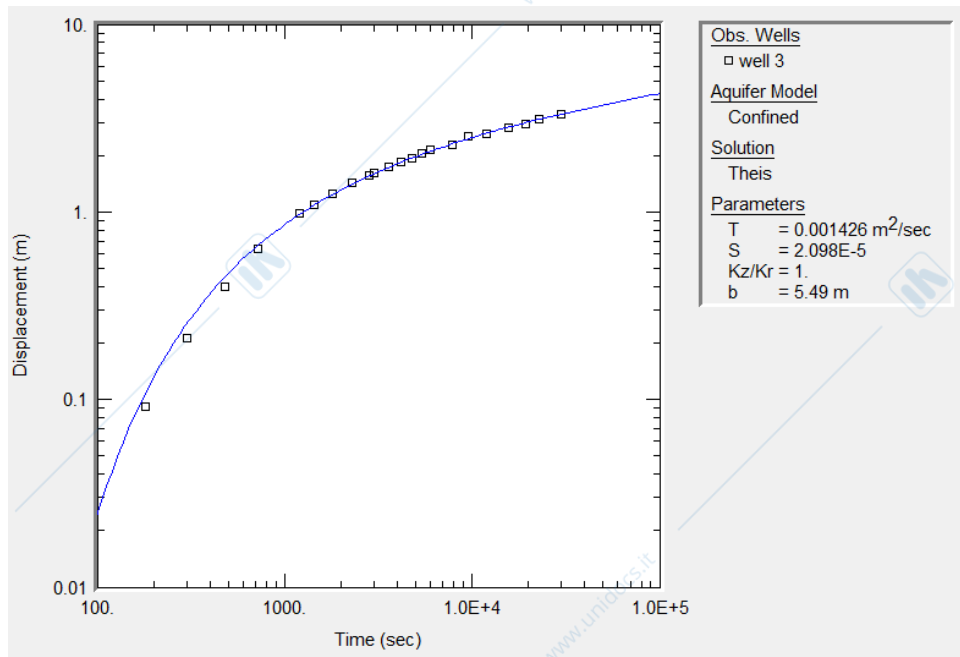


Figura 2.4.1 – Soluzione di Theis tramite Aqtesolv.

I parametri idrodinamici ottenuti risultano essere $T = 1.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 2.10 \times 10^{-5}$.

Cooper-Jacob

L'iter seguito è analogo a quello per Theis.

I risultati sono riportati in Figura 2.3.2.

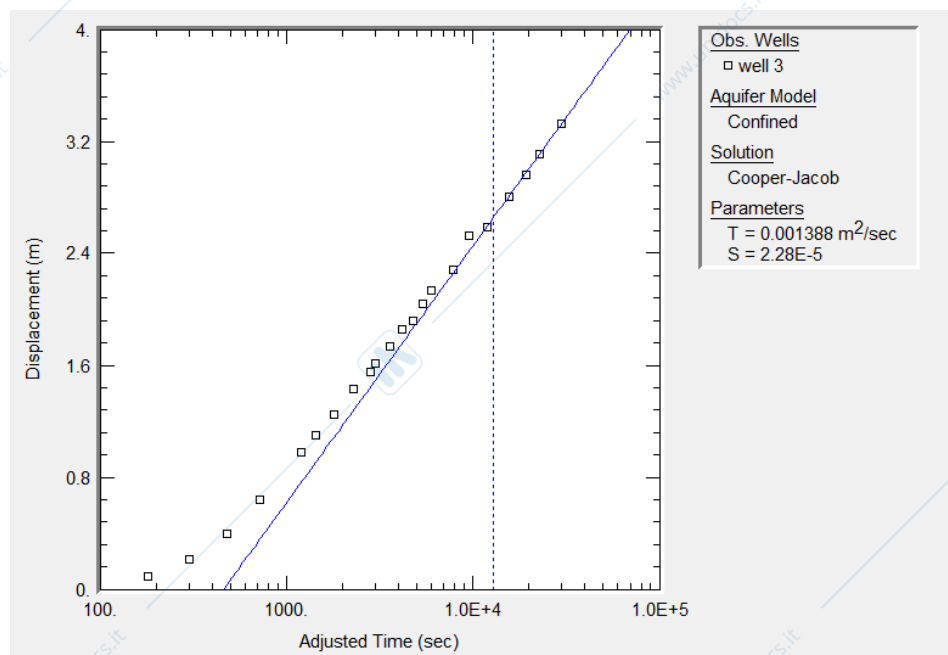


Figura 2.4.2 – Soluzione di Cooper-Jacob tramite Aqtesolv.

I parametri idrodinamici calcolati sono $T = 1.39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 2.28 \cdot 10^{-5}$.

La linea tratteggiata verticale rappresenta il valore di t_{Jacob} cioè il tempo oltre il quale la soluzione di Cooper-Jacob può considerarsi valida.

Si nota come solo una ristretta regione soddisfa la soluzione di Cooper Jacob, essendo t_{Jacob} ricavato piuttosto elevato.

ESERCITAZIONE DI INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI

n. 3

INTERPRETAZIONE DI UNA PROVA DI FALDA E DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI IDRODINAMICI MEDIANTE AQTESOLV

A causa del deterioramento di uno dei pozzi utilizzati per l'approvvigionamento idrico di un centro abitato in provincia di Cuneo, è stato realizzato un nuovo pozzo, denominato W11, completato in un acquifero di spessore saturo di 25 m secondo la geometria riportata in Figura 1. Il pozzo ha un diametro pari a 70 cm, mentre la tubazione di mandata della pompa ha un raggio di 25 mm.

Al termine della realizzazione e sviluppo di W11 è stata realizzata una prova di falda, durante la quale stata emunta una portata costante pari a 4.5 l/s per una durata complessiva di circa 27 ore. Gli abbassamenti sono stati registrati in continuo in Pz2 (posto ad una distanza di 26 m dal pozzo in erogazione) e sono riportati nel file dati_exp.txt.

Utilizzando i dati forniti:

1. si determinino, seguendo una corretta sequenza procedurale, i parametri idrodinamici del sistema acquifero applicando il metodo approssimato di Jacob in EXCEL;
2. si interpreti la prova utilizzando il software AQTESOLV;
3. si reinterpreti la prova di falda tenendo conto delle possibili deviazioni dal comportamento ideale e si valutino le eventuali discrepanze tra i valori ottenuti utilizzando metodi diversi.

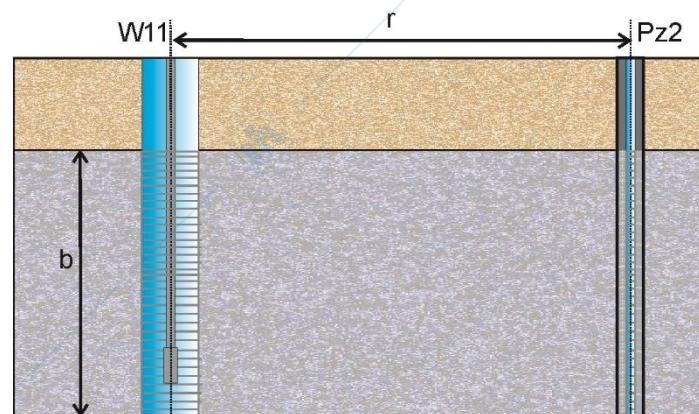


Figura 1: Schema di completamento del pozzo W11 e del piezometro Pz2

3.1 Soluzione di Jacob

La figura 3.1.1 descrive il diagramma diagnostico che riporta, in scala bilogarithmica, gli abbassamenti del livello piezometrico al variare del tempo.

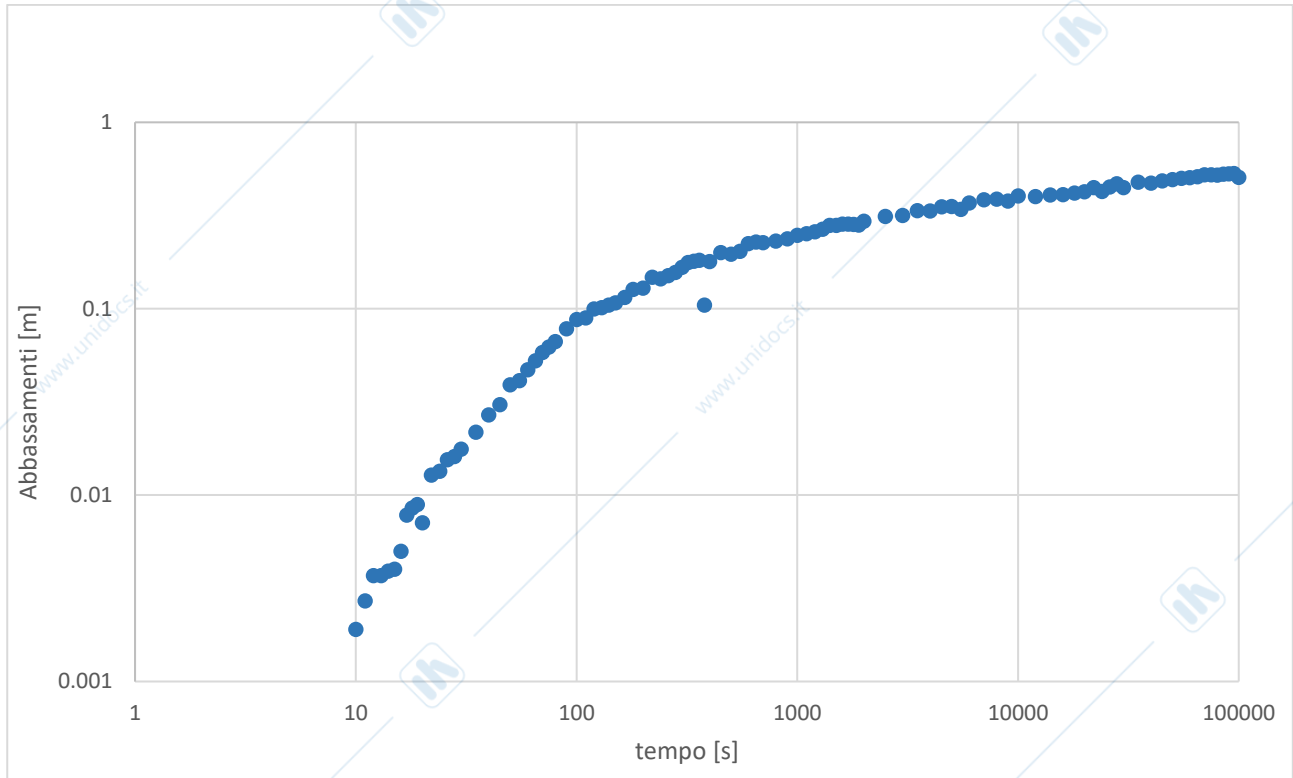


Figura 3.1.1- Diagramma diagnostico.

Come si può notare, la funzione descritta dal diagramma diagnostico è monotona crescente. Se ne deduce, quindi, che l'acquifero che si sta trattando è confinato.

In base a tale deduzione, si può ritenere valido il metodo approssimato di Jacob per la caratterizzazione dell'acquifero, il quale consente di stimare i parametri attraverso un diagramma semilogarithmico in cui viene effettuata una linearizzazione dei dati sperimentali.

Attraverso la interpolazione di questi dati si è definita la retta di regressione dalla quale è stata possibile ottenere:

- Δs : abbassamento corrispondente ad un ciclo logaritmico
- intercetta sull'asse delle y (m)
- intercetta sull'asse delle x = $\frac{\text{intercetta y}}{\Delta s}$ (s)
- tempo relativo all'intercetta sull'asse delle x: $t_0 = 10^{\text{intercetta x}}$ (s)
- trasmissività: $T = 0.183 * \frac{Q}{\Delta s}$ (m²/s)

- coefficiente di immagazzinamento: $S = 2.25 * \frac{T * t_0}{r^2}$
- $t_{\text{Jacob}} = \frac{12.5 \cdot S \cdot r^2}{T}$ (s)

Il processo viene poi reiterato fino a quando risulta verificata la disuguaglianza:

$$t \geq 12,5 \frac{Sr^2}{T}$$

Di seguito sono riportate le tabelle e i grafici relativi a ciascuna iterazione:

- **Prima iterazione**

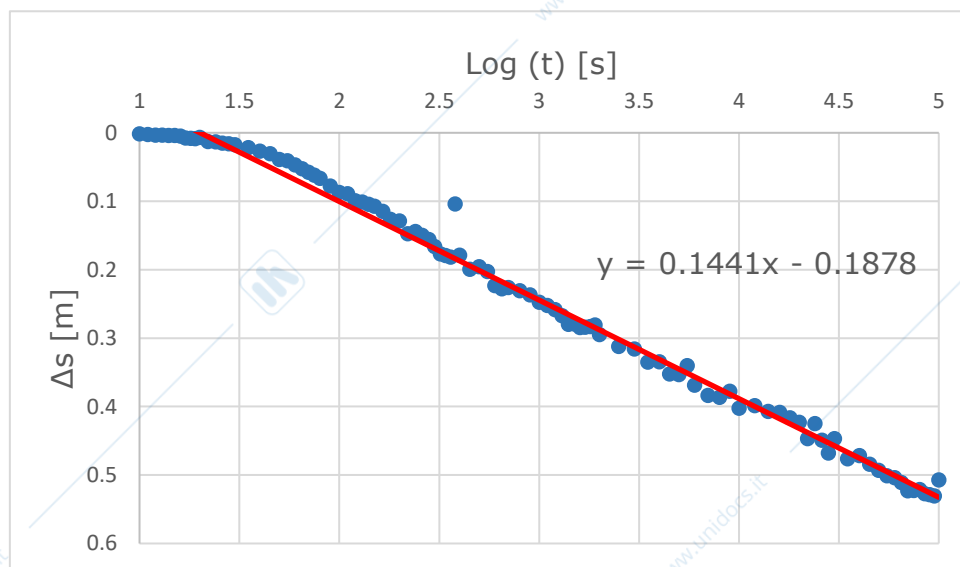


Figura 3.1.2 – Linearizzazione di Jacob (prima iterazione)

Tabella 3.1.1 -Determinazione dei parametri idrodinamici con il metodo di Jacob (prima iterazione).

t [s]	Pendenza	Intercetta	T [m ² /s]	S [-]	t _{verifica}	Verificato
10	0.1441	-0.1878	$5.716 \cdot 10^{-3}$	$3.827 \cdot 10^{-4}$	565.76	no

- **Seconda iterazione**

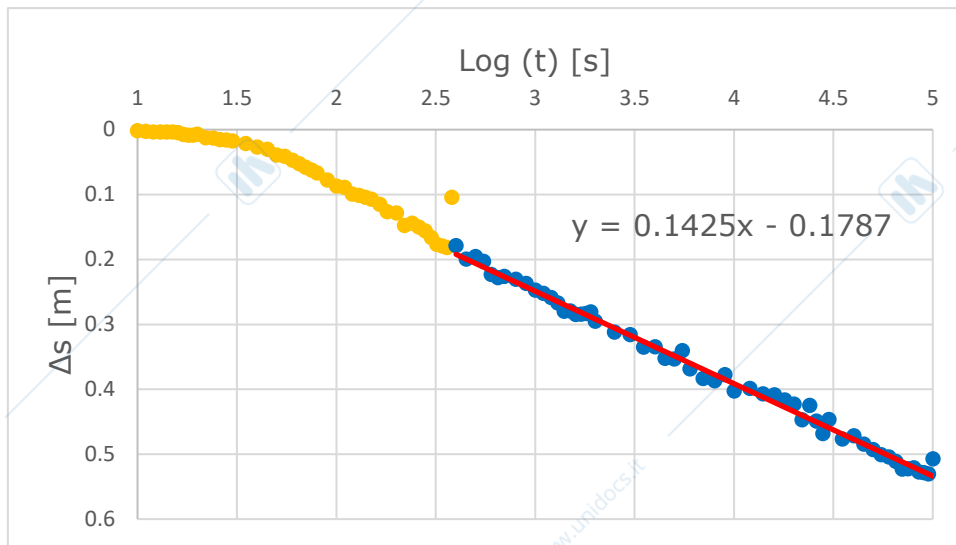


Figura 3.1.3 – Linearizzazione di Jacob (seconda iterazione).

Tabella 3.1.2 -Determinazione dei parametri idrodinamici con il metodo di Jacob (seconda iterazione).

t [s]	Pendenza	Intercetta	T [m ² /s]	S [-]	t _{verifica}	Verificato
400	0.1425	-0.1787	$5.779 \cdot 10^{-3}$	$3.453 \cdot 10^{-4}$	504.91	No

- **Terza iterazione**

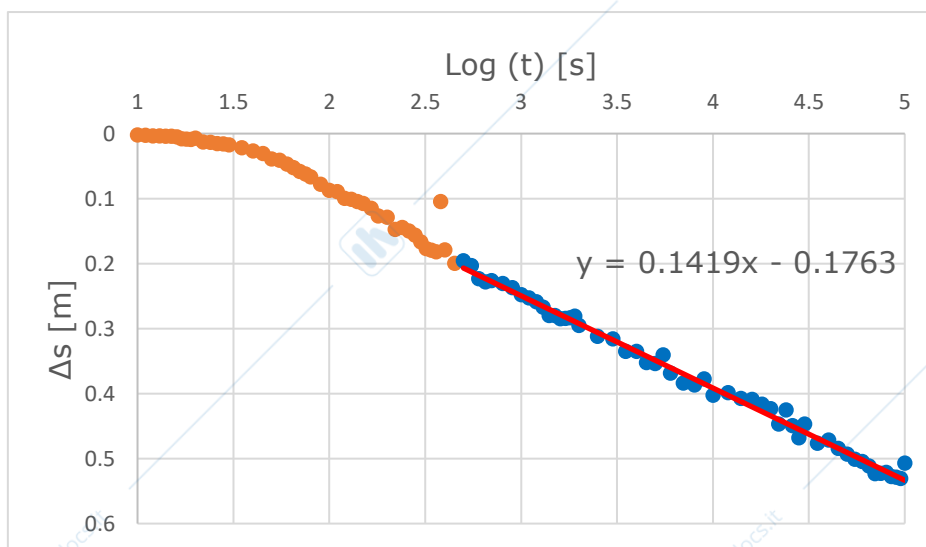


Figura 3.1.4 – Linearizzazione di Jacob (terza iterazione).

Tabella 3.1.3 -Determinazione dei parametri idrodinamici con il metodo di Jacob (terza iterazione).

t [s]	Pendenza	Intercetta	T [m ² /s]	S [-]	t _{verifica}	Verificato
500	0.1419	-0.1763	$5.802 \cdot 10^{-3}$	$3.371 \cdot 10^{-4}$	490.91	sì

L'approssimazione di Jacob può essere utilizzata a partire da un t_0 pari a 500 s. I valori di T e S corrispondenti a tale tempo sono riportati in tabella 3.1.3.

3.2 Interpretazione attraverso Aqtesolv

L'utilizzo del software permette di caratterizzare l'acquifero attraverso la soluzione di Theis. A tal fine vengono forniti come input gli abbassamenti registrati in pozzo e le caratteristiche geometriche. Grazie alla linearizzazione automatica eseguita dal software si perviene alla figura 3.2.1.

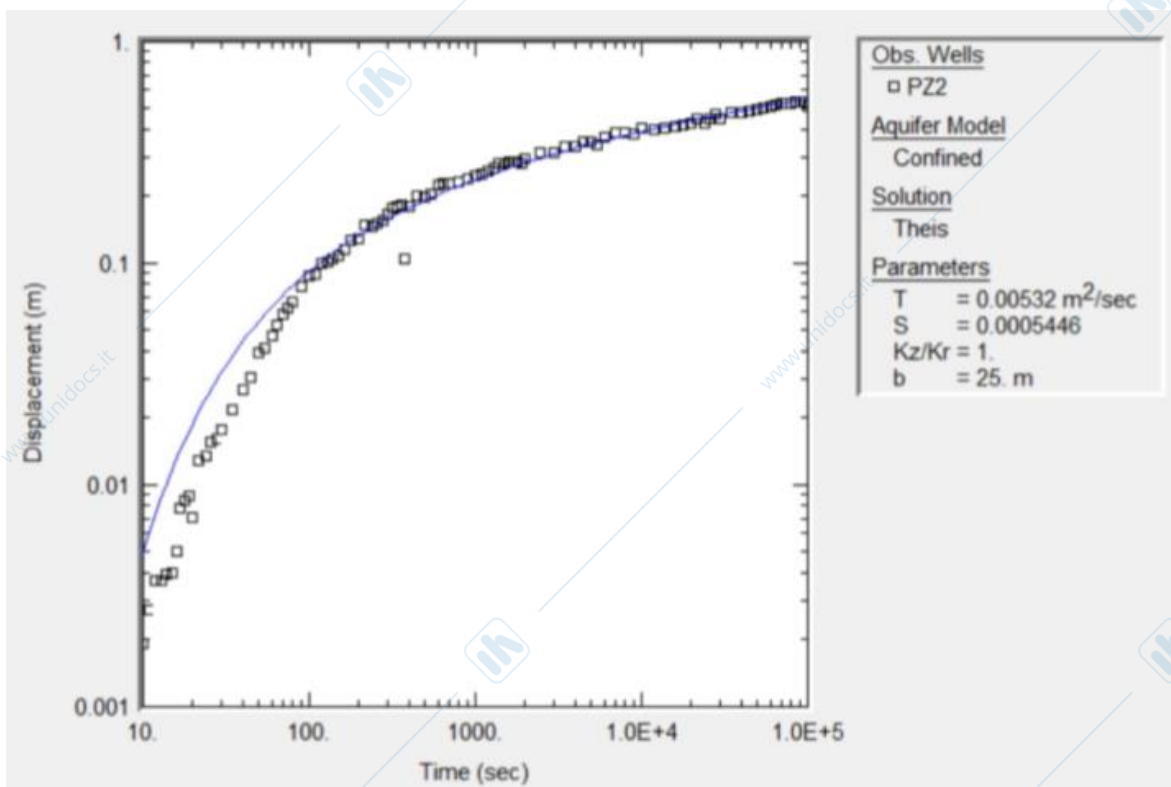


Figura 3.2.1 – Soluzione di Theis tramite Aqtesolv.

Come si può notare, i valori di T e S ottenuti attraverso l'uso di Aqtesolv si discostano in maniera piuttosto considerevole rispetto a quelli ricavati con il metodo di Jacob descritti nel paragrafo precedente. La spiegazione di tale discrepanza è legata alla presenza di fattori di deviazione che, se non valutati correttamente, possono inficiare la prova.

3.3 Deviazione dal comportamento reale

Per tenere conto dei fattori di disturbo è necessario una reinterpretazione della prova in modo da potere valutare le variazioni dal comportamento ideale, su cui si basa la soluzione analitica di Theis. Vengono in seguito descritti brevemente i principali elementi che possono influenzare la caratterizzazione dell'acquifero.

- **Raggio di pozzo finito:**

affinché possa considerarsi valida l'ipotesi di raggio infinitesimo, è necessario che la distanza del piezometro dal pozzo sia almeno maggiore di venti volte il raggio del pozzo stesso. Nel caso in questione questa condizione è verificata, essendo il raggio 37 cm e il piezometro distante 15m.

- **Volume di pozzo finito:**

nelle situazioni reali, quando si mette in pompaggio il pozzo, in un primo momento l'acqua che viene emunta sarà quella contenuta all'interno del volume stesso (effetto di immagazzinamento).

Per tenere conto di tale fenomeno si introduce un coefficiente definito come:

$$C_w = \pi(r_w^2 - r_p^2) = 0.38 \text{ m}^2$$

Dove r_p risulta essere il raggio della tubazione di mandata della pompa.

L'effetto di immagazzinamento può essere trascurato per $t > \frac{25C_w}{\pi T}$. Inserendo in tale disuguaglianza la T ricavata dalla soluzione di Theis, si può affermare che, superato un tempo di 573 secondi, non ha influenze determinanti nell'interpretazione della prova.

- **Pozzo incompleto:**

siccome nel caso in esame la penetrazione del pozzo è completa, allora non è necessario applicare correzioni.

in figura 3.3.1 viene rappresentata la soluzione di Papadopoulos – Cooper fornita da Aqtesolv, che prende in considerazione l'effetto di immagazzinamento.

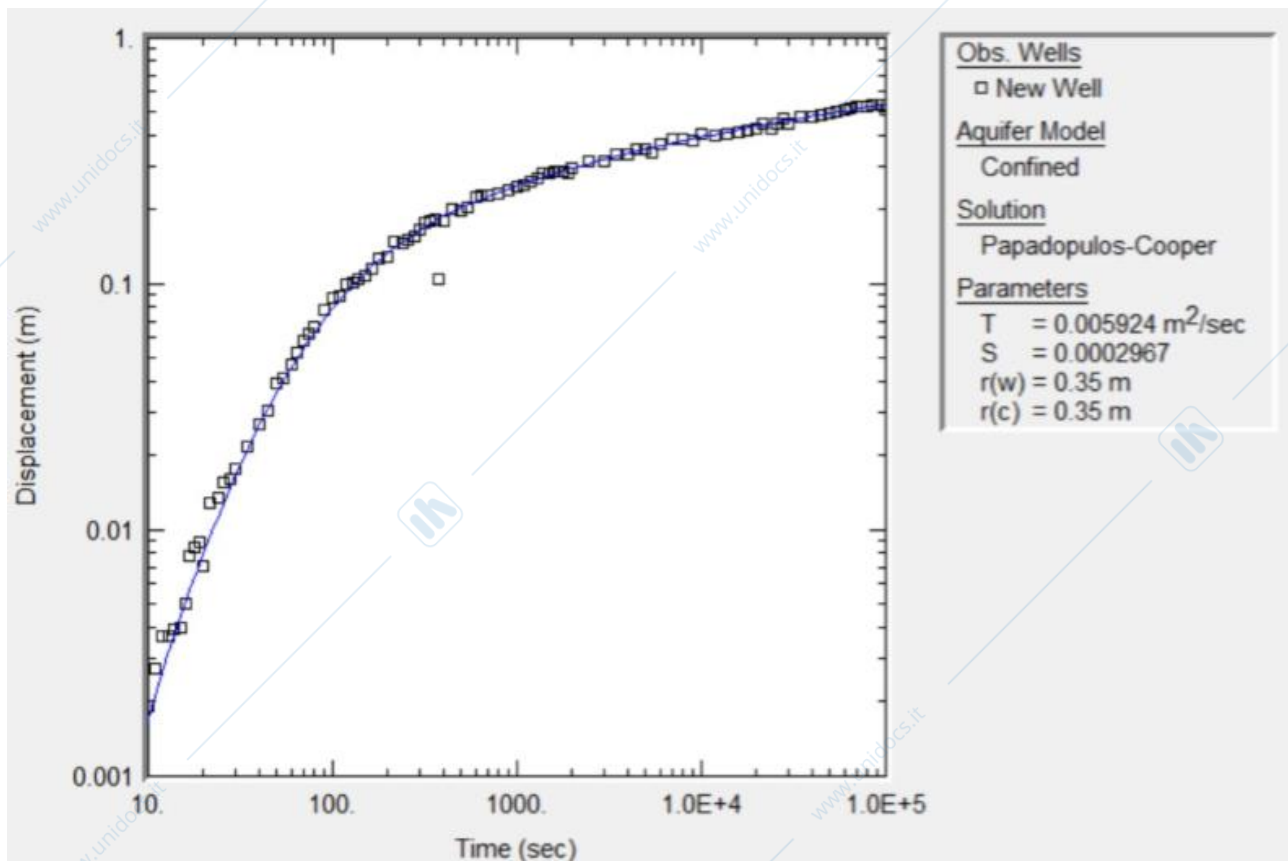


Figura 3.3.1 – Soluzione di Papadopoulos – Cooper tramite Aqtesolv.

Esercitazione di Ingegneria degli Acquiferi

n. 4

OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI APPROVVIGIONAMENTO IDRICO

Un nuovo pozzo, denominato W2, è stato realizzato per l'approvvigionamento idrico del centro abitato di Brucoli (Siracusa). Il pozzo è fenestrato in corrispondenza di un acquifero confinato di spessore saturo pari a 30 m e trasmissività $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. La geometria di completamento del pozzo è riportata in Figura 1 ($a = 4.5 \text{ m}$; $L = 12 \text{ m}$; $r_w = 25 \text{ cm}$).

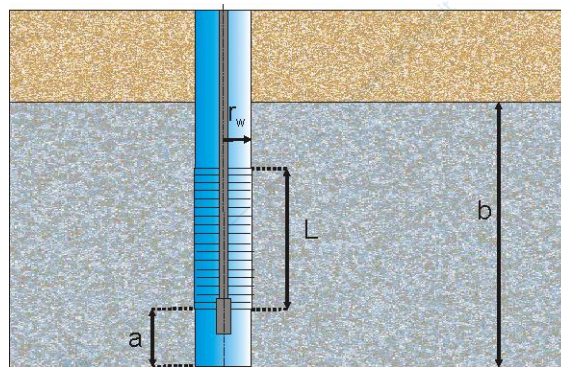


Figura 2: Schema di completamento del pozzo W2.

Dopo la fase di spurgo è stata effettuata una prova a gradini di portata che ha fornito i seguenti risultati:

Q (l/s)	s_m (m)
10.1	0.22
35.4	0.99
45.4	1.42
56.5	1.92

Ipotizzando che non vi sia danneggiamento di permeabilità, si determinino:

- l'equazione caratteristica dell'opera di captazione e la curva di efficienza idraulica;
- la valutazione del pozzo sulla base del criterio empirico di Walton.

Il sistema di approvvigionamento idrico alimentato da W2 è così costituito:

- sottosistema pozzo-acquifero, come definito dalla prova a gradini di portata;
- sottosistema condotta di adduzione:
 - tubazione rettilinea (lunghezza=1500 m, coeff. di scabrezza $2m = 0.35$)
 - 2 saracinesche

1 valvola di ritegno a clapet

1 valvola di fondo della pompa ($B_t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $C_m = 0.015 \text{ m}$)

- sottosistema serbatoio di stoccaggio: $\Delta H = 60 \text{ m}$

Sapendo che il sistema idrico deve essere in grado di assicurare una portata compresa tra 45 e 55 l/s si richiede di:

- dimensionare la tubazione di adduzione così da garantire una velocità di flusso compresa tra 0.5 e 2 m/s, per limitare sedimentazione di materiale sospeso e colpi d'ariete;
- individuare il sistema di pompaggio idoneo al funzionamento del sistema.
- Si riportano in allegato le schede tecniche dei sistemi di pompaggio disponibili.

4.1 Equazione caratteristica del pozzo

L'abbassamento stabilizzato del livello idrico, misurabile nel pozzo per effetto dell'erogazione di una portata costante, è fornito dalla relazione empirica di Rorabaugh come:

$$s_m = BQ + CQ^n$$

Attraverso questa equazione, comunemente chiamata *equazione caratteristica del pozzo*, si può prevedere quale sarà l'abbassamento indotto da un certo valore di portata o quale portata corrisponde ad un valore prefissato di abbassamento.

Il termine lineare dell'equazione di Rorabaugh esprime le perdite di carico complessive dovute alle componenti di flusso laminare e può essere scomposto nelle seguenti componenti:

- B_1Q : rappresenta le perdite di carico per il flusso nell'acquifero;
- B_2Q : rappresenta le perdite di carico dovute all'eventuale parziale penetrazione e/o parziale completamento del pozzo ($B_2=0$ per pozzi completi);
- B_3Q : esprime le perdite di carico dovute all'eventuale presenza nell'intorno del pozzo di una zona a permeabilità diversa rispetto a quella media dell'acquifero ($B_3=0$ in formazioni perfettamente omogenee).

Il termine esponenziale CQ^n rappresenta invece le perdite di carico ascrivibili alla componente turbolenta del flusso che si crea per passaggio dell'acqua attraverso i tratti finestrati e all'interno del pozzo.

4.2 Interpretazione della prova di pozzo

La figura 4.2.1 rappresenta la curva caratteristica del pozzo ed esprime la relazione tra portata e perdite di carico.

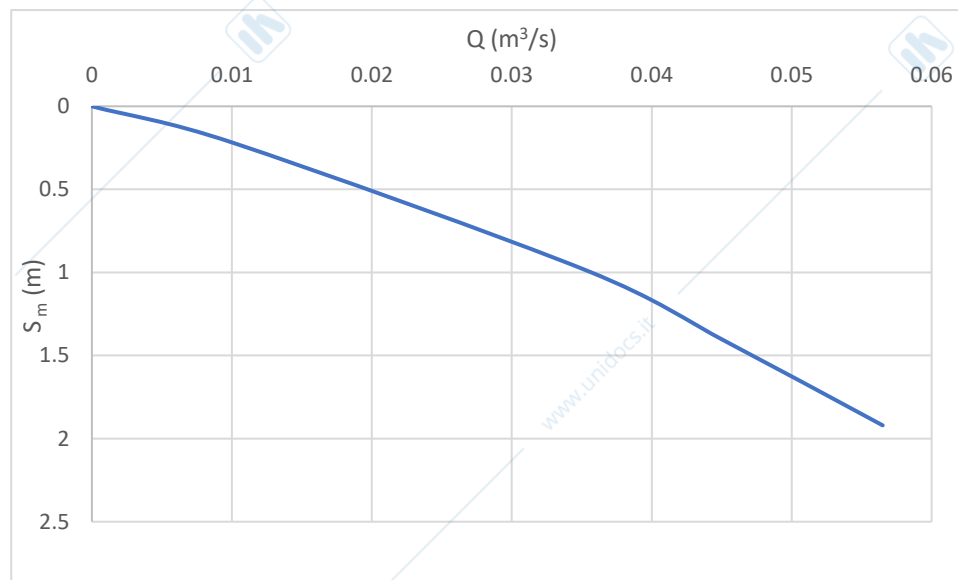


Figura 4.2.1 – curva caratteristica del pozzo.

L'interpretazione della prova di pozzo consiste nel determinare sperimentalmente i parametri B , C e n che compaiono nella equazione di Rorabaugh.

In particolare, considerando il caso di $n=2$, l'equazione di Rorabaugh coincide con quella di Jacob:

$$s_m = BQ + CQ^2$$

E dividendo entrambi i membri per Q :

$$\frac{s_m}{Q} = B + CQ$$

Riportando su un diagramma cartesiano l'andamento di Q e s_m/Q (fig. 4.2.2) si ottiene una spezzata che può essere linearizzata con buona approssimazione (si può ritenere valida l'equazione di Jacob). Da tale linee di tendenza sono ricavati i valori di B e di C rispettivamente come intercetta e coefficiente angolare.

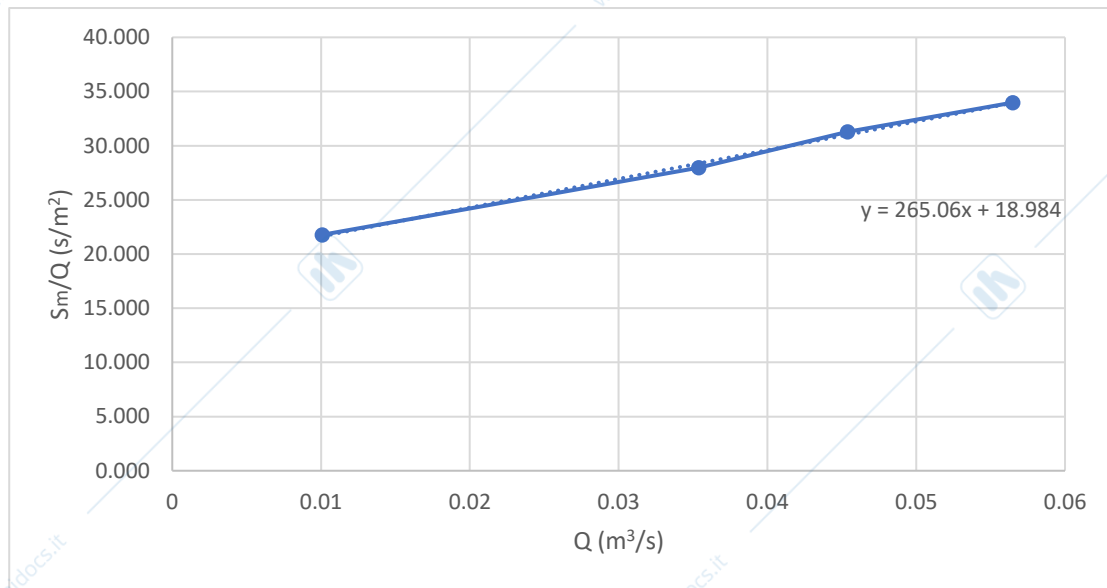


Figura 4.2.2 – Determinazione dei parametri relativi all'equazione caratteristica di un pozzo, nell'ipotesi di validità dell'equazione di Jacob ($n=2$).

Nel caso in esame i parametri risultano essere:

- $B = 18.984 \frac{s^2}{m}$;
- $C = 265.06 s^2/m^5$.

Il criterio di Walton permette di valutare la corretta esecuzione del pozzo per quanto riguarda le finestrate e il ruolo delle perdite di carico per i flussi turbolenti. Tale criterio, che si basa sul valore del parametro C , può essere considerato valido per opere di captazione completate negli acquiferi permeabili per porosità.

Nella tabella 4.2.1 viene riportato il criterio di valutazione di Walton.

Tabella 4.2.1 – Criterio di Walton per la valutazione delle caratteristiche di efficienza del pozzo.

C (s ² /m ²)	Valutazione
$C < 1900$	buon pozzo, ben sviluppato
$1900 < C < 3800$	pozzo mediocre
$3800 < C < 15200$	pozzo intasato o deteriorato
$C > 15200$	pozzo irrecuperabile

Avendo precedentemente stimato C pari a $265.06 s^2/m^5$, attraverso il criterio di Walton si può definire il pozzo in esame come 'ben sviluppato'.

Il coefficiente C viene spesso utilizzato per valutare l'efficienza di un pozzo dopo un certo tempo dalla sua messa in opera. Nel caso in esame, avendo un pozzo di nuova realizzazione, difficilmente si sarebbe stimato un valore di C tale da evidenziare un intasamento o danneggiamento del pozzo stesso. In generale, non si può quindi aprioristicamente affermare che ad un basso valore di C corrisponda sempre un pozzo ben realizzato. Esso potrebbe essere infatti affetto da una errata geometria o la permeabilità nel suo intorno potrebbe essere danneggiata.

A tal fine risulta indispensabile procedere con calcolo dell'efficienza idraulica del pozzo.

4.3 Efficienza idraulica del pozzo

L'efficienza idraulica del pozzo è definita come il rapporto tra la portata specifica misurata in un pozzo in condizione di stabilizzazione e la portata specifica che il pozzo avrebbe fornito se avesse avuto comportamento ideale (a parità di condizioni). Ne deriva la relazione:

$$E = \frac{B_1 Q}{BQ + CQ^n} \cdot 100$$

Si può osservare come l'efficienza idraulica diminuisca all'aumentare della portata, per effetto del conseguente aumento delle perdite di carico dovuto all'incremento del flusso turbolento.

Essendo $B_1 = B - B_2 - B_3$, per il calcolo di E è necessaria preliminarmente la conoscenza dei termini B_2 e B_3 .

Nell'ipotesi di assenza di danneggiamento della permeabilità nell'intorno del pozzo, il valore di B_3 può essere assunto pari a 0; mentre la valutazione di B_2 è effettuata tramite la formula proposta da TNO:

$$B_2 = \frac{1}{2\pi T} \frac{1 - \delta}{\delta} \left[\ln \frac{4b}{r_w} - F(\delta, \varepsilon) \right]$$

Dove:

- $\delta = \frac{L}{b}$: rappresenta la lunghezza relativa del tratto finestrato;
- $\varepsilon = \left| \frac{2a+L-b}{2b} \right|$: rappresenta l'eccentricità del tratto;
- $F(\delta, \varepsilon)$: rappresenta una funzione adimensionale diagrammata in figura 4.3.1.

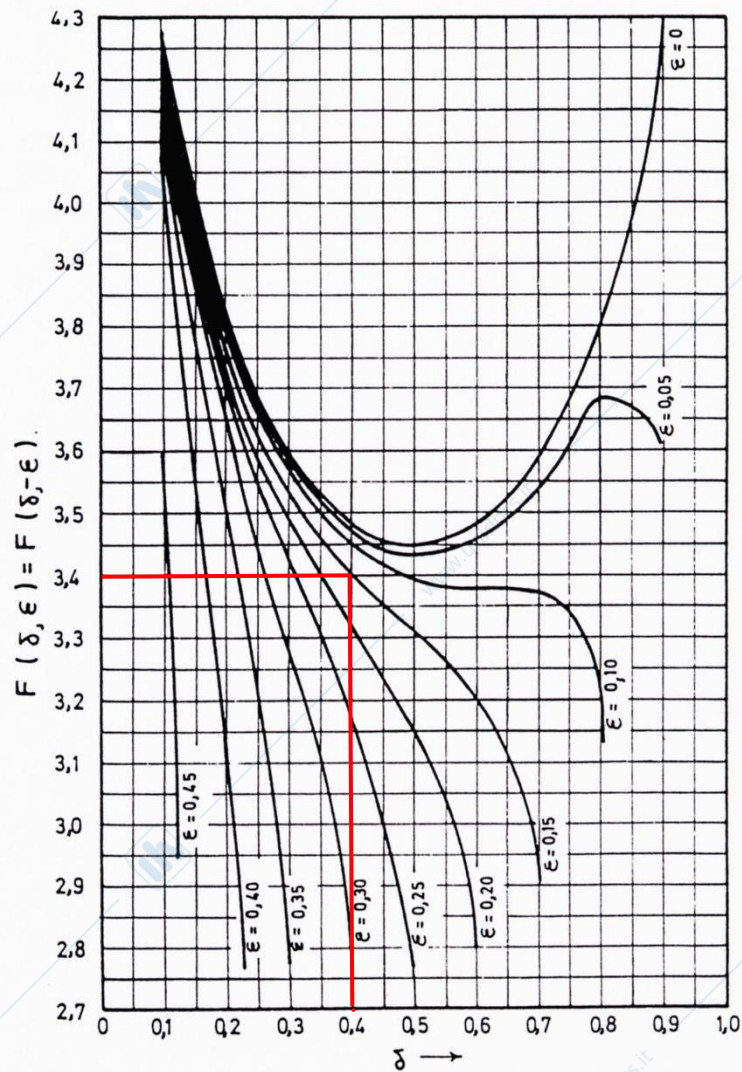


Figura 4.3.1 – Funzione adimensionale $F(\delta, \epsilon)$.

Ottenendo un $\delta = 0.14$ e un $\epsilon = 0.15$, si ricava un valore: $F(\delta, \epsilon) = 3.4$.

Inserendo tali valori nella formula di TNO si ottiene: $B_2 = 13.24 \text{ s/m}^2$; e per differenza: $B_1 = 5.74 \text{ s/m}^2$.

Dai valori ottenuti si può ricavare la relazione fra l'efficienza idraulica e la portata, riportata in figura 4.3.2.

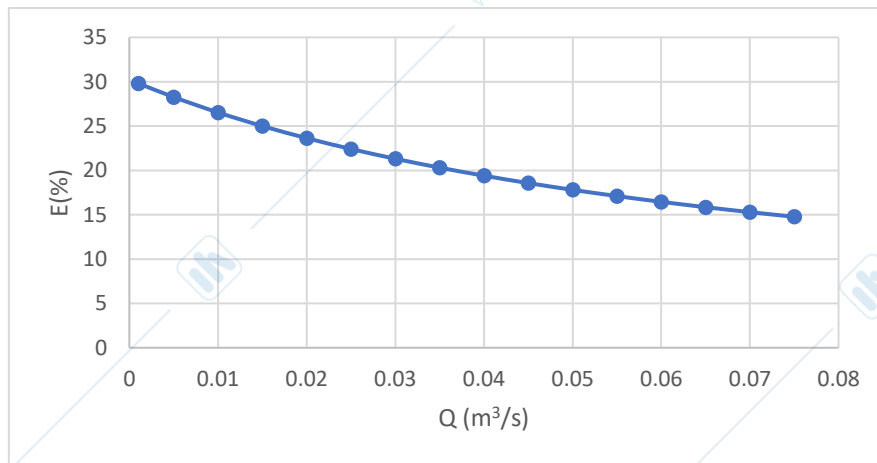


Figura 4.3.2 – Andamento dell'efficienza idraulica al variare della portata.

4.4 Calcolo delle perdite di carico e scelta della pompa idraulica

La tubazione di adduzione deve essere dimensionata considerando il range di velocità e di portata da garantire, rispettivamente di 0.5 – 2 m/s e di 45 – 50 l/s (0.045 – 0.050 m³/s).

Essendo:

$$Q = Av ;$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

Si ottiene il diametro della tubazione come:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Da quest'ultima relazione si ricava di conseguenza un range di diametro delle tubazioni, caratterizzato dal limite inferiore - corrispondente alla velocità di 0.5 m/s e alla portata di 45 l/s; e dal limite superiore - corrispondente alla velocità di 2 m/s e alla portata di 50 l/s.

Il diametro da scegliere per il dimensionamento è quindi compreso fra i due valori estremi che risultano pari a: 0.187 m e 0.374 m.

Dalla valutazione delle tabelle commerciali sulle tubazioni in PVC, consultabili nel sito www.oppo.it/materiali/tubi_raccordi, si è scelto un diametro interno per il dimensionamento pari a 302.6 mm.

Le perdite di carico che si determinano nel sistema considerato sono il risultato della somma di tre contributi:

- $\Delta H_1 \rightarrow$ perdite di carico nel sistema pozzo – acquifero:

essa è determinata tramite l'equazione di Rorabaugh:

$$\Delta H_1 = BQ + CQ^2$$

- $\Delta H_2 \rightarrow$ perdita di carico nella condotta di adduzione:

essa è a sua volta ottenuta dalla somma di una serie di perdite (distribuite e localizzate) che hanno luogo lungo gli elementi che compongono la condotta:

- ΔH_2 (distribuite) = $L \cdot 0.000649 \left(1 + \frac{2m}{\sqrt{d}}\right)^2 \frac{Q^2}{d^5}$: perdite di carico lungo le condotte rettilinee calcolate con la formula di Kutter;
 - ΔH_2 (clapet) = $(0.0032d + 1.187) \frac{v^2}{2g}$: perdite di carico lungo la valvola di ritegno calcolate con la formulazione di Idel'cik;
 - ΔH_2 (saracinesche) = $0.18 \frac{v^2}{2g}$: perdite di carico lungo le saracinesche;
 - ΔH_2 (fondo pompa) = $\left[0.55 + 4 \left(\frac{B_t}{d_0} - 0.1\right) + \frac{0.155}{(C_m/d_0)^2}\right] \cdot \frac{v^2}{2g}$: perdite di carico lungo la valvola di fondo della pompa;
- $\Delta H_3 \rightarrow$ perdita di carico dovuta al dislivello.

Per consentire una erogazione di portata costante dall'acquifero al serbatoio si deve installare una pompa in grado di vincere tutte le perdite di carico del sistema, calcolate come:

$$\Delta H_{TOT} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

Dove:

$$\Delta H_2 = \Delta H_2$$
 (distribuite) + ΔH_2 (clapet) + $2 \cdot \Delta H_2$ (saracinesche) + ΔH_2 (fondo pompa)

La curva caratteristica dal sistema di approvvigionamento idrico descrive l'andamento di ΔH_{TOT} al variare della portata erogata.

In figura 4.4.1 vengono riportate la curva caratteristica del sistema di approvvigionamento e le curve caratteristiche di alcune pompe idrauliche (relazione prevalenza – portata) fornite dalla ditta CAPRARI (tabella 4.4.1). In particolare, si considerano i tipi: E10S55/3C; E10S55/3K; E10S55/3A; E10S55/4S.

Tabella 4.4.1 - Caratteristiche di funzionamento delle pompe CAPRARI.

Q pompa (m ³ /s)	Prevalenza totale (m)			
	3c	3k	3a	4s
0	92	100	106	125
0.027	80	86	93	108
0.03	78	85	90	105
0.035	74	81	87	101
0.04	70	77	84	96
0.045	65	72	79	89
0.05	59	67	74	81
0.055	52	60	66	72
0.06	45	54	59	62
0.064	38.5	47.5	52	54
0.068	32	40	46	45
0.07	29	37.5	43	40
0.072	25.5	34	39	35

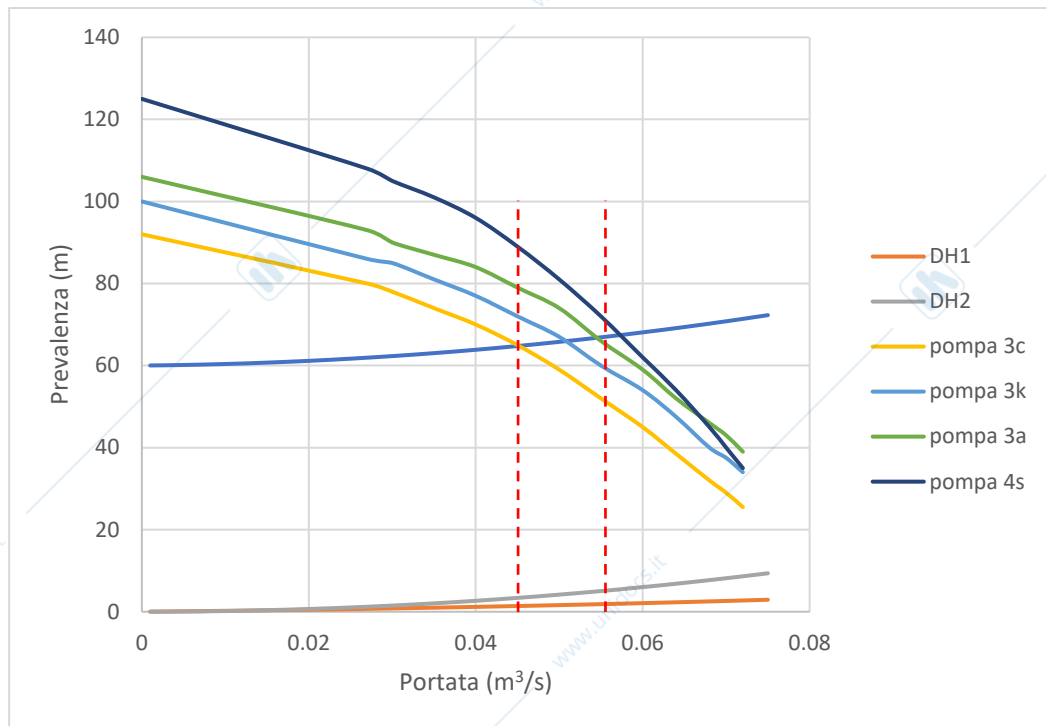


Figura 4.4.1 - Individuazione delle condizioni di funzionamento del sistema di approvvigionamento idrico.

La condizione ottimale di funzionamento è quella che soddisfa simultaneamente le seguenti condizioni:

- rispettare le esigenze di approvvigionamento;
- essere compatibile con la capacità produttiva del sistema pozzo - acquifero;
- corrispondere alla pompa che presenta il rendimento più elevato e la potenza assorbita minore.

Nel caso in esame la scelta è ricaduta sulla pompa 3k, essendo capace di garantire l'emungimento di tutte le portate ipotizzate (tra 0.045 e 0.055 m³/s).

ESERCITAZIONE DI INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI

n. 5

INTERPRETAZIONE DI UNO SLUG TEST MEDIANTE AQTESOLV

Nel mese di maggio 2006 è stato svolto presso il comune di Robassomero (Torino) uno slug test nel piezometro PPDP10, completato in un acquifero non confinato. I dati relativi agli abbassamenti misurati in pozzo durante lo svolgimento della prova sono riportati nel file PPDP10.txt. La geometria di completamento del piezometro e le informazioni relative all'acquifero ed allo slug utilizzato per la prova sono forniti qui di seguito e riassunti in figura.

Piezometro:

- Diametro interno 4 pollici
- Diametro di perforazione 6 pollici
- Diametro di skin 6 pollici
- Sommità tratto finestrato: 13.0 m da p.c.
- Profondità di completamento piezometro: 18.0 m da p.c.

Acquifero:

- Bottom: 18.7 m da p.c.
- Soggiacenza: 7.32 m da p.c.

Slug:

- Diametro: 2 pollici
- Lunghezza: 1 m

Trasduttore:

- Profondità a cui è collocato il trasduttore di pressione: 14.3 m da p.c.

Si interpreti la prova secondo la procedura riportata di seguito:

- Si calcoli l'abbassamento teorico iniziale s_0 dato dall'estrazione istantanea dello slug dal piezometro e lo si confronti con quello misurato: i due valori coincidono?
- Si interpreti inizialmente la prova utilizzando il metodo di Bouwer e Rice, utilizzando il software Excel; in allegato al testo dell'esercitazione è fornito il grafico allegato per la determinazione dei coefficienti A, B, C;
- Si verifichi se la durata della prova è sufficiente, stimando il tempo $t_{90\%}$;

- Si reinterpreti la prova, mediante il software AQTESOLV, impiegando il metodo del KGS, trascurando l'effetto di danneggiamento di permeabilità nell'intorno del piezometro.

5.1 Abbassamento teorico iniziale

In figura 5.1.1 viene fornito l'andamento degli abbassamenti in funzione del tempo

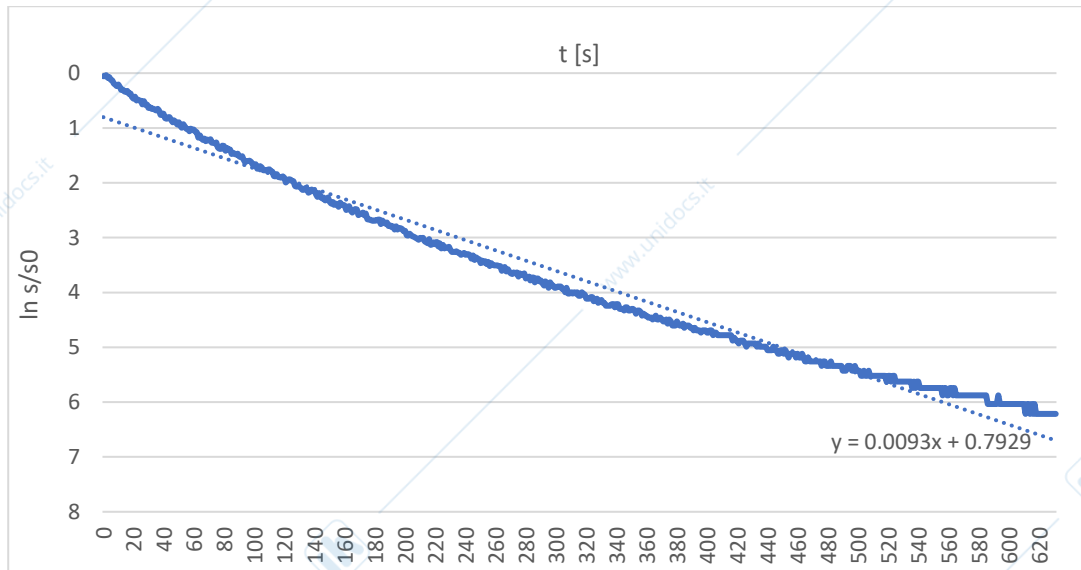


Figura 5.1.1 – Andamento degli abbassamenti in funzione del tempo.

Dall'osservazione di figura 5.1.1 si nota che gli abbassamenti tendono a zero per tempi sufficientemente lunghi. Inoltre, il valore sperimentale dell'abbassamento iniziale risulta essere di circa 0.241 m.

Al fine di valutare la qualità della prova, è stato calcolato il valore dell'abbassamento iniziale come rapporto fra il volume dello slug e l'area interna della tubazione. Di conseguenza si ha:

$$V_{slug} = \pi r^2 l_{slug} = 0.002 \text{ m}^3$$

$$A_{tubazione} = \pi r_{tub}^2 = 0.008 \text{ m}^2$$

Ottenendo:

$$s_0 = \frac{V_{slug}}{A_{tubazione}} = 0.25 \text{ m}$$

Il ridotto scostamento fra il valore teorico e sperimentale dell'abbassamento iniziale evidenzia la corretta esecuzione della prova.

5.2 Metodo di Bower-Rice

La conducibilità idraulica è stata ricavata attraverso il metodo analitico di Bower e Rice che si basa sulle ipotesi di: acquifero omogeneo, isotropo e infinitamente esteso; immagazzinamento dell'acquifero trascurabile; perdite di carico attraverso la finestratura trascurabili e flusso provocato dal gradiente idraulico esclusivamente orizzontale.

Come si può notare in Figura 5.2.1, i valori sperimentali, a causa dell'effetto di immagazzinamento dell'acquifero, presentano una deviazione rispetto al comportamento ideale e risultano perciò allineati lungo una curva anziché lungo una retta.

Per minimizzare l'effetto dovuto alla linearizzazione, Butler propone di considerare valori di s/s_0 compresi nell'intervallo $0.15 \div 0.25$, dove si può osservare un comportamento pressoché rettilineo.

La figura 5.2.1 riporta l'andamento di $\ln(s/s_0)$ all'interno di tale range.



Figura 5.2.1 – Abbassamenti in funzione del tempo nell'intervallo di Butler.

La conducibilità radiale è definita da:

$$K_r = \frac{r_w^2 \ln(R_e/r_d)}{2L} * m \left(\frac{m}{s} \right)$$

Dove:

- r_w : raggio interno del pozzo [m];
- R_e : distanza radiale effettiva oltre la quale la variazione di carico idraulico s è dissipata [m];
- r_d : distanza radiale a partire dalla quale l'acquifero è indisturbato [m];

- L: lunghezza del tratto finestrato [m]
- m: coefficiente angolare della retta che approssima l'andamento degli abbassamenti in funzione del tempo su un grafico semilogaritmico, definito come $m = \frac{\ln \frac{s_0}{s}}{t} = 0.0166$.

Per il calcolo di $\ln(R_e/r_d)$ si utilizza la seguente espressione, valida per pozzi a parziale penetrazione ($D < b$):

$$\ln \frac{R_e}{r_d} = \left\{ \frac{1.1}{\ln \left(\frac{b}{r_d} \right)} + \frac{A + B \cdot \ln \left[\frac{b - D}{r_d} \right]}{\frac{L}{r_d}} \right\}^{-1}$$

Dove:

- b: spessore saturo = 11.38 m
- L: lunghezza del tratto finestrato = 5 m
- r_d : il raggio di perforazione = 0.0762 m
- A, B, C sono diagrammati in funzione del rapporto L/r_d e ottenuti dal grafico in figura 5.2.2.

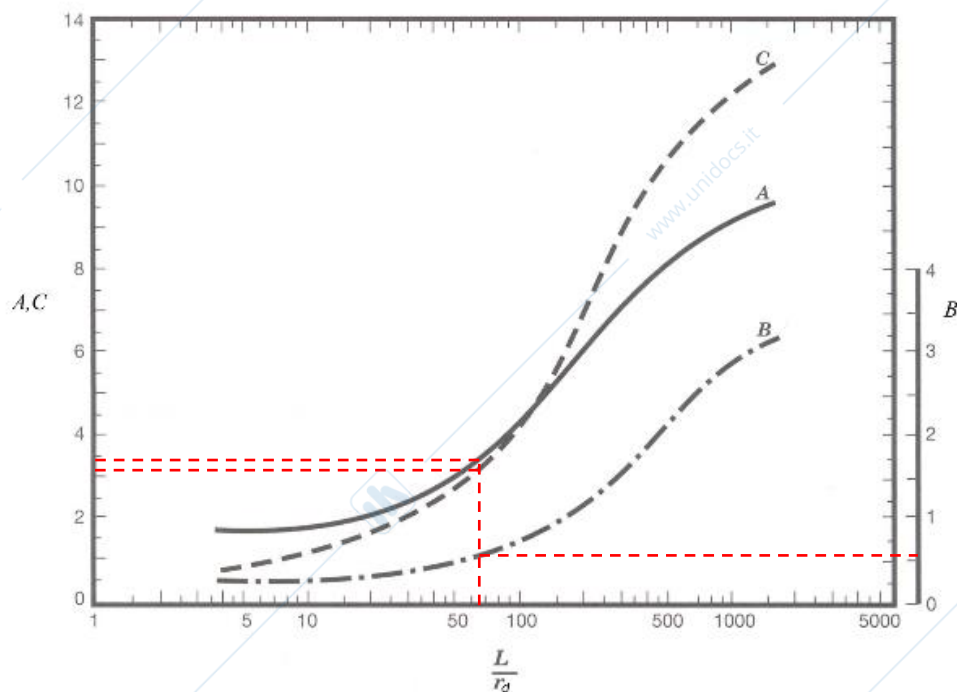


Figura 5.2.2 – Valori dei parametri A, B, C in funzione di L/r_d .

Avendo un rapporto L/r_d pari a 65.6168, si ottiene

- $A = 3.45$;
- $B = 0.55$;
- $C = 3.1$.

Inserendo i valori nell'equazioni precedentemente descritte, si ricava:

$$\ln(R_e/r_d) = 3.40 \rightarrow K_r = 1.46 \cdot 10^{-5} \text{ m/s.}$$

5.3 Durata della prova

Per valutare la correttezza della prova si confrontata il $t_{90\%}$ (ossia il tempo necessario a realizzare il 90% della variazione di livello iniziale) con la durata effettiva della prova stessa:

$$t_{90\%} = 1.15 * \frac{r_w^2}{K_r * L} * \ln\left(\frac{R_e}{r_d}\right) = 139 \text{ s}$$

Dove:

- $r_w = 0.0508 \text{ m}$;
- $K_r = 1.46 * 10^{-5} \text{ m/s}$;
- $L = 5 \text{ m}$;
- $\ln(R_e/r_d) = 3.40$.

Dal momento che $t_{90\%} < 631 \text{ s}$ (durata della prova) risulta verificato, allora si può ritenere valida l'applicazione di Bower e Rice.

5.4 Interpretazione della prova con il metodo del KGS

L'interpretazione della prova è stata realizzata tramite il metodo KGS all'interno del software AQTESOLV. Tale metodologia, che permette di valutare il coefficiente di immagazzinamento S , la conducibilità idraulica K e lo skin effect (trascurabile nel caso in esame), rappresenta lo strumento di interpretazione più avanzato nel campo degli slug test compiuti in pozzi a parziale penetrazione e completamento.

All'interno del metodo KGS, vengono presi in considerazione:

- L'immagazzinamento della formazione;
- Il bilancio di massa pozzo-acquifero;
- La parziale penetrazione del pozzo-piezometro;
- Il danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo.

Nel software vengono importati i valori degli abbassamenti nel piezometro in funzione del tempo. Inoltre, come dati di input vengono inseriti: l'abbassamento teorico, l'altezza della colonna d'acqua statica nel piezometro, la profondità del livello statico nell'acquifero, la profondità del trasduttore, il raggio interno del tubo di pozzo e il raggio del pozzo stesso.

Il software ha restituito la seguente curva (Figura 5.4.1):

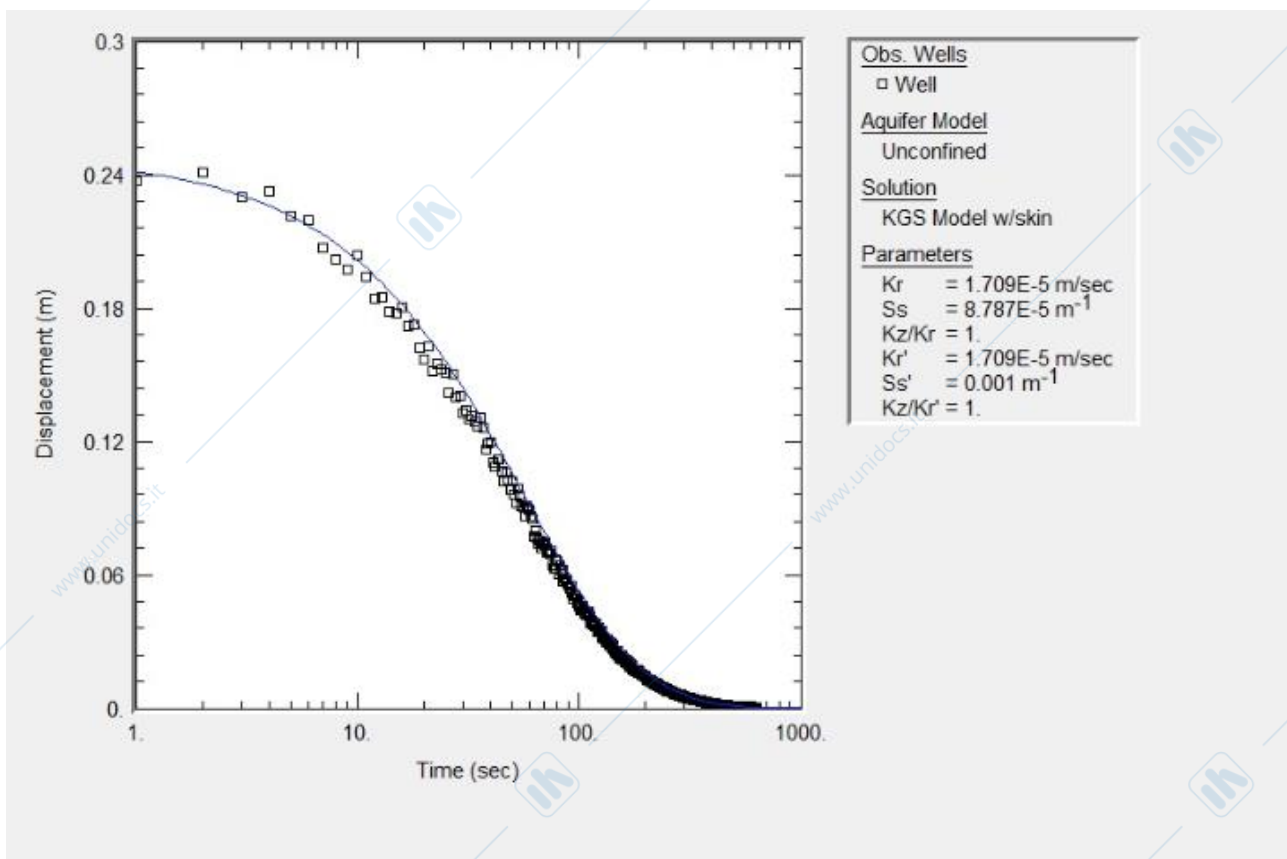


Figura 5.4.1

Essendo lo scostamento fra la conducibilità idraulica valutata con il metodo KGS ($1.71 \cdot 10^{-5}$ m/s) e quella calcolata precedentemente con il metodo di Bower-Rice ($1.46 \cdot 10^{-5}$ m/s) piuttosto contenuto, si può riconfermare la correttezza interpretativa della prova.

5.5 Elaborazione dei dati relativi allo slug test effettuato sul campo

Il 14 novembre 2018 è stata eseguita una prova di slug test in risalita presso l'orto botanico di Torino in un acquifero caratterizzato da una conducibilità idraulica elevata. Sono state effettuate le estrazioni in un piezometro (Piezometro 2) con le seguenti caratteristiche:

- Raggio del pozzo: $r_w=0.04$ m;
- Soggiacenza: 8 m;
- Slug: lunghezza $l=1$ m, $r=0.019$ m.

Dalle variazioni di carico in funzione del tempo si ottiene il grafico di figura 5.5.1.

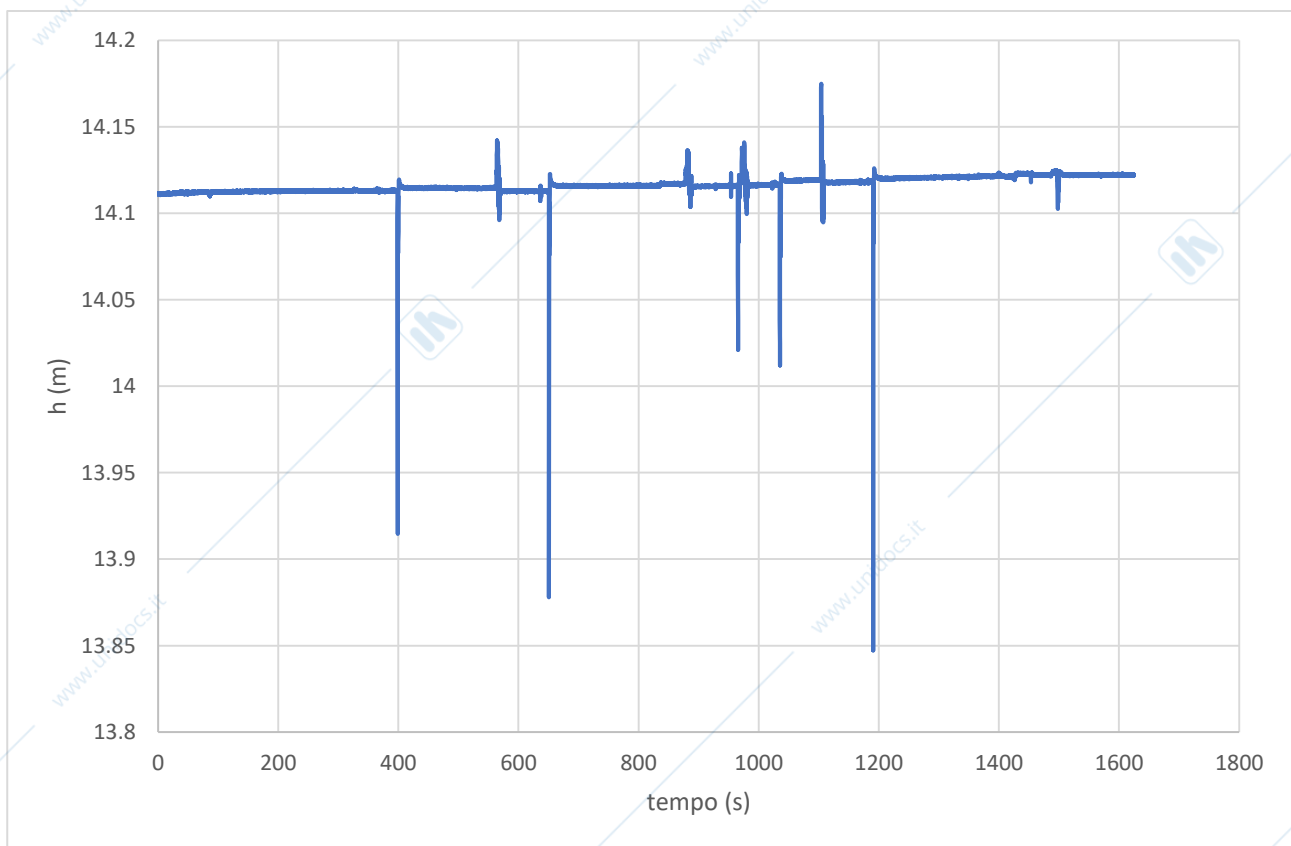


Figura 5.5.1 – Andamento del carico idraulico in funzione del tempo.

Al fine di ottenere una rappresentazione grafica migliore per ogni singola estrazione, sono stati scansionati gli intervalli temporali relativi ad ognuna di esse. Le curve ottenute vengono riportate in figura 5.5.2, 5.5.3 e 5.5.4

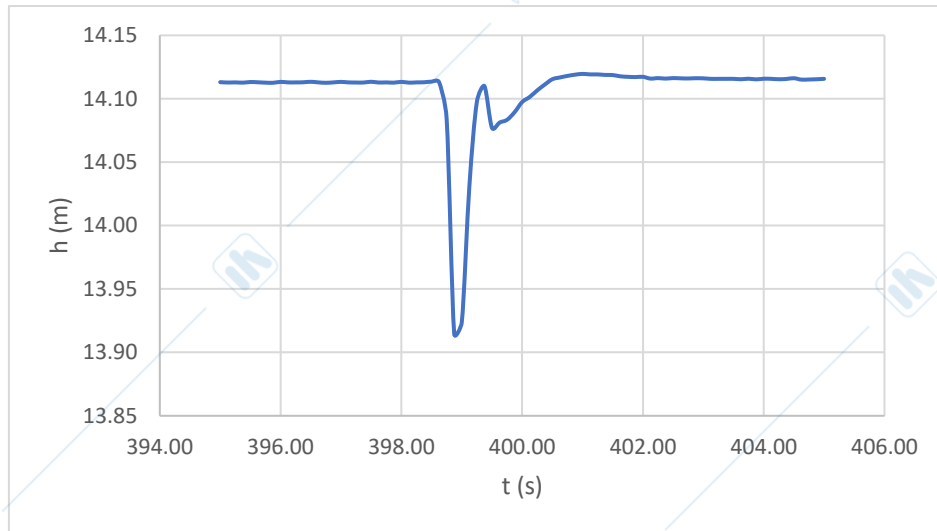


Figura 5.5.2 – Estrazione 1.

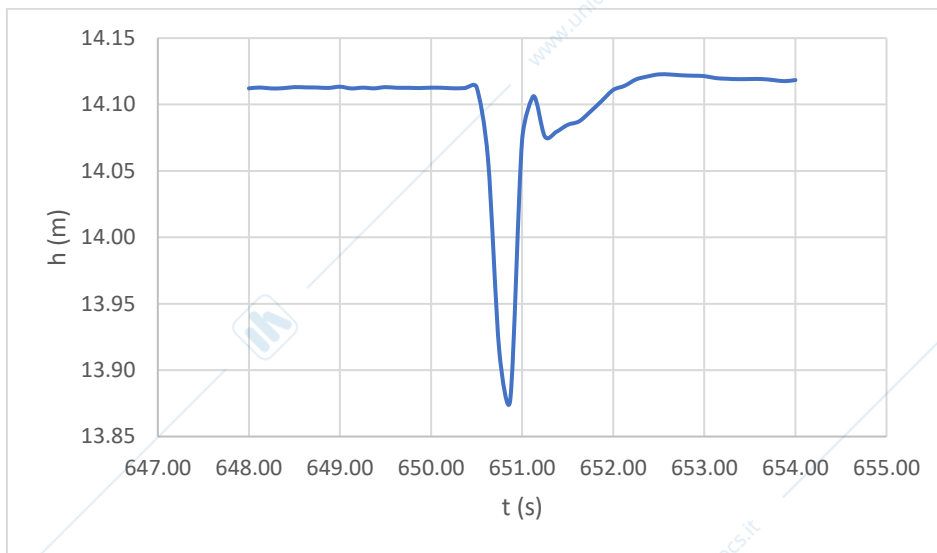


Figura 5.5.3 – Estrazione 2.

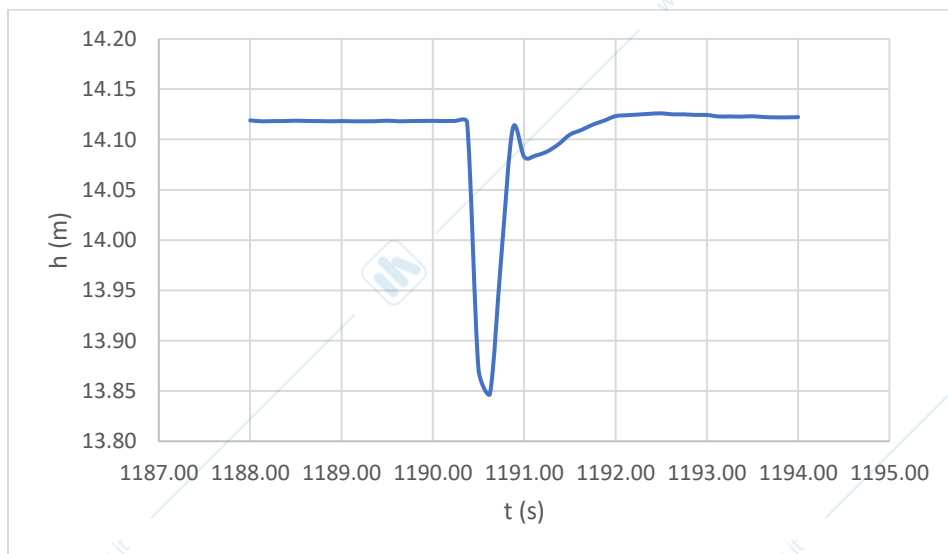


Figura 5.5.4 – Estrazione 3.

Gli abbassamenti che caratterizzano la fase di risalita sono compresi tra l'abbassamento massimo (istante prima dell'estrazione) e l'abbassamento corrispondente al recupero del carico idraulico iniziale ($t_{90\%}$).

In figura 5.5.5 sono riportati, per ogni estrazione, i valori di tali abbassamenti in funzione del tempo, ottenendo le tre curve di slug rappresentate.

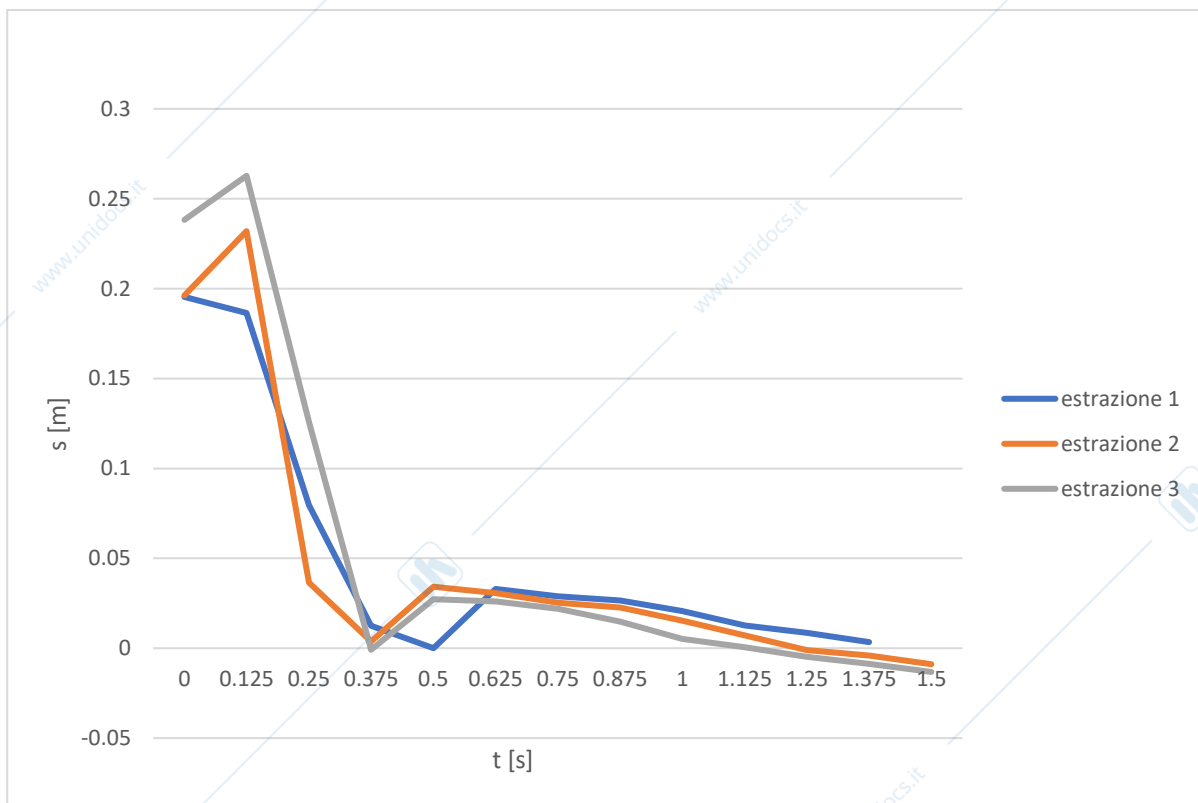


Figura 5.5.5 – Curve di slug.

Per la valutazione della curva di slug più adatta è stato calcolato il valore dell'abbassamento iniziale come rapporto fra il volume dello slug e l'area interna della tubazione. Di conseguenza si ha:

$$V_{slug} = \pi r^2 l_{slug} = 1.13 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$A_{tubazione} = \pi r_{tub}^2 = 0.005 m^2$$

Ottenendo:

$$s_0 = \frac{V_{slug}}{A_{tubazione}} = 0.226 m$$

Ai fine dell'interpretazione della prova, è stata quindi scelta la curva di slug test relativa alla terza estrazione. Il suo segnale, infatti, è caratterizzato da un abbassamento iniziale pressoché uguale all'abbassamento teorico.