

LE PROVE DI PORTATA

dr Alessio Fileccia¹

Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, (DISGAM, Trieste)

Indice	pagina
Utilità e descrizione delle prove.....	1
Concetti e parametri fondamentali.....	3
Grandezze che caratterizzano un pozzo durante la prova di portata.....	5
Indagini preliminari	5
Zona della prova.....	5
Il pozzo.....	6
I piezometri.....	6
Flusso sotterraneo verso il pozzo.....	8
Abbassamento e condizioni ai limiti.....	10
Abbassamenti di livello osservati al pozzo.....	12
Interpretazione delle prove di portata.....	15
Metodi di interpretazione.....	16
Regime permanente in acquifero confinato	18
Regime permanente in acquifero libero.....	19
Regime transitorio in acquifero confinato e freatico.....	20
Regime transitorio in acquifero semiconfinato.....	26
Regime transitorio in acquifero freatico	28
Prova in pozzo.....	31
Come analizzare una prova di pompaggio.....	35
Esempio di specifiche per le prove di portata.....	41
Bibliografia.....	42

Utilità e descrizione delle prove

Quando ci si occupa di acque sotterranee per effettuare valutazioni quantitative o semplici previsioni su possibili zone di futuro inquinamento, è fondamentale ricavare alcuni parametri idrogeologici, quali la trasmissività (T) e l'immagazzinamento (S).

Tra le varie analisi che si eseguono, le prove in pozzo e, soprattutto quelle su acquifero, sono le più accurate. Il motivo è nel volume di terreno interessato, che è molto superiore rispetto ad un'analisi di laboratorio o ad una prova di permeabilità in un pozzetto superficiale. Indagini come queste sono in genere lunghe e costose rispetto a molte altre e vanno spinte fino a sollecitare notevolmente l'acquifero per comprendere meglio i suoi meccanismi.

¹ Libero professionista, docente a contratto

Ne consegue che l'attendibilità dei parametri ricavati è tanto maggiore quanto più intense sono state le modifiche prodotte. A questo proposito è utile precisare che spesso si trovano in bibliografia valori di trasmissività ricavati da prove su acquiferi freatici dell'alta pianura in ghiaie grossolane, utilizzando pompe di 30-40 l/s, che generano abbassamenti inferiori a 2-3 cm.

L'utilità di tali parametri è molto scarsa ed in mancanza di pompe idonee (se serve anche i 50 l/s) è sufficiente ricavare la trasmissività da tabelle comparative.

Le prove di portata si possono dividere in due grandi categorie: le prove in pozzo e quelle su acquifero.

Le prime, più semplici e meno costose, hanno in genere lo scopo di definire le caratteristiche costruttive dell'opera e la sua efficienza, ma con opportuni accorgimenti anche la trasmissività dell'acquifero.

Le seconde richiedono la perforazione di uno o più piezometri attorno al pozzo di produzione, interessano un volume di terreno molto superiore rispetto alle prime e, se protratte per lungo tempo (1-3 giorni) danno una visione molto più completa del sito e delle condizioni ai limiti permettendo di ricavare valori attendibili di trasmissività, immagazzinamento, raggio d'azione.

Accoppiando qualche semplice variante, si può ottenere inoltre porosità e velocità effettiva.

Le prove consistono nella costruzione di un pozzo di produzione, munito di pompa ed in grado di provocare una variazione consistente di livello piezometrico. La prova si protrae fino al raggiungimento di una situazione di equilibrio, o pseudo equilibrio, del livello, e le misure

progressive si effettuano sia in abbassamento sia in risalita, fino al ritorno al livello statico iniziale.

Le prove di pompaggio oltre a fornire dunque, i parametri idrogeologici fondamentali contribuiscono a chiarire tipologia e condizioni al contorno degli acquiferi e, se necessario, permettono di modificare il modello concettuale di partenza. Sono effettuate in genere su acquiferi alluvionali e più raramente in quelli fratturati e con i dati ricavati si possono fare diverse valutazioni pratiche:

- Previsione di futuri abbassamenti di falda
- Direzione di propagazione di inquinanti
- Efficacia di un sistema di bonifica
- Influenza di zone di prelievo o ricarica
- Potenzialità dell'acquifero
- Efficienza costruttiva del pozzo



Foto 1: Prova di portata su acquifero carsico (Cirenaica, Libia)

La procedura generale prevede il pompaggio di un volume d'acqua da un pozzo e la misura dei livelli dinamici della falda sia nel pozzo principale sia in uno o più piezometri circostanti.

Se si considera un pozzo che pompa per un lungo periodo un acquifero poroso omogeneo ed isotropo, la superficie piezometrica prende la forma di un cono rovesciato al cui centro si trova il pozzo (vedi figura).

Lo scopo è quello di produrre un abbassamento che aumenti il gradiente idraulico tale da spostare l'acqua verso i filtri. Più basso è il gradiente (piccole portate) minore è la quantità d'acqua che è possibile prelevare.

Nel pozzo poi l'acqua deve entrare attraverso una superficie cilindrica (quella dei filtri) alta quanto è lo spessore di acquifero, ed occorre un gradiente notevole (legge di Darcy) affinché il flusso sia uguale alla portata pompata. Attraverso ogni cilindro concentrico al pozzo e di raggio crescente, deve passare una portata costante, ma poiché la superficie aumenta proporzionalmente al raggio, il gradiente necessario a mantenere il flusso diminuisce all'aumentare della distanza dal pozzo e questo produce una forma ad imbuto della superficie dinamica di depressione.

Negli acquiferi freatici la riduzione di spessore della parte satura e la componente verticale di flusso, complicano alquanto la situazione.

Dato che l'acqua prelevata proviene direttamente dal volume intergranulare, il cono si espande lentamente ed il raggio di azione non arriva molto lontano.

Per un acquifero artesianiano il cono di depressione risulta da una perdita di pressione (compressione della matrice solida dell'acquifero ed espansione dell'acqua). L'allargamento è relativamente veloce ed il raggio di azione giunge a grande distanza. Il cono non rappresenta una zona desaturata (come nei freatici) ma un'area che continua a crescere per diminuzione di pressione.

In generale più basso è il coefficiente d'immagazzinamento maggiore è l'ampiezza del cono di depressione, ed il rapporto tra artesiani e freatici può essere di 1 a 10. Ad esempio per Q, T costanti, se il raggio di azione in un freatico è circa 120 m, in un artesianiano può arrivare a 1200 m (Lohman).

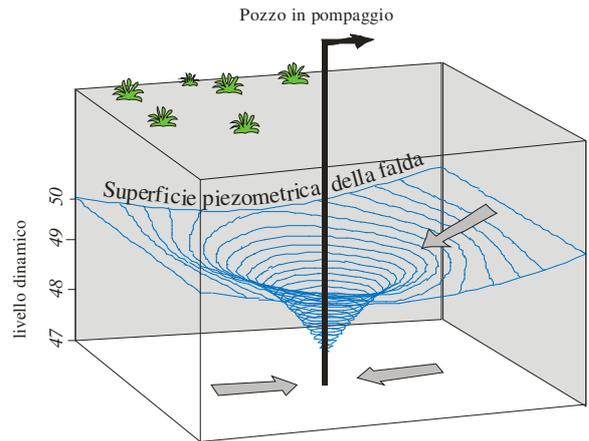


Fig. 1: Cono di depressione di una falda in pompaggio

Concetti e parametri fondamentali

La programmazione di una prova in sito presuppone la conoscenza di alcuni concetti e parametri idrogeologici fondamentali, che qui elenchiamo:

Acquifero libero (water table aquifer)

I parametri che lo caratterizzano di più, sono la porosità efficace (specific yield) e la conducibilità idraulica orizzontale (Kh) e talvolta anche quella verticale (Kv); quando si studiano acquiferi costituiti da livelli a diversa conducibilità, si dovrebbero considerare le conducibilità equivalenti.

Acquifero confinato (confined aquifer)

I parametri caratteristici sono la trasmissività ($T = Kh$), l'immagazzinamento (S , storage), l'immagazzinamento specifico ($S_s = S/b$, specific storage)

Acquifero semiconfinato (leaky aquifer)

E' caratterizzato dagli stessi parametri dei confinati ed in più dalla conducibilità idraulica dell'acquitrando (K'), dal suo fattore di fuga ($B = \sqrt{Tb'/K'}$; leakage factor) e conduttanza ($C = K'/b'$, hydraulic conductance)

Acquitrando (aquitard)

Suoi parametri caratteristici sono la conducibilità idraulica (K'), il fattore di fuga ($B = \sqrt{Tb'/K'}$; leakage factor) e la conduttanza ($C = K'/b'$, hydraulic conductance);

Acquicludo (aquiclude)

La sua caratteristica è di avere conducibilità idraulica prossima od uguale a zero

La legge fondamentale che regola il fenomeno è quella di Darcy; da questa sono derivate varie formule, applicabili a particolari situazioni ed utilizzabili in forma grafica.

Vi sono due tipi d'equazioni che riguardano l'idraulica dei pozzi a seconda che descrivano il flusso in regime stazionario o meno.

Il flusso in regime stazionario, o permanente, (*steady state flow*) ha la caratteristica di non dipendere dal tempo.

In altre parole i livelli nel pozzo e nei piezometri restano costanti durante il pompaggio, e l'acquifero fornisce la stessa quantità d'acqua prelevata dalla pompa.

Questo si verifica quando vi è una ricarica esterna dell'acquifero (infiltrazione, acquiferi laterali, bacini superficiali...).

La caratteristica fondamentale del regime permanente è che non viene prelevata acqua dalla zona di immagazzinamento dell'acquifero, esso è un semplice mezzo che la trasmette, dalla zona di ricarica a quella di prelievo.

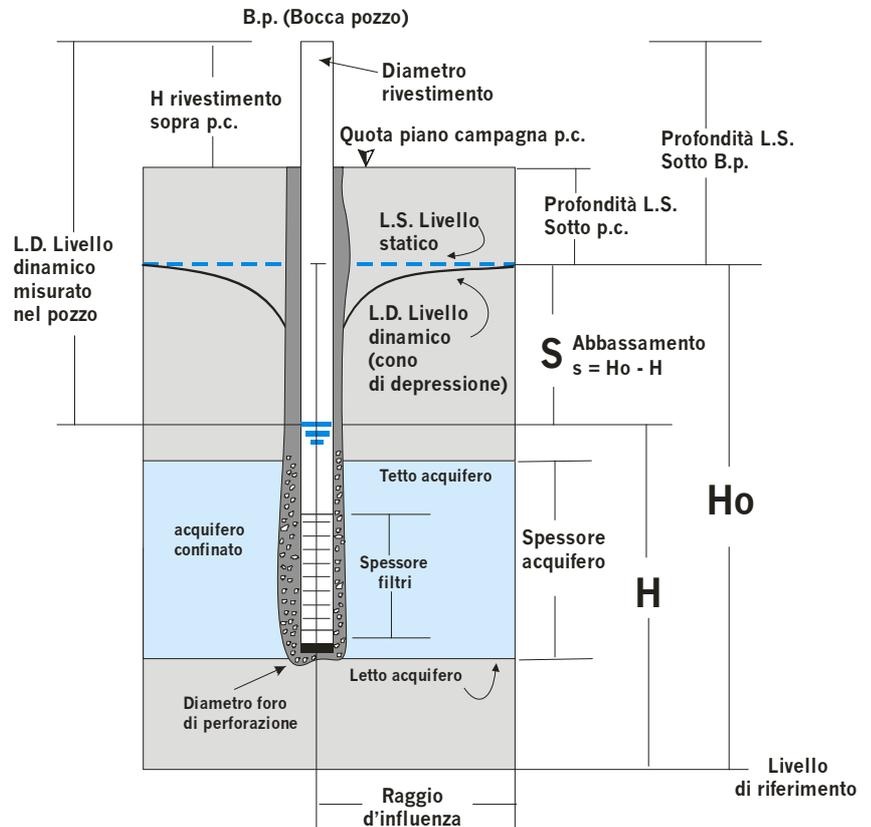
Il flusso in regime di non equilibrio (*unsteady state flow*) si verifica dall'inizio del pompaggio fino al raggiungimento della situazione d'equilibrio, quando i livelli restano pressochè costanti.

In un regime variabile, l'acquifero non solo trasmette l'acqua ma ne fornisce in parte, entrando così in gioco il coefficiente di immagazzinamento.

Grandezze che caratterizzano un pozzo durante una prova di portata

La figura seguente schematizza i parametri geometrici più importanti di cui prendere nota prima e durante la prova di portata, sia per il pozzo di produzione sia per i piezometri eventuali.

Fig. 2: Grandezze che caratterizzano un pozzo durante una prova di portata:
Nella figura sono sintetizzate le caratteristiche da ricavare durante la prova in base alla geometria pozzo - acquifero



Indagini preliminari

Prima di iniziare il test è necessario ottenere una serie di dati o condurre delle indagini preliminari, che aiuteranno a scegliere la metodologia esecutiva ed interpretativa più adeguate:

- informazioni stratigrafiche del sito e possibilmente ricostruzione geometrica dell'acquifero
- condizioni al contorno e regime
- superficie piezometrica naturale
- punti d'acqua nelle vicinanze

Zona della prova

Nel caso vi sia la possibilità di scegliere la zona della prova è utile considerare i seguenti aspetti:

- La situazione stratigrafica ed idrogeologica dovrebbe essere costante nei dintorni
- La zona dovrebbe essere lontana da pozzi in emungimento o di ricarica
- L'acqua pompata deve essere allontanata ad una distanza tale a non ricaricare l'acquifero studiato
- Il gradiente piezometrico circostante deve essere basso
- Il luogo deve essere facilmente accessibile da uomini e mezzi

Il pozzo

Per quanto riguarda il disegno del pozzo si tenga in considerazione:

- Diametri del foro, del rivestimento e della pompa
- Capacità della pompa adeguata alla trasmissività dell'acquifero da testare
- Profondità, lunghezza, diametro e tipo di filtro, dreno
- Durata del tempo di pompaggio

Solo dopo avere effettuato le indagini preliminari si potrà iniziare la prova scegliendo la metodologia ed il metodo di interpretazione più adeguato (a portata costante o variabile in regime di equilibrio o transitorio, con o senza piezometri).

I piezometri

Lo scopo dei piezometri è di misurare il progressivo abbassamento della falda distante dal pozzo in pompaggio, di ricavare il coefficiente d'immagazzinamento (S) oltre che il raggio d'azione.

L'utilità dei piezometri si rivela nel fatto che gli abbassamenti non sono influenzati dalle perdite di carico, presenti invece nel pozzo.

Con le sole misure nel pozzo in pompaggio è difficile ricavare un valore attendibile di S.

I piezometri sono di diametro massimo 5-10 cm, aperti alla base o filtranti uno spessore piccolo d'acquifero.

Il loro numero dipende dall'accuratezza richiesta, dai parametri ricercati e dai fondi economici a disposizione.

Quest'ultimo aspetto fa sì che la maggior parte delle prove sia effettuata solo nel pozzo od al massimo con un solo piezometro.

Se possibile è ad ogni modo consigliabile disporre di almeno tre piezometri, poiché gli abbassamenti possono essere analizzati con due metodologie:

- Tramite le relazioni tempi-abbassamenti
- Tramite le relazioni distanze-abbassamenti (metodo che si rivela utile quando nell'acquifero sono presenti eterogeneità laterali)

In quest'ultimo modo, il volume d'acquifero investigato è superiore, le piccole eterogeneità mediate e le condizioni ai limiti sono più chiare.

La distanza pozzo piezometro dipende dal tipo e permeabilità dell'acquifero, durata ed entità del pompaggio, lunghezza dei filtri.

Ad esempio, se la trasmissività è elevata il cono di depressione è largo e piatto, mentre se la trasmissività è bassa, il cono è più pronunciato e poco esteso.

Fig. 3: Forma del profilo di depressione dinamica con diverse trasmissività dell'acquifero; quando T è più basso il cono di depressione è più pronunciato e poco esteso.

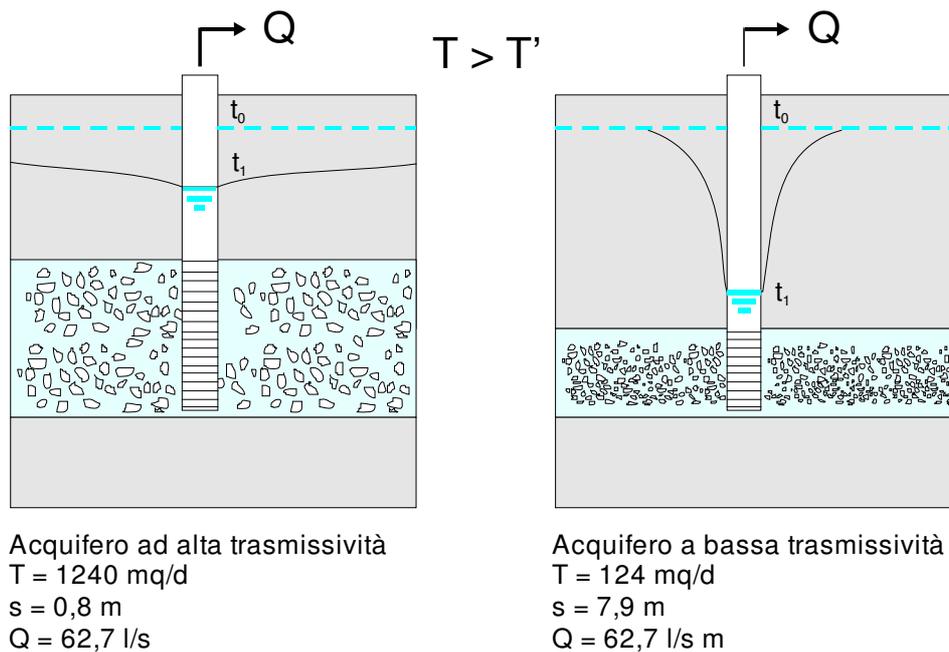
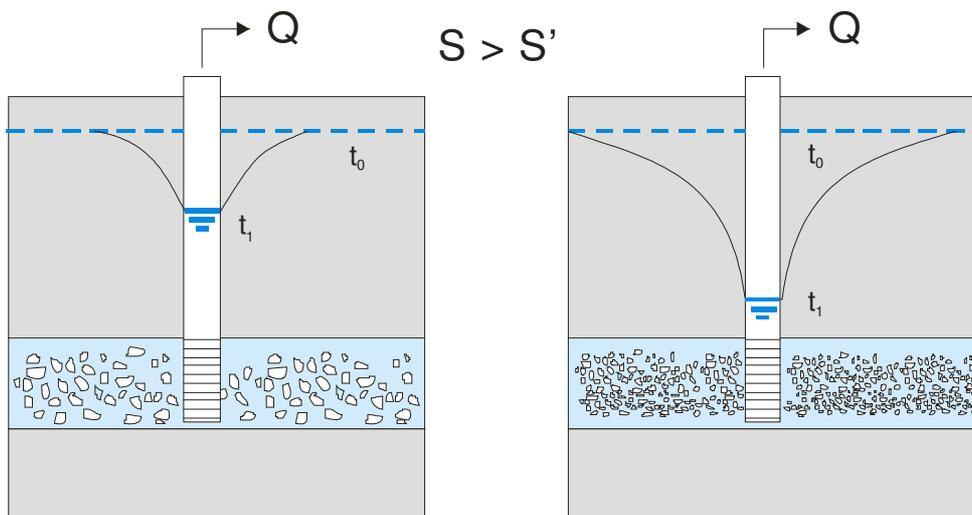


Fig. 4: Forma del profilo di depressione dinamica per diversi valori di immagazzinamento; quando S è più basso il raggio d'influenza è molto esteso.



Nel caso di fig. 3, a sinistra, (e fig. 4 a destra) i piezometri possono essere più distanti.

In genere una distanza di 30 – 100 m dal pozzo in pompaggio è sufficiente, ma in acquiferi molto potenti tale valore si può aumentare a 200 – 300 m.

La profondità dei piezometri raggiunge la quota corrispondente a circa metà della lunghezza dei filtri del pozzo in pompaggio.

Nel caso in cui la prova interessa un acquifero confinato, può essere utile lasciare un piezometro che filtri solamente l'acquifero freatico superiore; sarà utilizzato per rivelare una comunicazione idraulica tra i due.

Flusso sotterraneo verso il pozzo

Quando il flusso idrico si muove in modo laminare, le linee di corrente si spostano lentamente lungo traiettorie pressochè rettilinee, senza particolari variazioni, dalle zone di ricarica a quelle di recapito. Questo è quello che si verifica in un acquifero confinato ideale, in cui domina la conducibilità idraulica orizzontale ($K_h \gg K_v$).

Un pozzo in pompaggio che filtra solo una parte dell'acquifero, meno del 85 % secondo Todd, è un pozzo incompleto e produce una distorsione delle linee di corrente che vengono deviate verso l'alto.

In questo modo l'acqua deve compiere un percorso più lungo sotto l'influenza della componente verticale della conducibilità idraulica (K_v). Dato che in molti casi $K_h \gg K_v$, si verifica un aumento di gradiente al passaggio acquifero – pozzo, materializzato da un maggiore abbassamento del livello dinamico all'interno del filtro, una delle cause delle cosiddette perdite di carico (well losses).

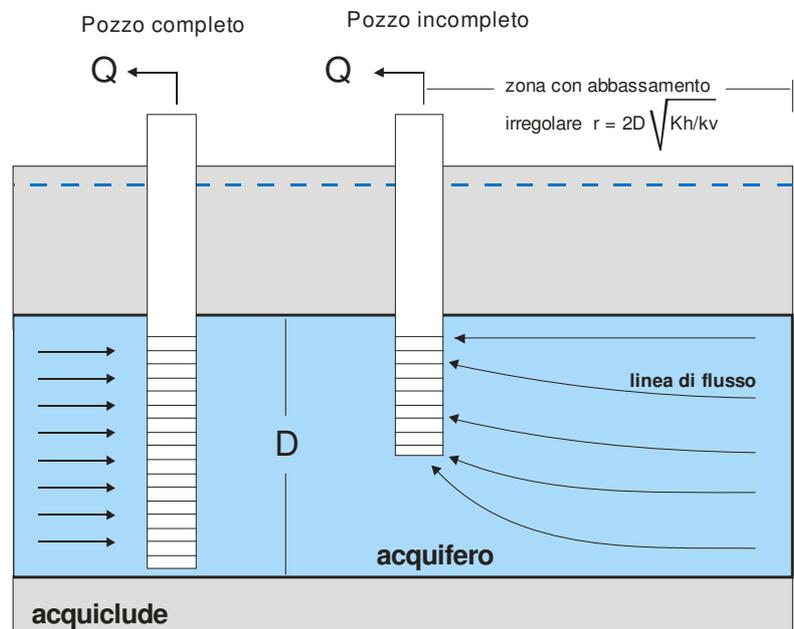
Con queste tipologie costruttive, i pozzi incompleti determinano nel flusso, una componente verticale che si estende dai filtri, fino ad una distanza di circa 1,5 – 2 volte lo spessore dell'acquifero.

Secondo Muskat e Butler, tale distanza vale:

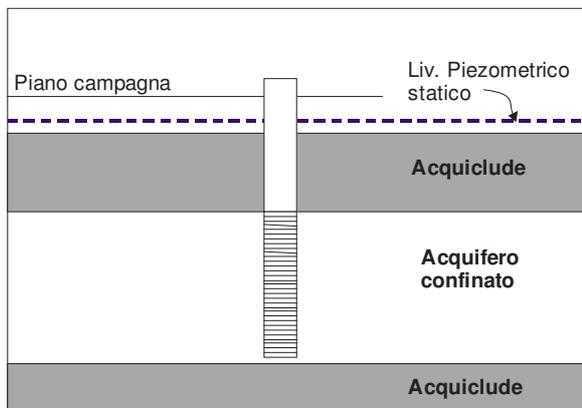
$$r = 2D \sqrt{K_h / K_v}$$

Gli abbassamenti misurati necessitano quindi di una correzione, per potere essere utilizzati nelle formule, anche se Walton osserva che il rapporto K_h / K_v è in pratica difficile da ricavare e che quindi "...il gioco non vale la candela".

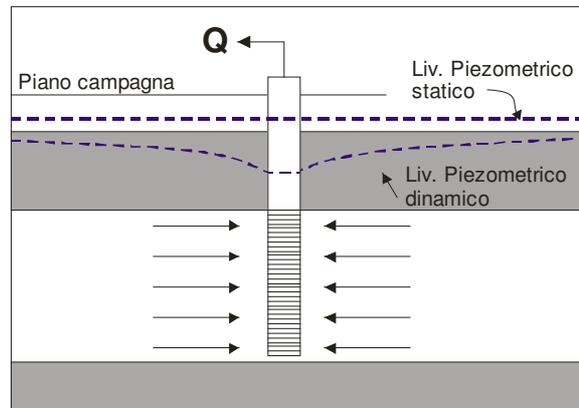
Fig. 5: deviazione di linee di flusso verso pozzi incompleti



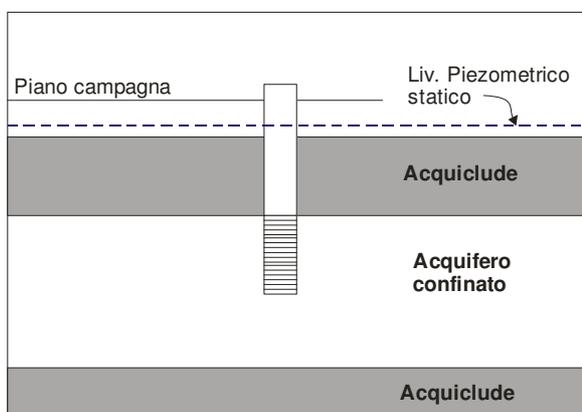
Nella figura 6 (A,B,C) è schematizzato il fenomeno della distorsione delle linee di flusso per diverse percentuali di completamento.



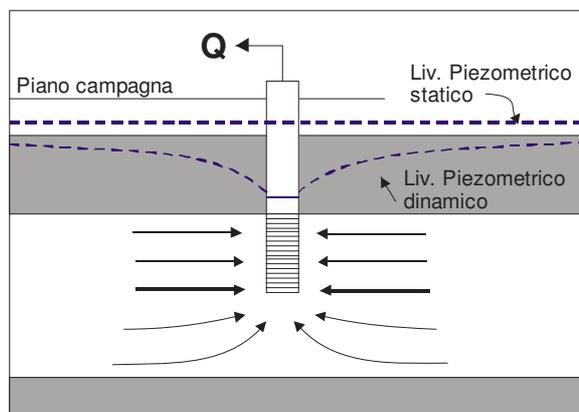
A: pozzo completo, situazione iniziale



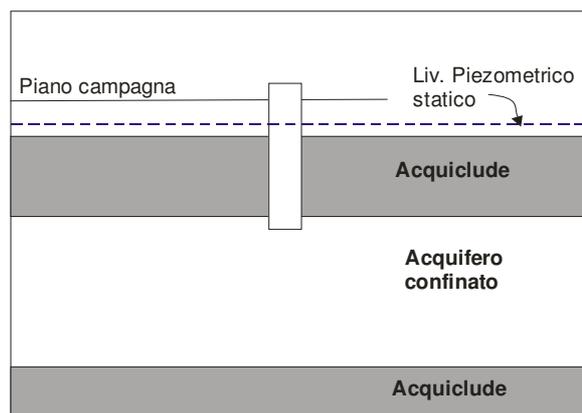
A: pozzo completo in pompaggio



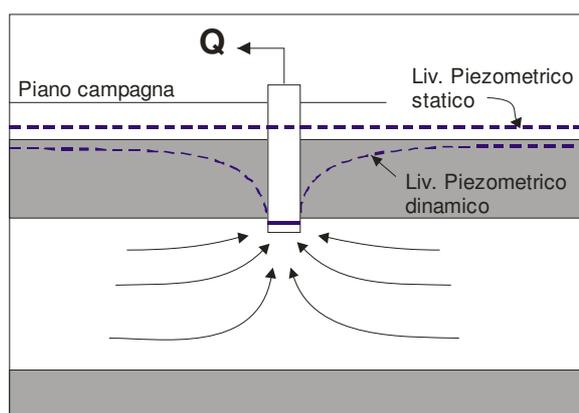
B: pozzo completo al 50%, situazione iniziale



B: pozzo completo al 50% in pompaggio



C: pozzo non completo, situazione iniziale



C: pozzo non completo in pompaggio

Fig. 6: distorsione delle linee di flusso nei pozzi incompleti durante il pompaggio

Abbassamento e condizioni ai limiti

L'abbassamento misurato non è solo indice di caratteristiche costruttive del pozzo, ma anche di una geometria particolare dell'acquifero. E' il caso della presenza di condizioni geologiche (o di flusso) particolari ed interessate dal cono di depressione. Bacini superficiali, riduzioni od aumenti improvvisi di spessore degli strati, faglie, cambi di litologia, presenza di acquiferi superiori od inferiori a quello testato, altri pozzi in pompaggio nelle vicinanze, sono tutti fattori che modificano la morfologia del cono di depressione.

Nelle vicinanze di una barriera impermeabile si avrà un abbassamento maggiore del livello dinamico, analogamente a quanto succedrebbe in presenza di una riduzione laterale di permeabilità o di spessore degli strati. Se vi sono altri pozzi in pompaggio, l'abbassamento di quello in prova si sommerà a quelli esistenti, per sovrapposizione degli effetti, producendo un Δs complessivo molto maggiore di quello prevedibile.

Fig. 7: Dissimetria del cono di depressione in presenza di un limite a carico fisso (A) ed a flusso nullo (B)

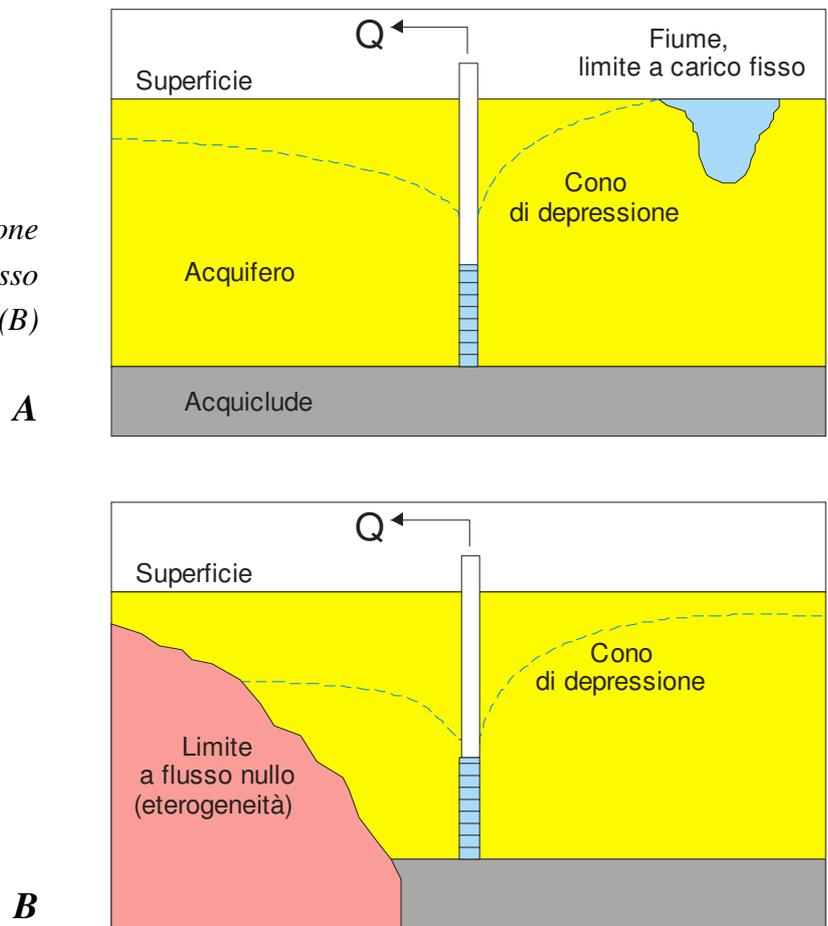
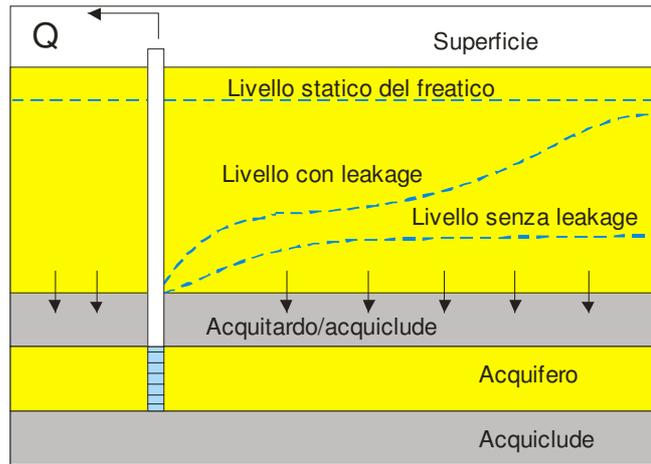
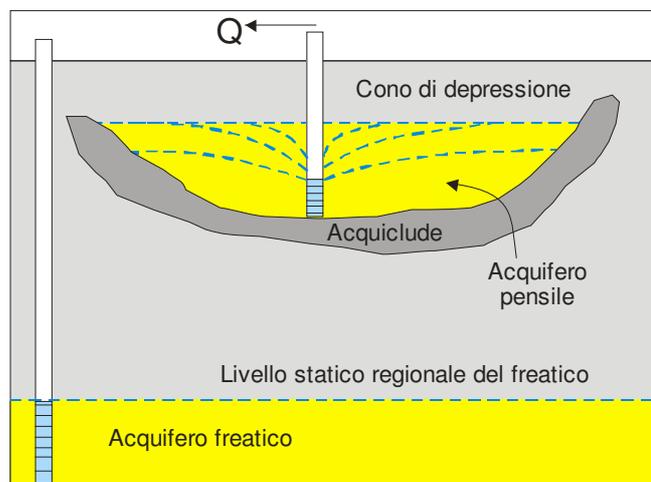


Fig. 8: Modifica del cono di depressione durante una prova su acquifero semiconfinato (A) o pensile (B)

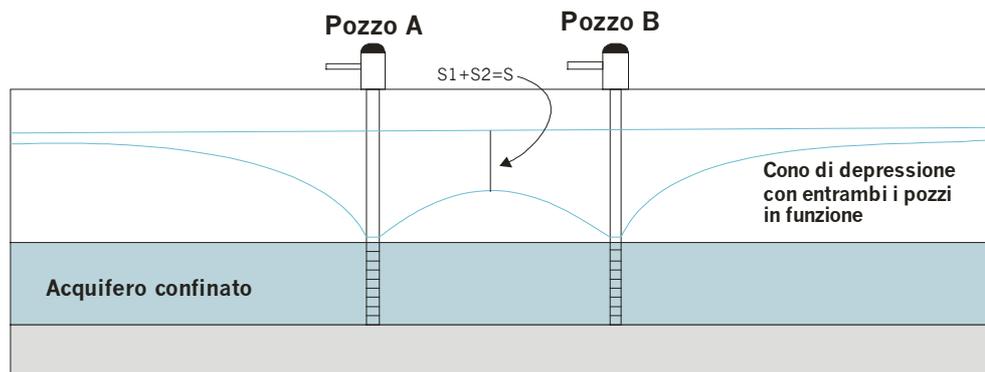
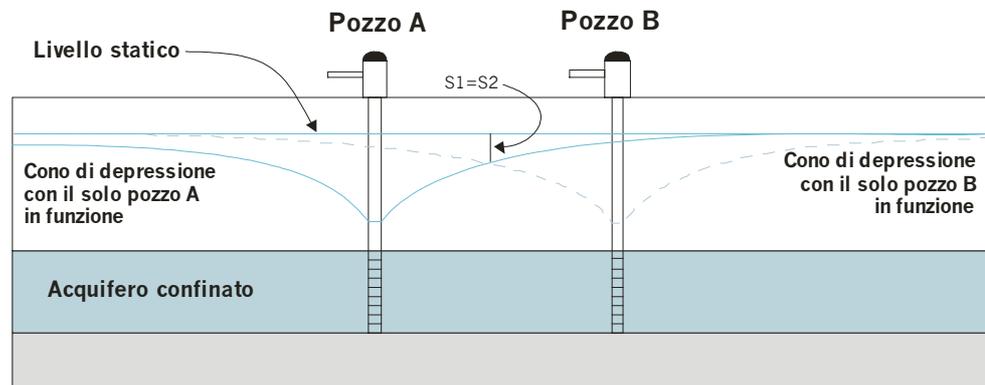


A



B

Fig. 9: Il principio di sovrapposizione degli effetti stabilisce che, in sistemi lineari, l'effetto di ogni sollecitazione può essere studiato separatamente e quindi sommato algebricamente agli altri. In altri termini gli abbassamenti causati da più pozzi possono essere calcolati separatamente e quindi sommati per avere l'abbassamento totale in un determinato punto. Per essere valido il principio, il sistema deve essere lineare; un acquifero freatico od una condizione di limite dipendente dal carico con variazioni brusche di flusso non sono lineari e quindi la sovrapposizione degli effetti non è strettamente valida (Heath, 1983) modificato).



Abbassamenti di livello osservati nel pozzo

L'abbassamento di livello misurato in pozzo (livello dinamico) è dovuto ad una serie di fenomeni riconosciuti da vari autori (Jacob, Rorabaugh, Hantush ecc.) e che si possono riassumere in due grandi categorie:

1. Perdite di carico lineari (formation losses), causate dalla modificazione dell'acquifero a seguito della perforazione e completamento del pozzo per:
 - Parziale compattazione delle pareti del foro
 - Parziale impermeabilizzazione per uno spurgo inefficiente
 - Inserimento del dreno
 - Inserimento dei filtri
2. Perdite di carico non lineari (well losses), causate principalmente dall'inserimento e funzionamento delle attrezzature di pompaggio:
 - Attrito all'interno dei filtri e tubo pompa
 - Attrito alla superficie di passaggio acquifero-pozzo

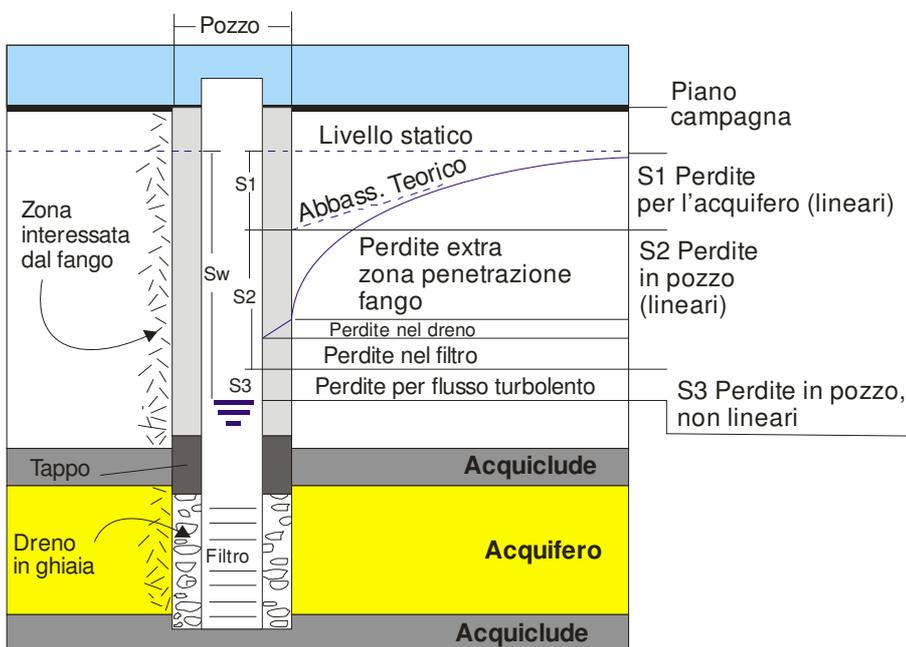


Fig. 10: schema delle principali cause di abbassamento in un pozzo di produzione; Le perdite in pozzo (well loss) sono la differenza tra l'abbassamento totale misurato (s_w) e quello teorico (s_1)

Tutte queste perdite di carico sono responsabili del fatto che l'abbassamento all'interno del pozzo è superiore a quello che ci si potrebbe aspettare.

In ambito petrolifero si parla di "skin effect" per caratterizzare tutte quelle perdite di carico che si verificano nelle vicinanze del pozzo. Il termine si basa sul fatto che l'acquifero viene considerato omogeneo fino alla parete del pozzo, mentre tutte le perdite di carico si considerano concentrate in un sottile strato ad essa aderente.

Facendo riferimento alla fig.10, le cause che determinano il livello dinamico all'interno del pozzo in pompaggio sono:

a) perdite di carico nell'acquifero

causano l'abbassamento all'esterno della colonna, sono caratterizzate da flusso laminare e dipendono dal diametro del pozzo e dai parametri dell'acquifero; il valore di abbassamento che si ottiene è comprensivo di:

- pozzo incompleto
- anisotropia
- eterogeneità
- progressiva riduzione dello spessore saturo in falda freatica
- limiti

b) perdite di carico non laminari nelle vicinanze del pozzo

se il numero di Reynolds supera il valore soglia (circa 10, indicativamente oltre i 3-5 cm/s), la legge di Darcy non è applicabile e si entra in regime turbolento, la velocità dell'acqua è allora proporzionale a $i^{1/2}$ e gli abbassamenti al quadrato della portata (in alcuni casi l'esponente è anche maggiore di 2); questo abbassamento è importante, per esempio, in pozzi di piccolo diametro, con filtri corti o poco porosi o con uno sviluppo insufficiente (fig. 11).

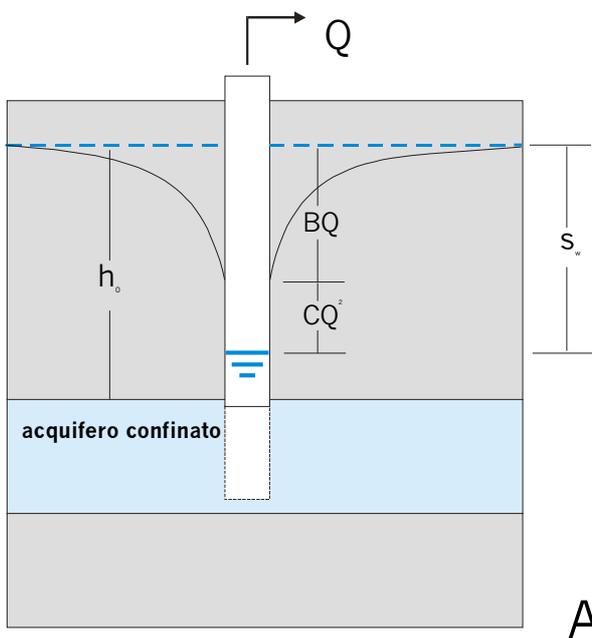


Fig.11: *Abbassamenti provocati dall'opera e dall'acquifero; BQ abbassamento lineare, dovuto all'acquifero, CQ² abbassamento non lineare dovuto alle perdite di carico in genere*

c) skin effect

L'area attorno al pozzo è modificata dalla perforazione e non possiede più le stesse caratteristiche dell'acquifero, in particolare la sua conducibilità idraulica è modificata; questa zona è chiamata "skin zone" e caratterizzata da un suo proprio valore di K ed abbassamento (Kroening)

d) perdite ascensionali nel pozzo

sono quelle che si verificano nel percorso tra filtri e pompa; si considerano quando tale distanza è elevata e/o il diametro del rivestimento è piccolo rispetto alla portata estratta

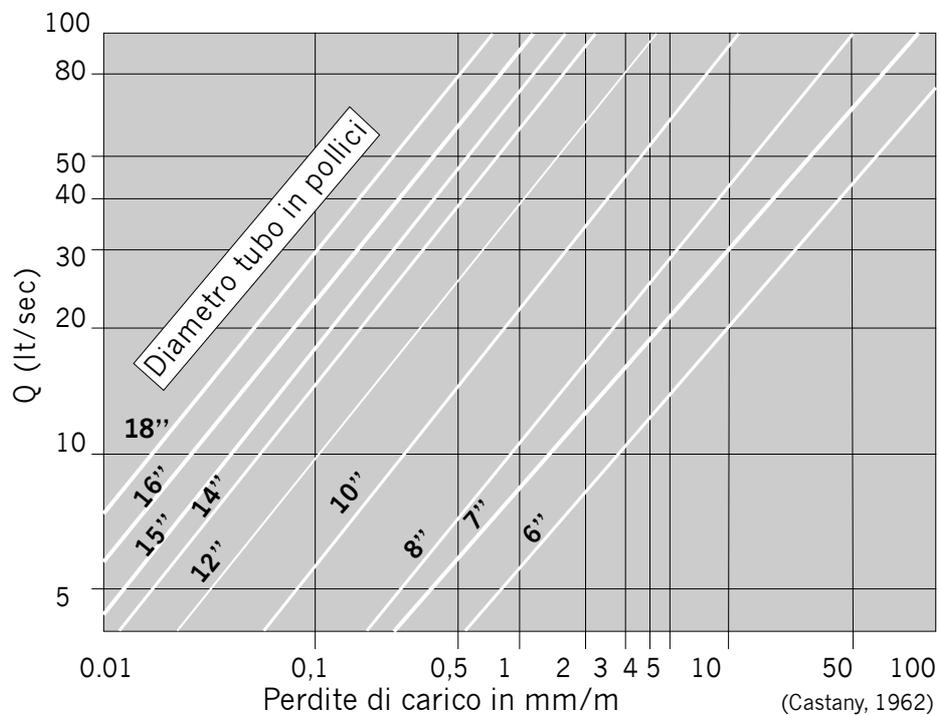


Fig. 12: Relazione tra le perdite di carico ed il diametro della tubazione di mandata, per diverse portate

e) perdite in ingresso nella pompa

si verificano quando il diametro della pompa è solo leggermente inferiore a quello del rivestimento

Interpretazione delle prove di portata

Foto 2: Prova di portata su acquifero confinato in sabbie medio-fini, 1: freatimetro, 2: piezometro; 3: sonda di livello in continuo (fase di scaricamento dati con porta infrarossi); 4: conducimetro



In letteratura esistono moltissimi metodi di elaborazione in base alle diverse tipologie acquifero pozzo, come descritti, ad esempio nel noto testo di Kruseman, de Ridder, Verweij (Analysis and evaluation of pumping test data), qui ne riassumiamo solo alcuni tra i più utilizzati.

Tabella 1: Sintesi dei metodi di elaborazione delle prove di portata

Prova in pozzo	
Parametri ricavabili tra parentesi	
Discesa	Regime di non equilibrio (T, Q specifica)
Risalita	Regime di non equilibrio (T, più precisa)
Prova a gradini	T (in risalita), Q specifica, Q critica, perdite di pozzo, efficienza

Prova su acquifero (con uno o più piezometri)		
Parametri ricavabili tra parentesi		
Discesa	Regime di equilibrio (T, Q specifica, R)	Regime di non equilibrio (T, Q specifica, R, S)
Risalita		Regime di non equilibrio (T, R)
Prova a gradini	T, Q specifica, efficienza pozzo, S, R	

In sintesi le prove possono essere fatte mettendo in funzione un pozzo e misurando abbassamenti e risalita nello stesso ed in uno o più piezometri intorno, oppure in un unico pozzo di produzione, sempre con misure in discesa e risalita.

Le misure in risalita si effettuano quando è stato raggiunto uno pseudo equilibrio e la pompa è stata spenta.

La prima tipologia di prove (prova su acquifero) è quella che fornisce i parametri più attendibili dell'acquifero (T, S, R); la seconda (prova in pozzo) si esegue soprattutto per conoscere le caratteristiche costruttive del pozzo e la sua efficienza, essa comunque permette di avere anche il valore di trasmissività dell'acquifero.

Metodi di interpretazione

Tra i numerosi metodi a disposizione, in base alle diverse tipologie acquifero-pozzo, si fornisce uno schema, assolutamente non esaustivo, di alcune delle metodologie applicate:

Regime di equilibrio (si effettuano con misure in discesa)	Metodo di Thiem (acquiferi confinati) Pozzo + piezometri (grafici s – logr) Parametri ricavabili: T, R, Qs $0,366 Q$ $T = \frac{\dots}{s} \log r_2/r_1$
	Metodo di Dupuit (acquiferi freatici) Pozzo + piezometri (grafici s – logr) Parametri ricavabili: T, R, Qs $0,733$ $K = Q \frac{\dots}{H^2 - h^2} \log r_2/r_1$
	Calcolo delle perdite di carico Pozzo + piezometri (grafici s – logr; s/Q – logr) Parametri ricavabili: T, R, Qs $0,366$ $s / Q = \frac{\dots}{T} \log r_2/r_1$

Regime di non equilibrio (si effettuano sia con misure in discesa sia in risalita, nel pozzo e nei piezometri)	Metodo di Theis (acquiferi confinati e/o freatici con abbassamento < 25% dello spessore dell'acquifero, uso di curve campione) Pozzo singolo o con piezometri Parametri ricavabili: Qs, T, S, R $s = Q W(u) / 4\Pi T \quad u = r^2 S / 4Tt$
--	---

	$R = \sqrt{4Ttu} / S$ (utilizzabile su pozzo e piezometri) Grafici: $\log 1/u - \log W(u)$ e $\log s - \log t$ Condizione di validità: $u < 0,05$
Regime di non equilibrio	Soluzione approssimata di Cooper-Jacob (acquiferi confinati e/o freatici con abbassamento < 25% dello spessore dell'acquifero) Pozzo singolo o con piezometri Parametri ricavabili: Q_s, T, S, R $0,183 Q$ $s = \frac{Q}{T} \log 2,25 Tt / r^2 S \quad u < 0,05$ Grafico s-logt: $T = 0,183 Q / s ; S = 2,25 Tt_0 / r^2 ; R = \sqrt{2,25 Tt_0 / S}$ t_0 tempo per $s = 0$ Grafico s-logr (2 o più piezometri) $T = 0,366 Q / s ; S = 2,25 Tt / r_0^2$ r_0 distanza per $s = 0$ (raggio di azione) Grafico s-logt/r ² (due o più piezometri) $T = 0,183 Q / s ; S = 2,25 T (t / r^2)_0$ $(t / r^2)_0$ valore per $s = 0$
Regime di non equilibrio	Metodo di Hantush (acquifero semiconfinato con acquitarzo senza fenomeno di immagazzinamento, uso di curve campione) Pozzo con uno o più piezometri Parametri ricavabili: Q_s, T, S, B, K' $s = Q W(u, r/B) / 4\pi T ; u = r^2 S / 4Tt;$ $B = \sqrt{T b' / K'}$ Grafico $\log 1/u - \log W(u, r/B)$ e $\log s - \log t$
Regime di non equilibrio	Metodo di Neuman (acquifero freatico con drenaggio ritardato, uso di curve campione) Pozzo con uno o più piezometri Parametri ricavabili: Q_s, T, S, S_y, K_h, K_v $s = Q W(u, \beta) / 4\pi T ; u = r^2 S / 4Tt$ $K_h = T/b ; K_v = \beta b^2 K_h / r^2 ;$ Grafico $\log 1/u - \log W(u, \beta)$; $\log s - \log t$

<p>Regime di non equilibrio</p>	<p>Metodo della risalita, soluzione di Jacob (recovery, acquifero confinato o freatico con abbassamenti < del 25 % dello spessore di acquifero) Pozzo con uno o più piezometri Parametri ricavabili: T $0,183 Q$ $T = \frac{s'}{\log(t/t')}$</p>
<p>Prova in pozzo a gradini di portata (non equilibrio)</p>	<p>Soluzione di Jacob Parametri ricavabili: Qs, C, WE, Qc $S = BQ + CQ^2$</p>

Regime permanente in acquifero confinato (Thiem)

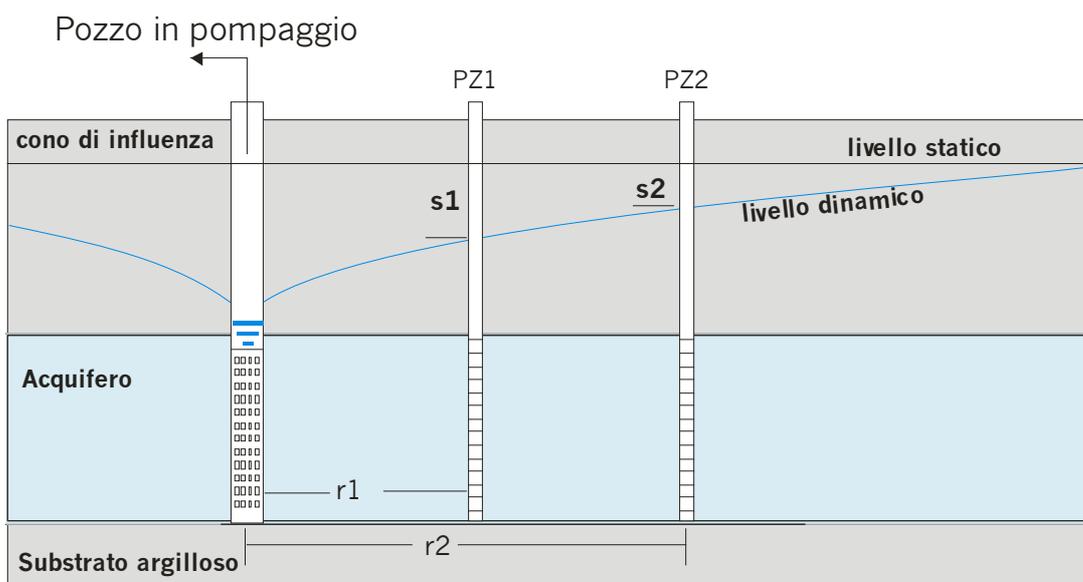


Fig. 13

La prova si effettua fino al raggiungimento della condizione di equilibrio, nella quale l'acqua estratta dal pozzo corrisponde a quella fornita dall'acquifero. Il tempo non compare quindi nelle formule e per ottenere questa condizione sono richiesti a volte giorni (almeno 1-2)

$$T = \frac{0,366 Q}{(s1-s2)} \log \frac{r2}{r1} \quad (\text{se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico, } \log \frac{r2}{r1} = 1)$$

Il raggio di azione può essere ricavato dal grafico s-logr (per s = 0, od s/Q = 0)

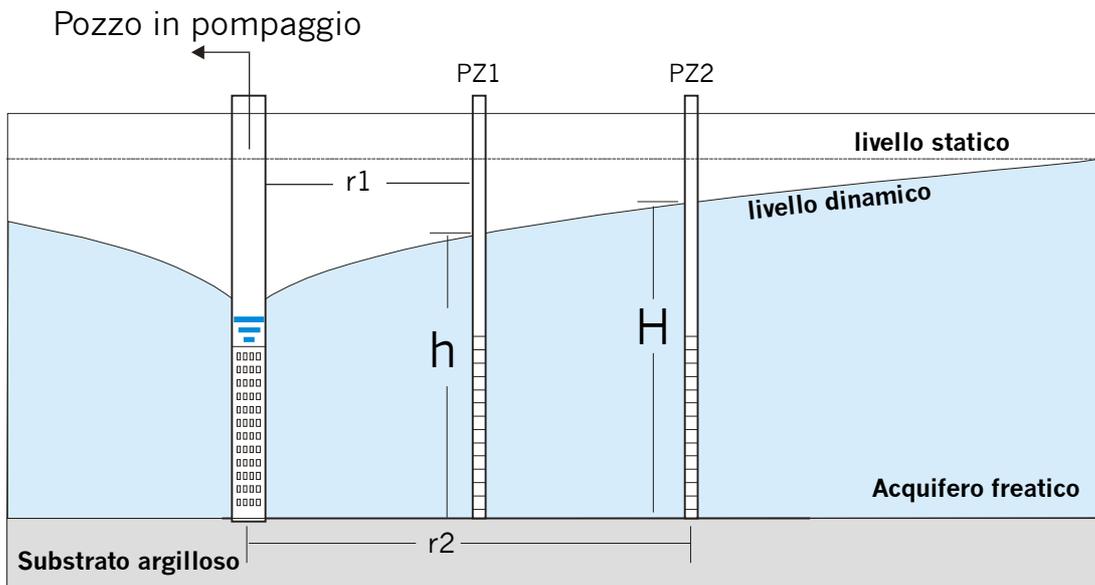
Regime permanente in acquifero libero (Dupuit)

Fig. 14

$$K = Q \frac{0,733}{H^2 - h^2} \log r_2/r_1 \text{ (se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico, } \log r_2/r_1 = 1)$$

E' consigliabile prendere H ed h rispetto alla base impermeabile dell'acquifero freatico.

Il raggio di azione può essere ricavato dal grafico s-logr (per s = 0)

L'applicazione di queste formule prevede alcune ipotesi restrittive sia per il pozzo sia per l'acquifero:

Condizioni di validità per il pozzo

- Deve essere completo fino al substrato impermeabile
- Il flusso verso i filtri è laminare con numero di Reynolds < 10 (velocità d'ingresso < 3-5 cm/sec)
- L'acqua pompata è scaricata all'esterno (senza che si reinfiltri nell'acquifero)
- Il diametro del pozzo è piccolo così da trascurare il volume d'acqua nel tubo e le perdite di carico
- La portata è costante
- Il regime è permanente, il tempo non compare, infatti, nelle formule, quindi Δs è costante, a parità di sollecitazione e non vi è contributo dall'immagazzinamento
- Gli abbassamenti sono piccoli, rispetto allo spessore saturo ($\Delta s \leq 0,15-0,25 H$)

Condizioni di validità per l'acquifero

- Deve essere confinato, omogeneo, isotropo, a spessore costante ed infinitamente esteso
- La sua potenza deve essere piccola rispetto all'estensione laterale, in pratica il raggio d'azione non deve essere influenzato da limiti alimentanti od impermeabili
- La falda è considerata piatta, all'inizio della prova
- È valida la legge di Darcy
- La componente verticale della velocità di flusso è trascurabile ($v_z = 0$)
- Le componenti orizzontali della velocità di flusso sono uguali ($v_x = v_y$)

Regime transitorio in acquifero confinato e freatico

Quando un pozzo in un acquifero infinito, è pompato a portata costante, il prelievo si estende radialmente nel tempo.

Il tasso di caduta del carico idraulico moltiplicato per il coefficiente d'immagazzinamento su tutta l'area d'influenza, eguaglia la ricarica dell'acquifero.

Poichè l'acqua prelevata deriva da una riduzione d'immagazzinamento dell'acquifero, il carico piezometrico continua a scendere dato che lo stesso è infinitamente esteso: si verifica una situazione di non equilibrio.

Col tempo gli abbassamenti interessano aree sempre più vaste e quindi diventano trascurabili, tanto che si possono utilizzare dei metodi d'approssimazione che permettono di ricavare S e T.

Questa procedura è preferita rispetto alle formule d'equilibrio per i seguenti motivi:

- Permette di ricavare S
- È sufficiente un periodo di pompaggio inferiore, dato che non serve raggiungere l'equilibrio con la ricarica
- È sufficiente solo un piezometro
- Non sono necessarie molte delle ipotesi restrittive del regime d'equilibrio

Ciononostante è utile ricordare che anche i metodi di soluzione in transitorio richiedono alcune condizioni di partenza:

- L'acquifero è omogeneo, isotropo, di spessore uniforme ed infinitamente esteso
- Prima del pompaggio la superficie piezometrica è piatta
- La portata durante la prova è costante e l'acqua prelevata interamente dall'immagazzinamento
- Il pozzo è completo ed il flusso in entrata attraverso i filtri è orizzontale per tutta la loro altezza
- Il diametro del pozzo è piccolo così da trascurare il volume d'acqua in esso contenuto
- L'acqua prelevata è scaricata immediatamente all'esterno

In pratica per l'interpretazione degli abbassamenti durante la prova di pompaggio, non si utilizzano le equazioni matematiche originarie, ma delle semplificazioni grafiche, che introducono solo errori trascurabili nel calcolo dei parametri (< 5%).

I metodi più noti sono:

Soluzione di Theis (si utilizzano curve campione)

Soluzione semplificata di Cooper-Jacob (si utilizza una formula approssimata)

Soluzione di Theis

Theis nel 1935, propose la seguente equazione per calcolare i valori di T ed S, mediante ausilio di curve campione (fig. 17):

$$s = Q W(u) / 4\pi T \quad \text{con } u = r^2 S / 4Tt$$

dove $W(u)$ è chiamata funzione di pozzo e viene fornita da tabelle. Si tratta di uno sviluppo in serie di una funzione esponenziale i cui termini diventano trascurabili quando t aumenta ed r decresce.

Il metodo prevede di costruire due grafici bilog, uno per le misure di campagna ($\log t - \log s$) ed uno per i valori di $\log 1/u - \log W(u)$. Il passo logaritmico per i due grafici deve essere uguale.

La curva di campagna si sovrappone a quella teorica mantenendo gli assi paralleli fino a trovare la migliore sovrapposizione. Si scelgono quindi due valori qualunque di $1/u$ e $W(u)$ e quelli ottenuti dalle intersezioni con gli assi della curva di campagna (s, t).

Si calcola quindi:

$$T = Q W(u) / 4\pi s$$

$$S = 4Ttu / r^2$$

Fig. 15: Curva di campagna (sinistra) e curva teorica

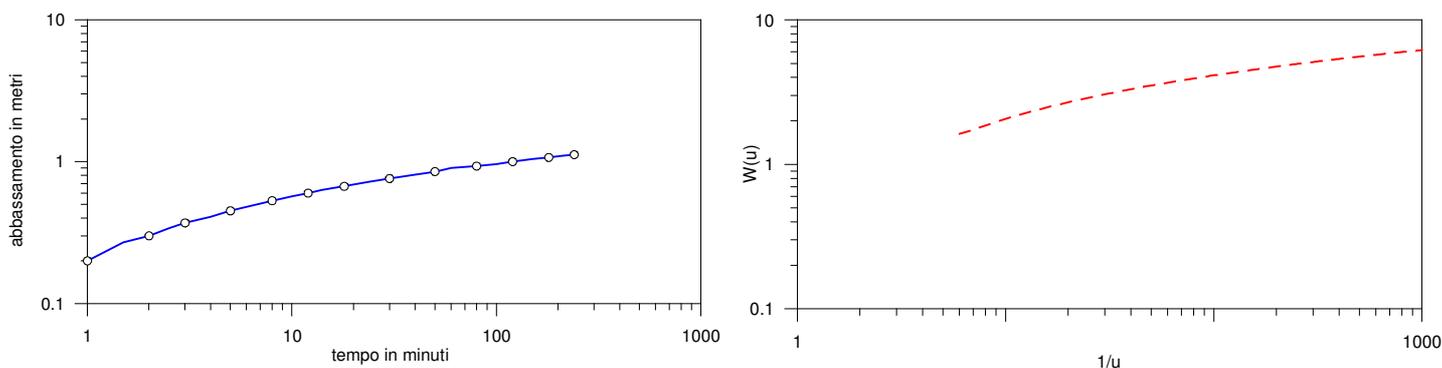
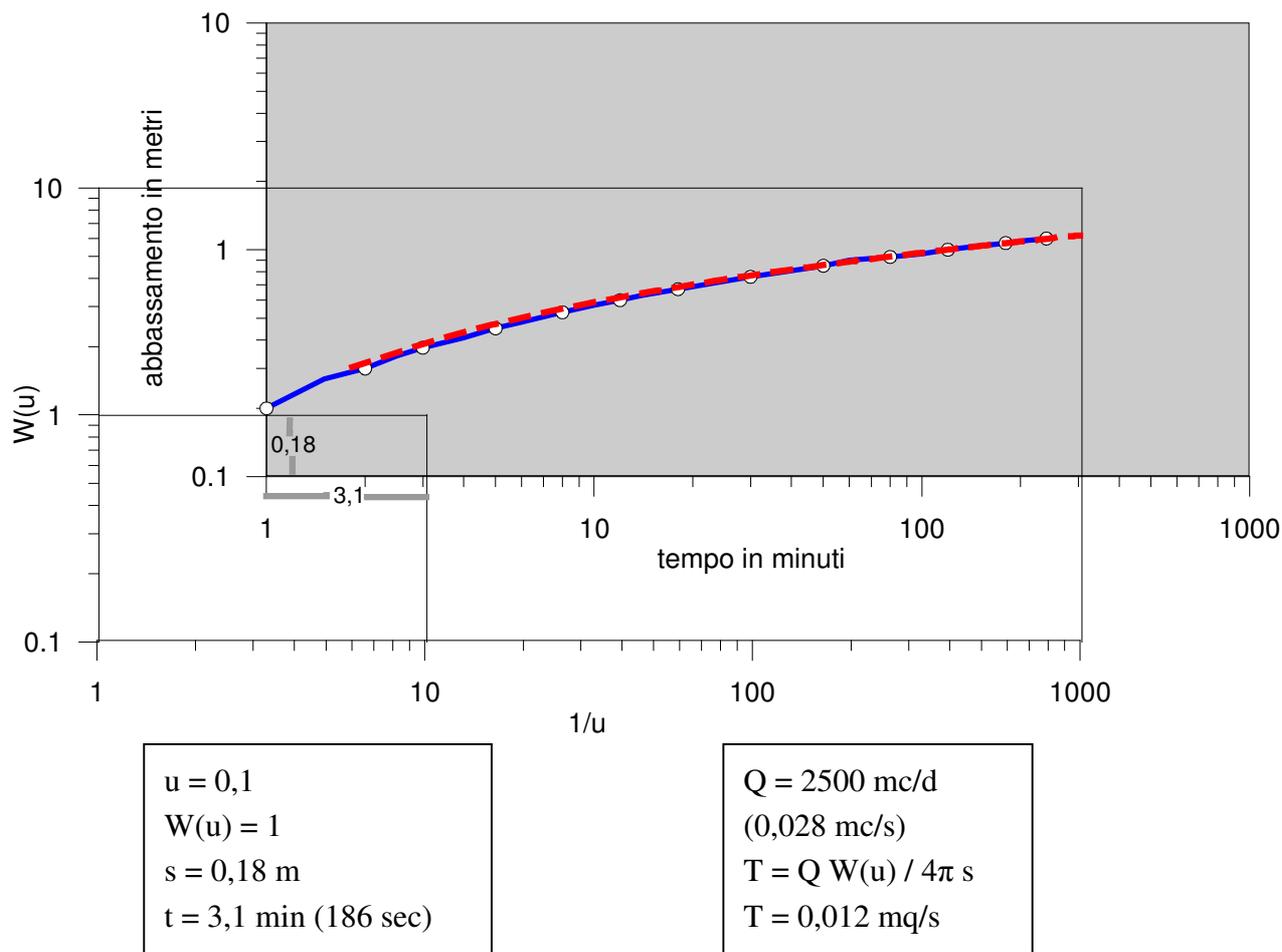


Fig. 16: curva teorica e di campagna sovrapposte



Qualora la sovrapposizione non sia buona i motivi possono essere dovuti a vari motivi tra cui:

- L'acquifero non è confinato
- L'acquifero è eterogeneo ed anisotropo
- Siamo vicini ad un limite a carico fisso
- Siamo vicini a uno o più limiti diversi

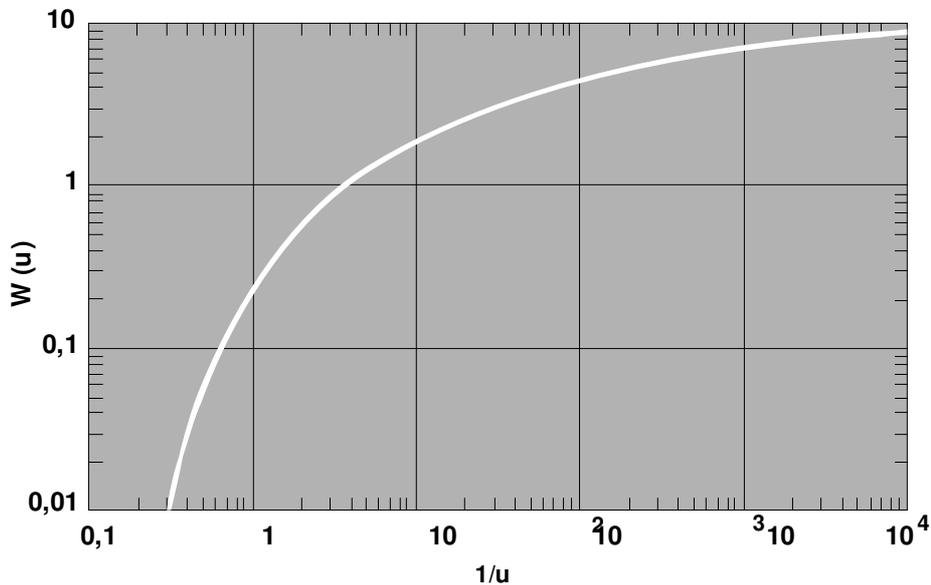


Fig. 17: Curva campione tipo Theis

Soluzione semplificata di Cooper-Jacob

L'equazione di Theis è stata semplificata da Cooper e Jacob per ricavare i parametri idrogeologici (T, S). Per valori piccoli di u ($u < 0,05$), tempi di pompaggio sufficientemente lunghi e piezometri vicini al pozzo, l'abbassamento diventa:

$$\Delta s = \frac{0.183 Q}{T} \log 2,25 Tt / r^2 S$$

Da cui si ricava T:

$$T = 0,183 Q / \Delta s \quad (\text{con } \Delta s \text{ misurato in un ciclo logaritmico})$$

le misure nel piezometro possono essere utilizzate per il calcolo dell'immagazzinamento:

$$S = 2,25 Tt_0 / r^2 \quad (\text{applicabile solo per il piezometro})$$

T = trasmissività; S = immagazzinamento; t_0 = tempo corrispondente a $\Delta s = 0$

Q = portata durante la prova; r = distanza pozzo piezometro

Il raggio di azione si ricava ponendo $\Delta s = 0$, cioè $R = 1,5 \sqrt{Tt / S}$

Il metodo di Cooper-Jacob, prevede un grafico semilog, con Δs in scala aritmetica ed il tempo in scala logaritmica. Nel costruire la curva è consigliabile inserire almeno 10 valori di Δs per ciclo log; l'immagazzinamento si ricava solo dalle misure sul piezometro.

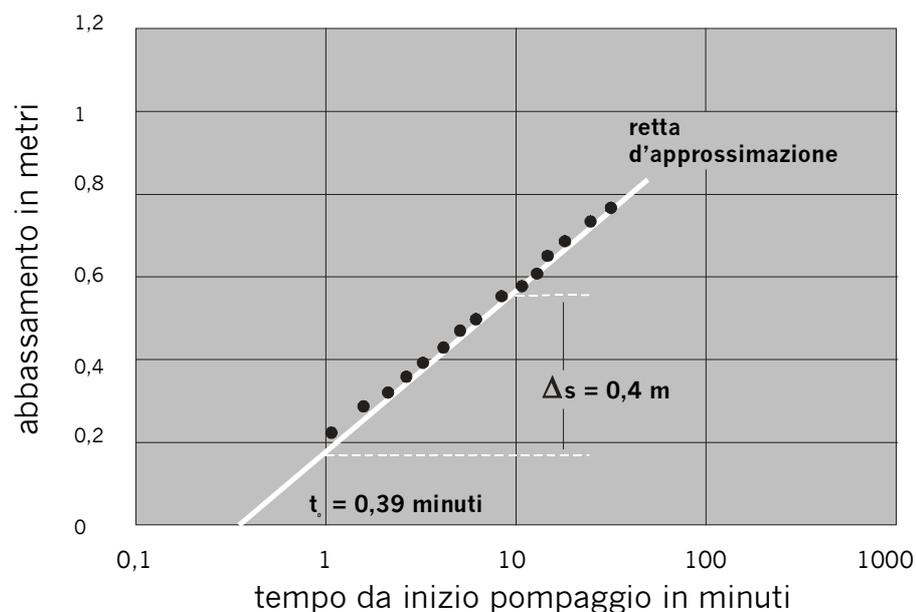


Fig. 18: grafico in discesa tempo-abbassamento per un piezometro, calcolo di t_0 e di Δs per un ciclo logaritmico

Il metodo di Cooper-Jacob si può utilizzare riportando i dati di campagna su grafici s -logr ed s -log t/r^2 , in questo caso si fissa il tempo per il quale costruire il grafico, riportando i valori di abbassamento (in ordinata) e logr (o log t/r^2) in ascissa per pozzo e piezometri.

La metodologia descritta si rivela utile in caso di evidente eterogeneità laterale, evidenziata dal fatto che, se la geometria della prova è corretta, gli abbassamenti ai piezometri distanti, non sono disposti lungo una linea.

Grafico $s - \log r$

$T = 0,366 Q / s$; (quando s è preso in un ciclo logaritmico)

$S = 2,25 T t / r_0^2$ r_0 distanza per $s = 0$ (raggio di azione)

Il raggio di azione si può calcolare graficamente.

Grafico s -log t/r^2 (due o più piezometri)

$T = 0,183 Q / s$; (quando s è preso in un ciclo logaritmico)

$S = 2,25 T (t / r^2)_0$ $(t / r^2)_0$ valore per $s = 0$

Elaborazione dei dati in fase di risalita (*recovery test*)

Al termine del pompaggio, i livelli nel pozzo e nei piezometri iniziano a risalire e le misure di livello dinamico si riferiscono agli abbassamenti residui.

Anche in questa fase della prova è utile registrare i dati, visto che le procedure permettono di ricavare T e quindi di avere un controllo dei valori ottenuti in fase di pompaggio.

La portata da inserire è quella della prova ed inoltre durante la fase di risalita la ricarica al pozzo è costante, mentre invece le misure in discesa sono influenzate dal fatto che la portata di prelievo è sempre leggermente variabile.

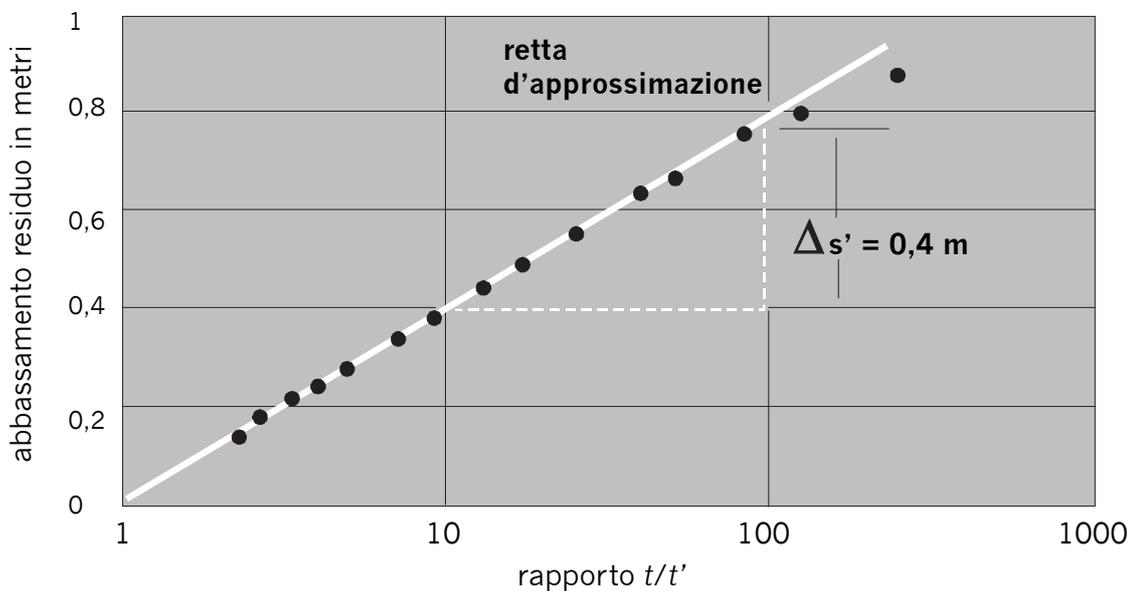
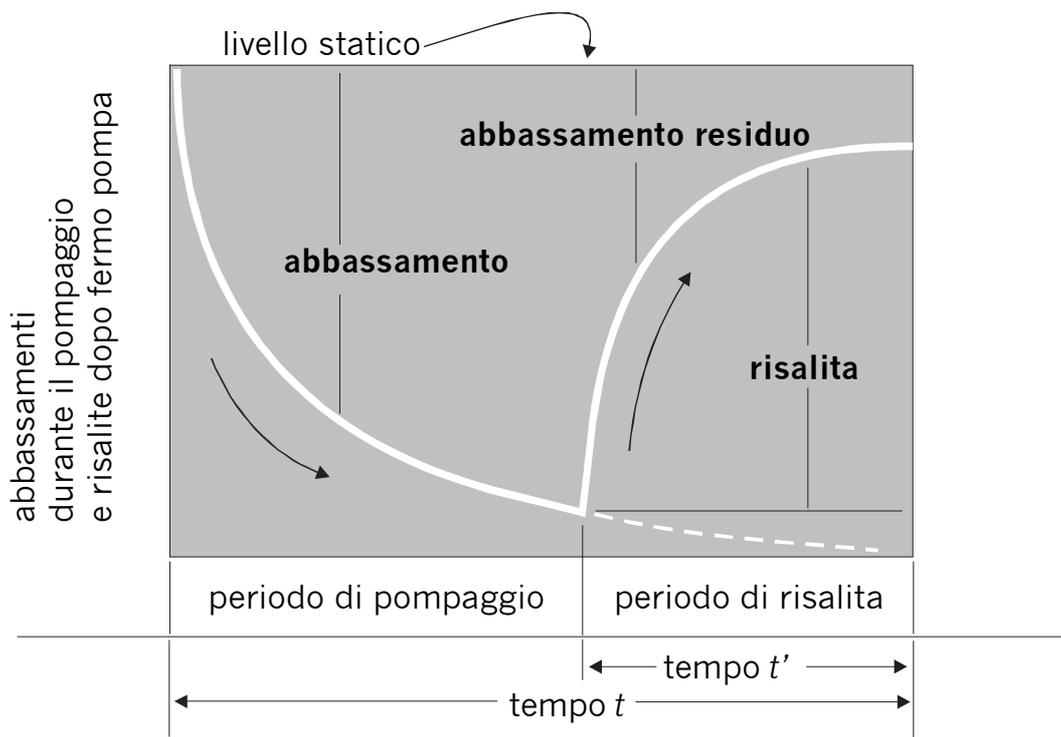
I valori di T ottenuti nel solo pozzo in pompaggio, durante la risalita, sono più attendibili di quelli ricavati dalle misure in fase d'abbassamento.

L'equazione deriva da quella di Jacob:

$$\Delta s' = \frac{0.183 Q}{T} \log t / t'$$

Con $\Delta s'$ = abbassamento residuo; t' = tempo da inizio risalita (da quando viene spenta la pompa); t = tempo totale di prova (da inizio discesa a recupero finale del livello statico)

Fig. 19: Abbassamento e risalita in un pozzo durante la prova di portata in transitorio



Elaborazione dei dati durante la prova di risalita

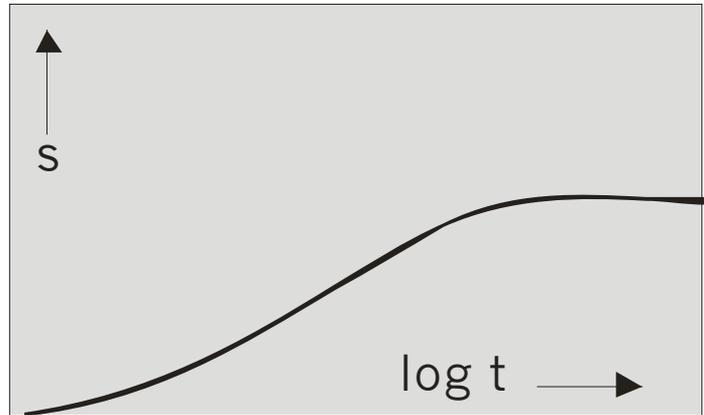
Fig. 20: Grafico di risalita in un pozzo al termine della prova di portata in transitorio

Nel grafico semilog va riportato in ascissa il rapporto t/t' ed in ordinata l'abbassamento residuo.

Regime transitorio in acquifero semiconfinato (metodo di Hantush)

Molti acquiferi che sembrano confinati ad un primo esame della stratigrafia, risultano, durante le prove, essere di tipo semiconfinato (leaky). Una curva s-log t ha la forma del grafico in figura 20, a seconda della durata della prova e delle caratteristiche dell'acquifero.

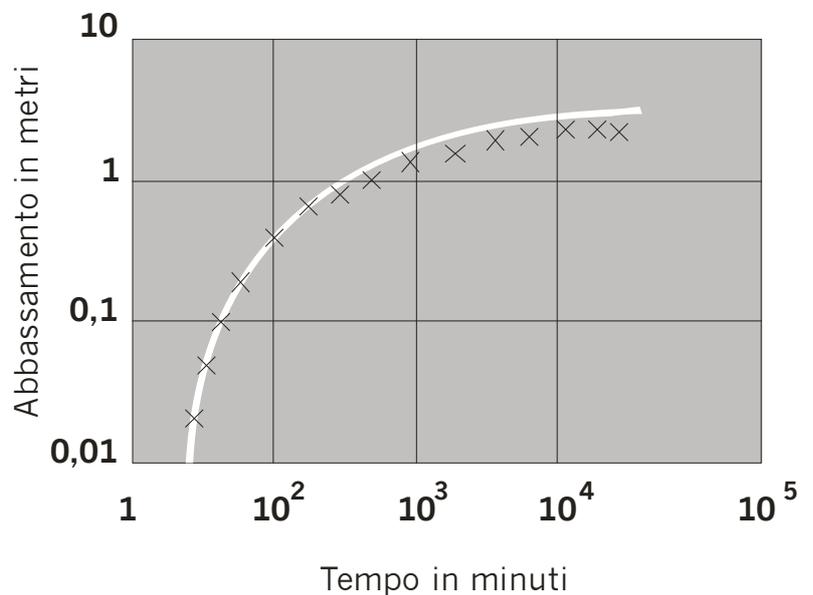
Fig. 21: curva abbassamento – logaritmo del tempo, durante una prova che ha interessato un acquifero semiconfinato, il tratto orizzontale indica un apporto proveniente dall'immagazzinamento dell'acquitrando, o da un acquifero soprastante.



Il fenomeno si può verificare ad esempio quando il pozzo richiama acqua, attraverso l'acquitrando, da un acquifero freatico superiore, oppure è lo stesso acquitrando che la fornisce.

In entrambi i casi, l'interpretazione con il metodo di Theis non è possibile a causa di una cattiva sovrapposizione delle curve teorica e di campagna.

Fig. 22: scostamento della curva di campagna da quella teorica di Theis ricavata per acquifero confinato. Una situazione di questo tipo può indicare la presenza di acquifero tipo "leaky".



Durante la prova è come se la portata della pompa diminuisse e così pure il tasso di abbassamento al pozzo.

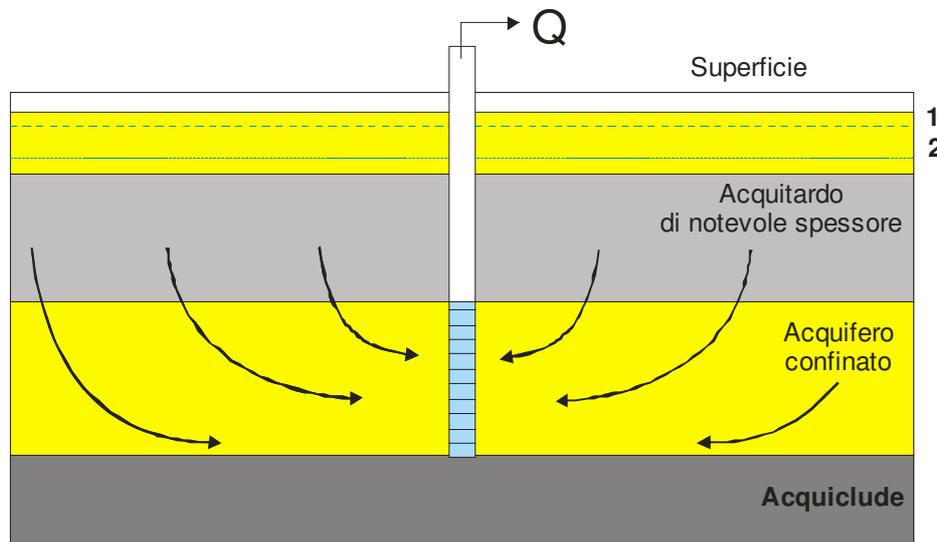


Fig. 23: il fenomeno della rialimentazione del pozzo può essere dovuto ad un rilascio di acqua proveniente direttamente dall'acquitarzo, se questo ha un notevole spessore; 1 = livello piezometrico dell'acquitarzo, 2 = livello piezometrico dell'acquifero confinato in fase di pompaggio

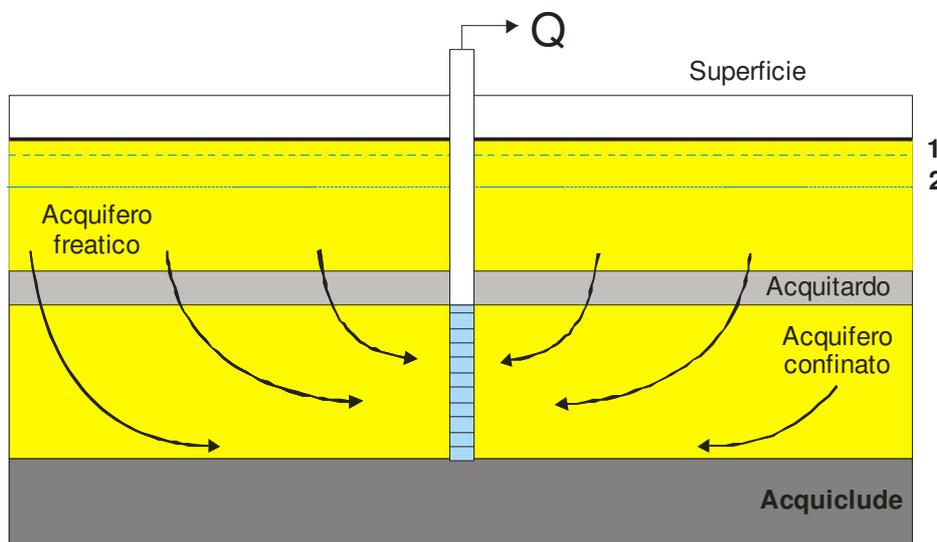


Fig. 24: in questo caso la rialimentazione passa attraverso l'acquitarzo che ha uno spessore limitato e funge solo da setto di trasmissione a bassa permeabilità; 1 = livello piezometrico del freatico, 2 = livello piezometrico dell'acquifero confinato

Per il caso in cui l'acqua provenga da un acquifero superiore attraverso un setto semipermeabile sono disponibili le curve campione Hantush-Jacob. Il metodo è simile a quello di Theis, basato sulla sovrapposizione della curva di campagna a quella teorica. In questo caso la funzione del pozzo è $W(u, r/B)$ e l'equazione generale:

$$s = Q W(u, r/B) / 4\pi T \quad ; \quad u = r^2 S / 4Tt; \quad B = \sqrt{T b'/K}$$

Una volta scelta la curva che meglio si sovrappone a quella di prova, si ricava anche quella teorica caratterizzata dal particolare valore r/B (fig. 25).

Le condizioni di validità sono analoghe a quelle per il metodo di Theis con in più che l'acquifero non fornisce acqua al pozzo ($S = 0$) ed è incompressibile

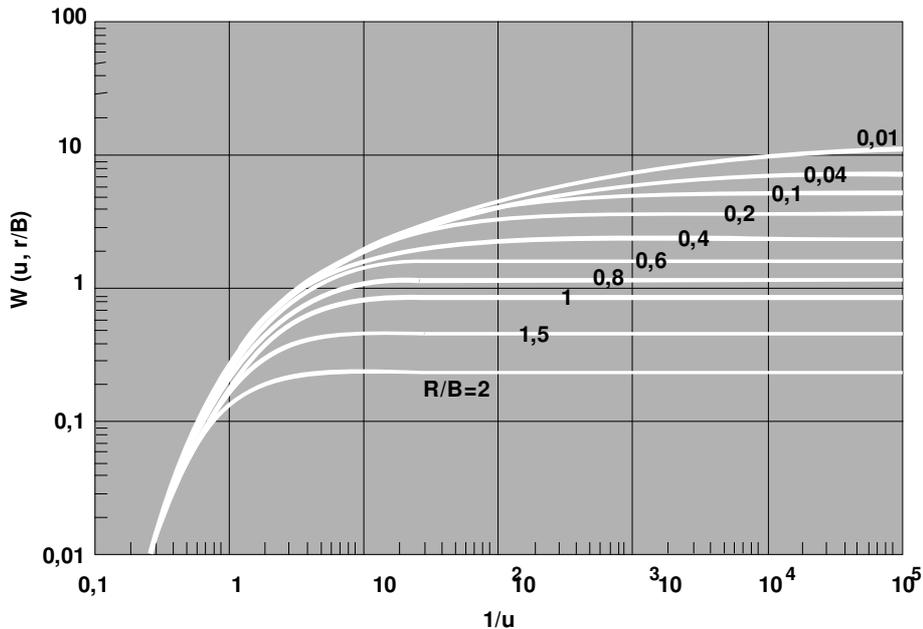


Fig. 25: Curva campione tipo Hantush - Jacob

Regime transitorio in acquifero freatico (drenaggio ritardato, metodo di Neuman)

Gli acquiferi freatici presentano la caratteristica del fenomeno conosciuto come “delayed yield” o drenaggio ritardato. All’inizio del pompaggio l’acqua estratta determina un abbassamento di livello che corrisponde all’immagazzinamento elastico (riassetamento dei granuli e dilatazione dell’acqua stessa).

Si tratta di un fenomeno temporaneo e simile a quello che avviene nell’acquifero artesiano. Il volume prelevato inizialmente è quindi piccolo e come conseguenza si forma una estesa frangia capillare e non un vero e proprio livello inteso come superficie di depressione dinamica continua. La curva di campagna mostra un primo tratto che può essere interpretato con il metodo di Theis.

Continuando la prova i pori del terreno al di sopra del cono di depressione si desaturano progressivamente fornendo un apporto ulteriore al pozzo che registra pertanto un calo nel tasso di abbassamento, nonostante la portata non sia aumentata (delayed yield). La curva registra un tratto meno inclinato.

Oltre questa fase, il drenaggio verticale verso il cono di depressione può raggiungere l’equilibrio con la sua espansione laterale e la curva ritorna ad avere una pendenza simile a quella iniziale.

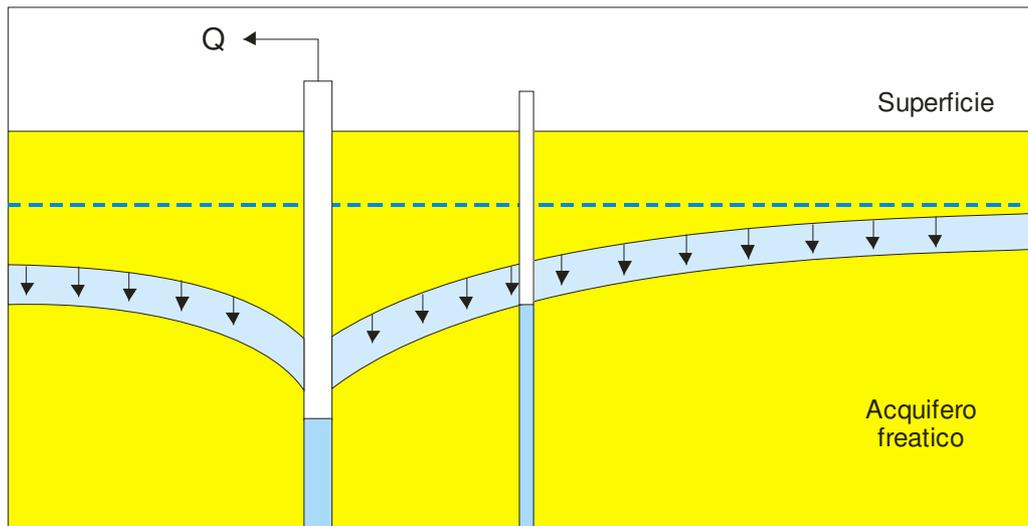


Fig. 26: negli acquiferi freatici caratterizzati da una porosità efficace, la progressiva desaturazione del terreno all'interno del cono di depressione richiede un certo tempo; inizialmente si forma pertanto una specie di frangia capillare superiore che drena verso la superficie del cono di pompaggio producendo una rialimentazione del pozzo; proseguendo il pompaggio, l'espansione del cono si rallenta, favorendo il ritorno ad un equilibrio tra portata emunta e portata dell'acquifero

Il valore di S calcolato con l'utilizzo del tratto iniziale della curva di campagna, prima dell'inizio del fenomeno del delayed yield, è la storatività ($S = S_{sb}$) e non la porosità efficace (S_y), ha quindi valori molto bassi e non tipici dell'acquifero freatico. I valori di S e T più significativi sono quelli ricavati al termine del fenomeno e che si riferiscono all'acquifero freatico vero e proprio.

I fattori che possono influenzare i valori iniziali di abbassamento sono:

- Variazioni di S causati dal delayed yield
- Espansione dell'acqua al di sotto del livello di falda
- Componenti verticali della velocità
- Una diminuzione progressiva di spessore della zona saturata
- Eterogeneità ed anisotropia dell'acquifero

L'esame dei grafici permette di riconoscere abbastanza facilmente l'acquifero freatico ed il fenomeno su descritto e Neuman ha prodotto una serie di curve campione con le quali è possibile separare l'immagazzinamento elastico iniziale (S) dalla porosità efficace.

Applicando ancora una volta la procedura di sovrapposizione della curva di campagna a quella teorica, si utilizzano curve di due tipi: A e B.

Le prime si sovrappongono al tratto iniziale della curva di campagna e danno un valore di T ed S , le seconde si sovrappongono al tratto finale, e danno un secondo valore di T (simile al precedente) ed un valore di S_y (porosità efficace).

Neuman ha elaborato le seguenti equazioni per il calcolo dei parametri idrogeologici:

$$s = Q W(u, \beta) / 4\pi T ; \quad u = r^2 S / 4Tt \quad K_h = T/b; \quad K_v = \beta b^2 K_h / r^2 ;$$

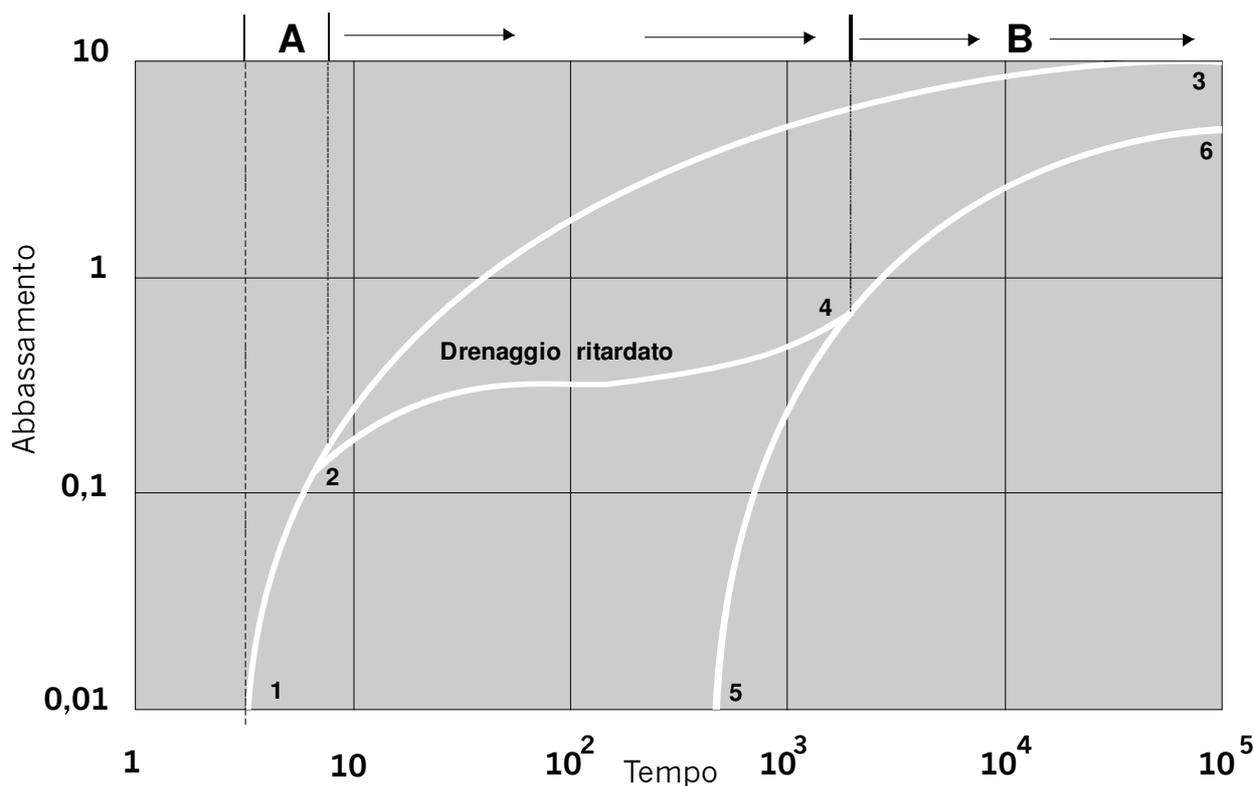


Fig. 27: Il grafico mostra lo spostamento della curva teorica di Theis, a seguito del fenomeno dello drenaggio ritardato (delayed yield) nelle prove su acquiferi freatici. Il tratto di curva 1-2-3 è quello di Theis se l'acquifero fosse confinato e si sovrappone a quello di campagna solo all'inizio (1-2); il tratto 2-3 rappresenta l'inizio e la fine del fenomeno; il tratto 5-4 indica come la curva di Theis è stata spostata e rappresenta la risposta dell'acquifero freatico; il tratto 1-2 si utilizza per ricavare S , mentre quello 4-6 per la porosità efficace

I dati finali di abbassamento se superiori a 10-25% dello spessore dell'acquifero andrebbero corretti (Jacob), inserendo il valore che risulta dalla formula:

$$s'' = s - s^2 / b \quad (s'' = \text{abbassamento corretto}; \quad s = \text{abbassamento misurato}; \quad b = \text{spessore acquifero})$$

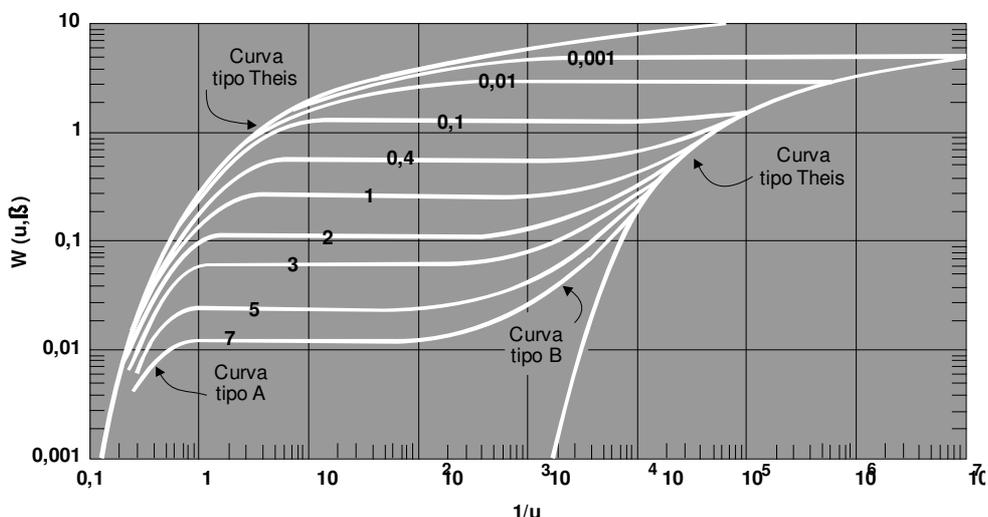


Fig. 28: Curva campione tipo Neuman

Prove in pozzo

Questo tipo di prova viene effettuata di norma in un pozzo di produzione messo in pompaggio per portate variabili e periodi costanti di tempo (Clark).

La prova é eseguita principalmente per prevedere gli abbassamenti a diverse portate (anche leggermente superiori a quelle di uso normale), per conoscere l'efficienza del pozzo (buona esecuzione) e ricavare alcuni parametri dell'acquifero.

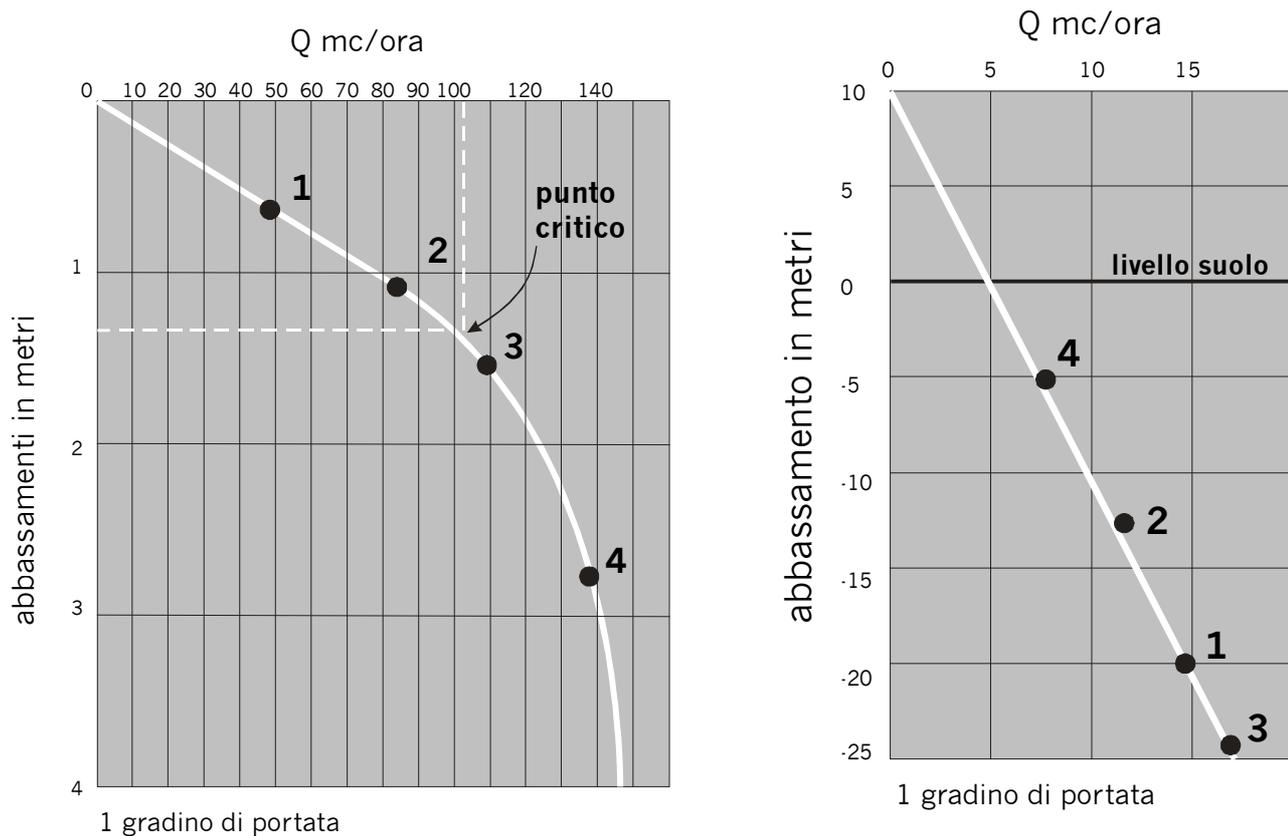


Fig. 29: curva abbassamento – portata per un acquifero freatico (a sinistra) e per un acquifero artesiano (a destra); nel caso del freatico è evidenziata la portata critica, oltre la quale gli abbassamenti aumentano in modo esponenziale; la portata di utilizzo è bene sia circa 1/3 minore

La fig. 26 mostra una delle prove più semplici che possono essere eseguite e che determina la curva caratteristica del pozzo. Da essa è possibile ricavare la portata specifica ($Q_s = Q/\Delta s$) per ogni gradino di portata.

Ripetendo la prova a distanza di tempo (ad esempio ogni anno) si può evidenziare il progressivo deterioramento dei filtri evidenziato dalla diminuzione della portata specifica.

L'abbassamento di livello in un pozzo è funzione principale di due fattori:

- Abbassamento causato dall'acquifero (legge logaritmica)
- Abbassamento causato dalle perdite in pozzo (legge esponenziale)

- Il calo di livello associato alle perdite in pozzo, è dovuto al flusso turbolento causato dall'alta velocità nei diversi mezzi in cui si muove l'acqua durante il pompaggio (acquifero, dreno, filtro, tubo di rivestimento, tubo pompa). In prima approssimazione esso è proporzionale al quadrato della portata.

Il valore di s_w che noi misuriamo nel pozzo è quindi:

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (\text{equazione caratteristica del pozzo Rorabaugh})$$

con BQ perdite di formazione e CQ^2 perdite di pozzo

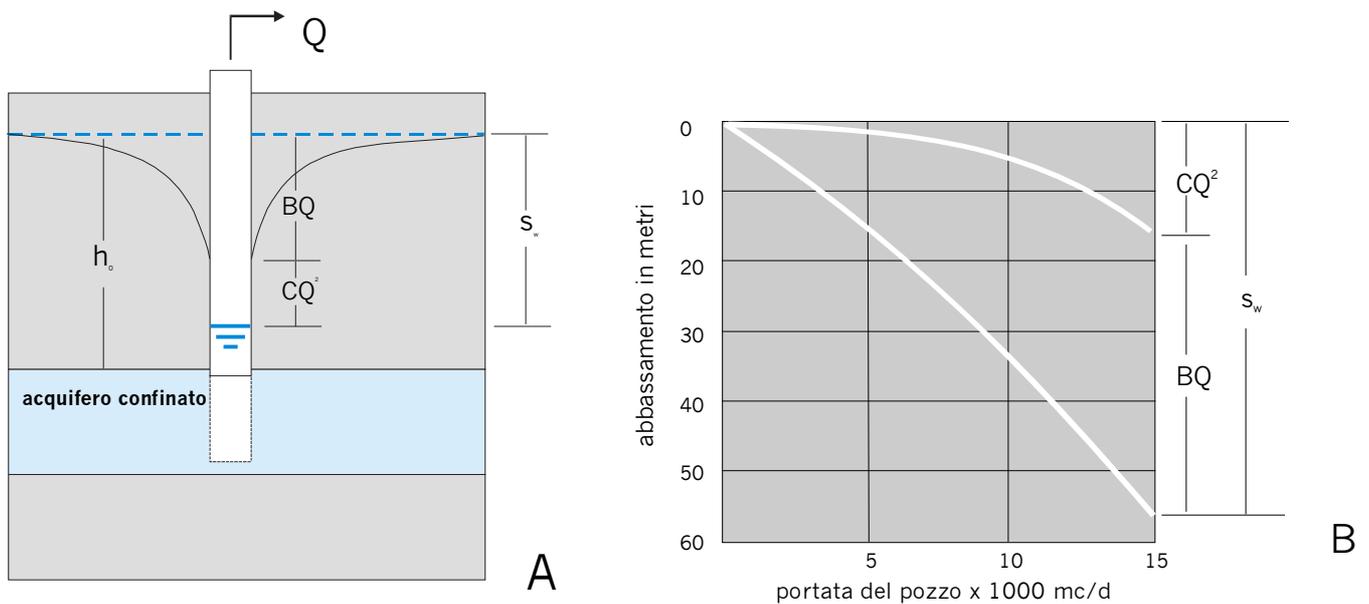


Fig. 30: schema del cono di depressione durante la prova di portata (a sinistra) e grafico corrispondente (a destra); BQ è l'abbassamento lineare dovuto all'acquifero, mentre CQ^2 è quello dovuto al flusso turbolento causato dall'opera

se ora consideriamo, ad esempio le classiche formule di Thiem o Dupuit, che esprimono la portata:

$$T = \frac{0,366 Q}{(H - h_w)} \log r_2/r_1 \quad (\text{Thiem})$$

$$K = \frac{0,733 Q}{H^2 - h_w^2} \log r_2/r_1 \quad (\text{Dupuit})$$

H = altezza falda in quiete, sopra il substrato

h_w = altezza falda nel pozzo, sopra il substrato

si può notare che Q varia di poco al variare del raggio del pozzo (r_w), per esempio raddoppiando il raggio, la portata aumenta solo del 10%.

Quando però consideriamo le perdite in pozzo, l'effetto è molto più significativo.

Raddoppiando il raggio, si riducono le velocità d'ingresso di circa la metà, le resistenze di circa un terzo e l'area del pozzo aumenta di quattro volte.

Diametro	2D	3D	4D	6D	8D
Portata	1,12 Q	1,19 Q	1,25 Q	1,35 Q	1,43 Q

Aumentando il diametro del pozzo, la portata aumenta solo di poco, infatti facendo riferimento alle formule precedenti (Dupuit, Thiem, Jacob ecc.) se raddoppiamo il diametro, la portata aumenta solo di 1,12, come si può vedere dalla tabella in alto. Aumentare il diametro del pozzo serve comunque a ridurre le perdite di carico e mantenere un flusso più laminare.

Quando le portate sono elevate le perdite di carico costituiscono una frazione importante di quelle totali, come è visibile in figura.

E' evidente che un pozzo ben costruito minimizza tali perdite e riduce l'intasamento dei filtri nel tempo.

Walton suggerisce alcuni valori del coefficiente C per giudicare l'efficienza di un pozzo:

Relazioni tra perdite di carico e condizioni del pozzo (Walton, 1970)

Coefficiente C sec^2/m^5	Condizioni del pozzo
< 1800	Ben progettato e sviluppato
1800 – 3600	Leggero intasamento od invecchiamento
3600 – 14400	Grave intasamento od invecchiamento
> 14400	Difficile da recuperare ai valori iniziali

Per valutare le perdite in pozzo e quindi la sua corretta costruzione, si effettua una prova di portata a gradini, calcolando:

- L'abbassamento specifico s/Q
- I coefficienti B e C
- L'efficienza

$$E = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \cdot 100$$

e costruendo i grafici a scala aritmetica:

- Tempo-abbassamento, per diversi gradini
- Abbassamento-portate
- Abbassamento specifico-portate

Il valore di E dovrebbe mantenersi al di sopra del 60% - 70%

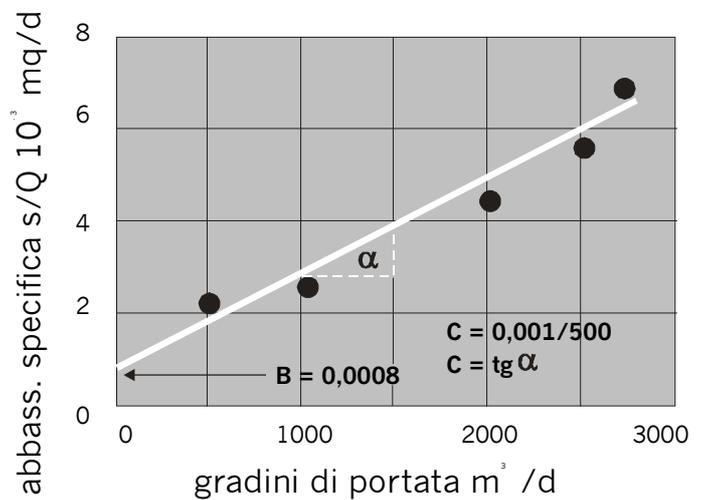
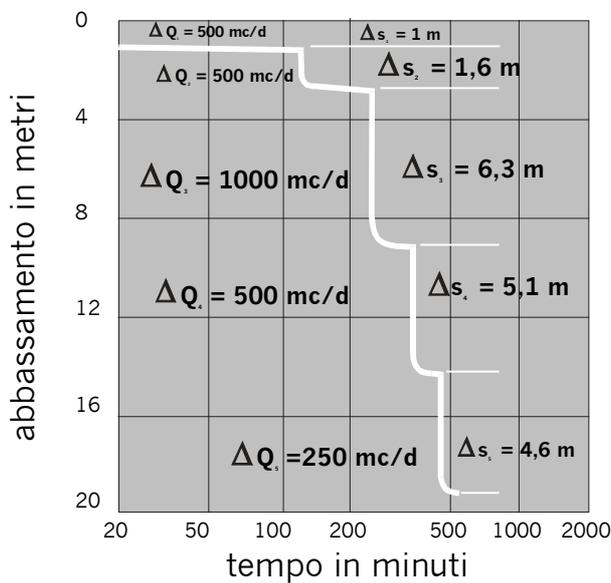


Fig. 31: Grafico della prova a gradini (a sinistra) e calcolo dei coefficienti B, C (a destra); il valore di B corrisponde all'ordinata della retta, mentre C è il suo coefficiente angolare; nel caso in figura, l'equazione del pozzo è $s = 0.0008Q + 0.000002Q^2$ e l'abbassamento può essere calcolato per le diverse portate estratte.

Come analizzare una prova di pompaggio

*“E’ un errore madornale
teorizzare senza dati oggettivi,
involontariamente uno inizia
ad adattare i fatti alle ipotesi
e non le ipotesi ai fatti”
(Sherlock Holmes)*

In linea generale l’analisi dei dati di una prove di portata segue le seguenti fasi:

A. Sviluppo del modello concettuale

Il modello concettuale trasferisce gli elementi del flusso sotterraneo, che rappresentano una situazione reale molto complessa (eterogenea ed anisotropa in molti casi) in uno schema semplice ed adatto alla formulazione matematica.

Gli aspetti pratici da considerare sono i seguenti:

- Che tipo di acquifero stiamo testando? Quale è la sua geometria? E’ isotropo ?
- Quali sono le caratteristiche del pozzo ? quale il suo grado di completamento ?
- Quali sono le portate estratte ? (costanti, variabili ?)
- Nel caso di una prova K, quale è la variazione iniziale di livello, quale il livello statico, è presente un filtro in ghiaia? Di che porosità ?
- L’acquifero è infinito ?, c’è una ricarica ? quali sono le condizioni al contorno ? vi sono altri pozzi in pompaggio nelle vicinanze che possono influenzare la prova ? come è distribuita la piezometria ?, c’è un gradiente naturale della falda ?
- La pressione barometrica può influenzare le misure ? o le oscillazioni di marea ?

B. Inserimento dei dati

- Controllare i dati presi durante la prova (manualmente o tramite data logger) omogeneizzarli ed inserirli in una tabella

C. Costruire il grafico (ad es. tempo-abbassamento) e paragonarlo a delle curve campione per evidenziare eventuali anomalie o caratteristiche particolari (tipo di acquifero, drenaggio ritardato, presenza di limiti permeabili, impermeabili ecc.); alcuni software utilizzano allo scopo dei diagrammi diagnostici e l’analisi derivata:

- i diagrammi a flusso radiale identificano l'entità dell'immagazzinamento in pozzo, il flusso in un acquifero infinito e gli effetti dei limiti;
- i diagrammi a flusso lineare evidenziano un flusso lineare, come per esempio quello iniziale lungo una frattura;
- l'analisi derivata (derivata dell'abbassamento rispetto al tempo) evidenzia alcune caratteristiche idrauliche come: immagazzinamento del pozzo, drenaggio ritardato, doppia porosità, flusso radiale in acquifero infinito

a questo punto, si esaminano nuovamente i dati stratigrafici e se necessario, si modificano le ipotesi di partenza.

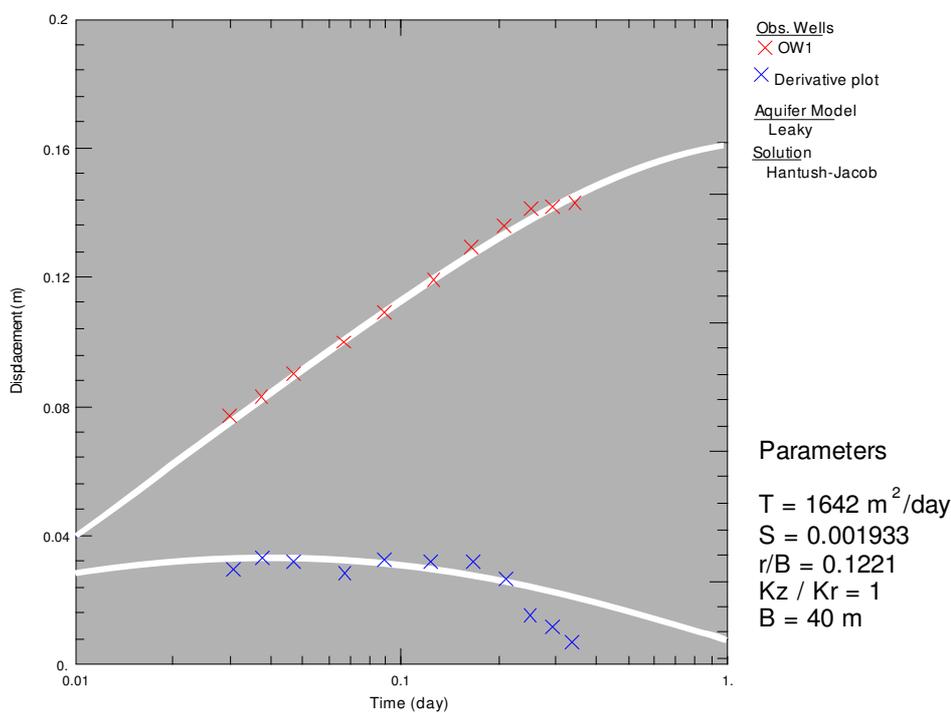


Fig. 32: il grafico mostra l'interpretazione di una prova di portata su acquifero semiconfinato (leaky), con il metodo Hantush-Jacob; la curva di campagna (simboli rossi) tende ad appiattirsi per tempi lunghi, mentre la derivata si abbassa, indicando la possibilità di una ricarica; i valori iniziali sono allineati mentre la curva derivata è sub orizzontale indicando un flusso di tipo radiale (Aqtesolv)

D. Scegliere le procedure e le formule adatte alla particolare situazione e valutare le proprietà idrogeologiche anche tramite confronto con curve campione; sovrapporre manualmente la retta ad un tratto rappresentativo della curva di campagna; alcuni software suggeriscono il metodo di interpretazione più idoneo in base ai risultati precedenti ed effettuano una stima automatica;

E. Valutare l'attendibilità del risultato, tramite parametri statistici (deviazione standard, varianza, differenza tra valore misurato e simulato)

I grafici semilog tempo-abbassamento permettono di identificare i diversi acquiferi ed alcune delle condizioni idrauliche al contorno e la loro utilità si rivela quando il modello concettuale di partenza si discosta dalla tipologia di acquifero risultante dalla prova. In questo caso è necessario modificare le ipotesi e scegliere un diverso metodo di interpretazione dei dati.

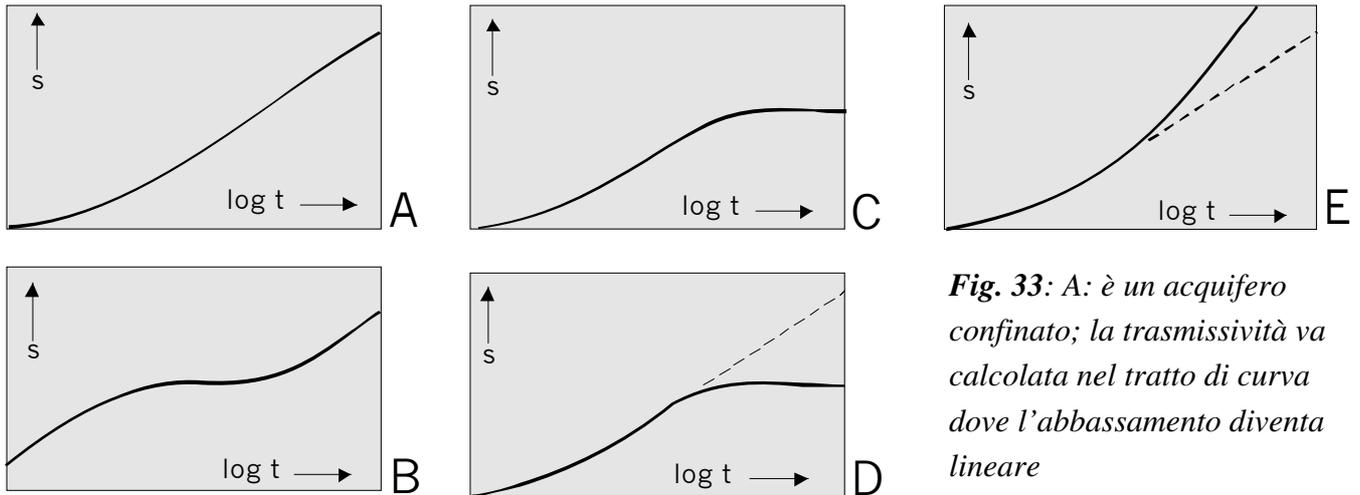


Fig. 33: A: è un acquifero confinato; la trasmissività va calcolata nel tratto di curva dove l'abbassamento diventa lineare

B: è un acquifero freatico; il tratto orizzontale intermedio è dovuto al fenomeno dello drenaggio ritardato (delayed yield)

C: è un acquifero semiartesiano; l'inizio del grafico è simile a quello dell'artesiano, in seguito al pompaggio prolungato inizia la ricarica dell'acquifero superiore attraverso l'acquitarzo

D: è un acquifero confinato (vedi A), in pompaggio, al quale si sovrappone un limite di ricarica

E: è un acquifero confinato (vedi A), al quale si sovrappone un limite impermeabile

Utilizzo di un modello numerico

Un altro metodo interessante di analizzare l'attendibilità dell'interpretazione della prova e quello di ricorrere ad un modello numerico.

L'esempio descrive una prova di portata su acquifero artesiano. Il pozzo è completo, preleva 1000 mc/d e le misure di abbassamento sono effettuate in un piezometro a 100 m di distanza. Lo spessore dell'acquifero è di 12 m, con il tetto a -3 m ed il letto a -15 m. La prova viene fermata dopo 790 minuti di pompaggio, senza quindi raggiungere l'equilibrio (regime transitorio).

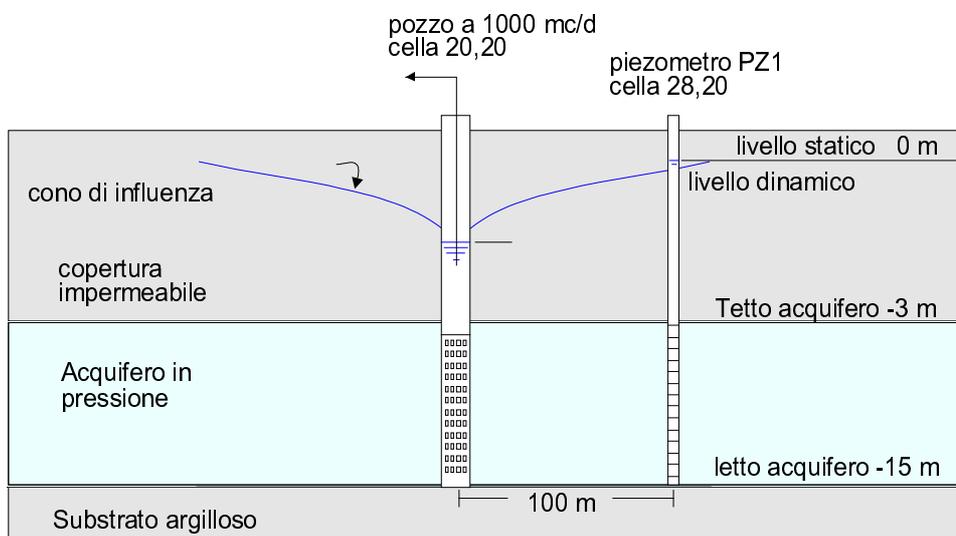


Fig. 34: schema della prova su acquifero

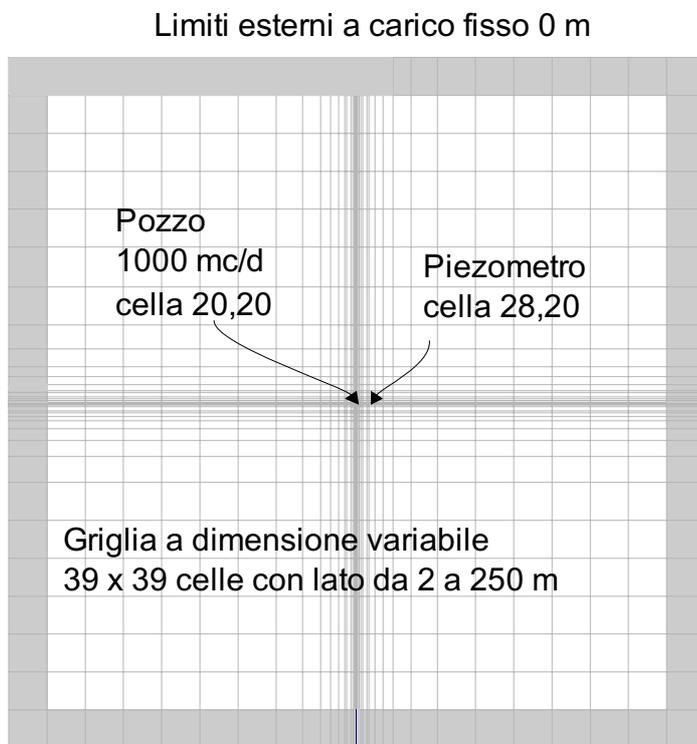
L'interpretazione corretta del tratto finale della curva di campagna, mediante la formula approssimata di Cooper-Jacob (vedi anche curva 2 in fig. 37) fornisce:

$$T = 201 \text{ mq/d}$$

$$S = 0.000097$$

Volendo controllare la bontà del risultato possiamo utilizzare un codice bidimensionale (ASM di Chiang, Kinzelbach, Rausch) inserendovi i parametri ricavati dalla prova e simulando le caratteristiche fisiche (in questo caso abbastanza semplici).

Per ridurre l'effetto dei limiti è stata simulata un'area molto grande intorno al pozzo.



L'acquifero è confinato, isotropo ed omogeneo, con pianta quadrata di 4533 m di lato, le celle sono di dimensione variabile con rapporto vicino ad 1,5. Il nodo corrispondente al piezometro è posto esattamente a 100 m da quello del pozzo, verso est. Le due simulazioni sono in regime transitorio, per un periodo di 790 minuti, diviso in 13 passi di tempo di durata variabile secondo un fattore di 1,25. Mediante il modulo Graphs – Drawdown si possono controllare gli abbassamenti nel tempo, alla cella 28,20 (PZ1), poi riportati a fianco della curva di campagna per un confronto.

Fig. 35: griglia alle differenze finite

Il risultato della simulazione con ASM, e l'andamento della piezometria dinamica sono visibili nella fig. 36. Gli abbassamenti vanno da 0 a 6,8 m (al pozzo in pompaggio). In questa simulazione i limiti sono a notevole distanza (2266 m), l'estrazione dell'acqua dal pozzo è supposta istantanea ed è trascurato l'immagazzinamento del pozzo. Le celle a maglia variabile permettono di avere piccole dimensioni dove sono maggiori gli abbassamenti, migliorando la precisione del calcolo.

Nel grafico in fig. 37, sono riportati gli abbassamenti al piezometro PZ1, distante 100 m dal pozzo in pompaggio (curva 1). I valori di trasmissività ed immagazzinamento calcolati analiticamente, sono stati inseriti in ASM per valutare l'attendibilità dei dati interpretati e l'influenza dei limiti a carico fisso.

Le curve 2 – 3 sono ottenute da due simulazioni con diversi valori di T ed S. Nella n.2 sono stati inseriti i dati di una corretta interpretazione; nella n. 3, quelli relativi alla interpretazione del solo tratto iniziale della curva di campagna (meno corretto); come si può vedere l'abbassamento simulato al piezometro, inserendo il valore di T più corretto, è di 219,42 cm mentre quello misurato durante la prova di 219,2 cm.

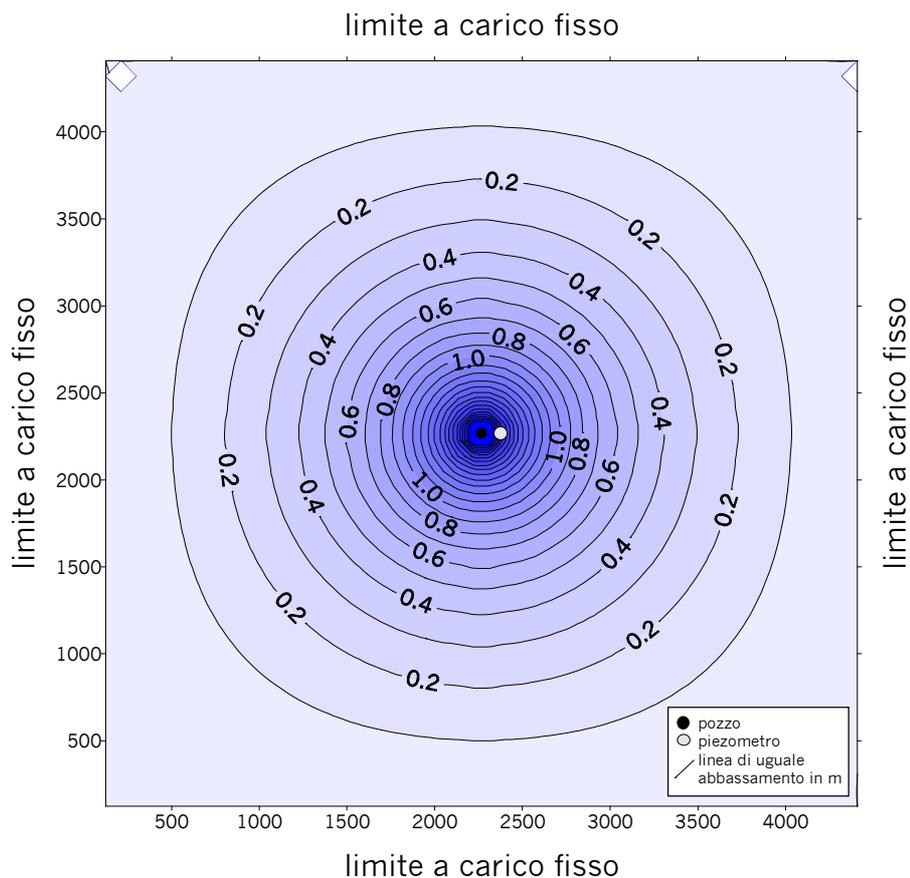


Fig. 36: piezometria dinamica ottenuta con ASM inserendo i valori di T ed S ottenuti da una corretta interpretazione della prova di portata (curva 2 in fig. 37)

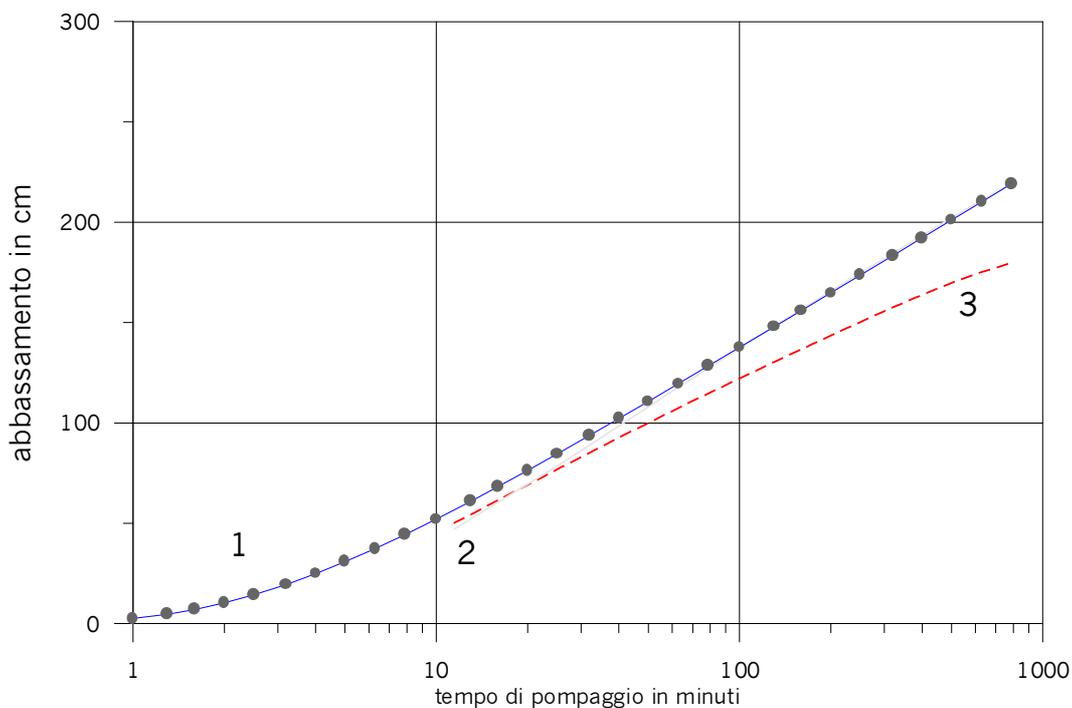


Fig. 37: grafico tempo-abbassamento, 1 curva di prova; 2 retta interpolata; 3 retta interpolata non correttamente

Parametro	Curva di campagna n. 1	Curva simulata n. 2	Curva simulata n. 3
T (mq/d)	201	201	267
S	0.000097	0.000097	0.000068
U < 0.01	t > 173 min		t > 92 min

Tabella valori di tempo - abbassamento della prova di campagna
e delle simulazioni con ASM

Tempo in min. Prova di campagna	Abbassamento misurato in cm	Tempo simulato T = 201 mq/d S = 0.000097	Abbassamento simulato	Tempo simulato T = 267 mq/d S = 0.000068	Abbassamento simulato
1	2,6	11,48931	47,35462	11,48931	50,29868
1,3	4,7	25,85095	79,85445	25,85094	77,95706
1,6	7,1	43,80298	102,4073	43,80299	95,69955
2	10,4	66,24305	119,9612	66,24305	109,1715
2,5	14,3	94,29311	134,7399	94,29311	120,383
3,2	19,5	129,3557	147,8104	129,3557	130,2255
4	24,9	173,184	159,7437	173,1839	139,2112
5	30,8	227,9692	170,8692	227,9692	147,5098
6,3	37,5	296,4508	181,4434	296,4508	155,313
7,9	44,5	382,0528	191,5542	382,0529	162,5688
10	52,1	489,0553	201,2846	489,0554	169,1842
13	61	622,8085	210,6327	622,8085	175,0021
16	68,3	790	219,426	790	179,7716
20	76,3				
25	84,5				
32	93,8				
40	102,2				
50	110,7				
63	119,6				
79	128,4				
100	137,6				
130	147,9				
160	156				
200	164,8				
250	173,6				
320	183,4				
400	192,2				
500	201,1				
630	210,2				
790	219,2				

Esempio di specifiche per le prove di portata

Sono descritte alcune caratteristiche esecutive di pozzi e piezometri da utilizzare nelle prove di portata.

Le prove sono divise in:

- Prove in pozzo (eseguite nel solo pozzo in pompaggio a gradini ed a portata costante)
- Prove su acquifero (eseguite nel pozzo in pompaggio con misure anche in uno o più piezometri, la portata resta costante e la prova dura in genere da 6 a 24 ore)

Prove in pozzo

1. Il diametro del pozzo deve essere tale da alloggiare una pompa di portata sufficiente a provocare un abbassamento di almeno qualche decina di cm
2. Nella colonna di rivestimento la parte terminale di 2-3 m deve essere cieca e tappata al fondo, eventualmente intestata in un livello fine
3. Tra pompa e rivestimento deve rimanere uno spazio libero di almeno 3 cm
4. La pompa va calata ad una profondità tale da non rimanere asciutta durante la prova, non essere in corrispondenza del filtro e più in basso possibile (ad esempio davanti al tratto cieco di fondo)
5. L'acquifero deve essere filtrato almeno al 70-80 %
6. In acquiferi a grana fine (sabbia) o mista (sabbia – ghiaia) va usato un dreno in ghiaia alle spalle del filtro
7. Il filtro deve avere una luce tale da mantenere una velocità di ingresso dell'acqua inferiore a 3 cm/sec, ed avere una permeabilità maggiore dell'acquifero (scelto quindi in base alla sua granulometria)
8. In caso di acquiferi ghiaiosi grossolani si può operare diversamente previo esame del caso specifico
9. Nella colonna va inserito un tubo in plastica ad una profondità di poco superiore a quella della pompa e di diametro interno di almeno 2,5 cm per alloggiare le sonde e/o il freatimetro
10. Va predisposta una tubatura per allontanare l'acqua pompata evitando che si infiltri nel terreno vicino al pozzo di prova
11. La pompa deve essere dotata in testa di un sistema di misurazione e regolazione della portata con sensibilità fino al litro/secondo
12. La prova a gradini deve avere una durata di almeno 6-8 ore ed al termine vanno misurati i livelli in risalita nel pozzo fino al raggiungimento del livello naturale precedente la prova (qualche ora)

Prove su acquifero

1. Per quanto riguarda il pozzo, vale quanto scritto in precedenza, salvo effettuare una prova a portata costante in grado di provocare abbassamenti misurabili (vari cm) anche nei piezometri; la prova ha una durata variabile di 6-24 ore
2. Il filtraggio dei piezometri è analogo a quello del pozzo (filtri + dreno), il diametro è inferiore e di almeno 5-7 cm
3. Il filtro del piezometro va posizionato ad una quota corrispondente a circa metà del filtro del pozzo in pompaggio e lungo 1-2 m
4. Al termine della prova di pompaggio vanno misurati i livelli in risalita nel pozzo e nei piezometri fino al raggiungimento del livello naturale precedente la prova (qualche ora)

Bibliografia

Aqtesolv	2007	Manuale d'uso (www.aqtesolv.com)
ASM	1989-97	Aquifer Simulation Model for Windows
Beretta G.P.	1992	Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee
Brassington Rick	1988	Field Hydrogeology, Open University Press J.Wiley and Sons
Castany G.	1982	Idrogeologia, Flaccovio
Celico Pietro	1986	Prospezioni idrogeologiche (I-II), Liguori
Cerbini Gianni	1992	Il manuale delle acque sotterranee, Geo-graph
Chiesa Guido	1994	Inquinamento delle acque sotterranee, Hoepli
Chiesa Guido	1992	Pozzi di rilevazione, Geo-graph
Chiesa Guido	1992	Glossario di idrogeologia, Geo-graph
Clarke David	1987	Microcomputer programs for g.w. Studies, Elsevier
Custodio, Llamas	1996	Idrologia Sotterranea, Flaccovio
Duffield Glenn M.	2007	Aqtesolv pro 4.5 manual, Hydrosolve
Fletcher G. Driscoll	1986	Groundwater and wells, National Water Well Association
Kruseman G.P, de Ridder	1989	Analysis and evaluation of pumping test data, (ILRI n. 47)
Todd David Keith	1980	Groundwater hydrology, J. Wiley and Sons