

# LE PROVE DI EMUNGIMENTO: TEORIA, PRATICA E FATTIBILITA' CONCRETA

*Prof. Alessandro Gargini*

*Gruppo di Idrogeologia  
Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara*

## 1 – DEFINIZIONI GENERALI

Le prove di emungimento o di pompaggio (dette anche prove di portata) sono l'unico approccio oggettivo per valutare le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero e l'effetto di alcune condizioni al contorno (Di Molfetta, 1995).

In genere si distingue fra **prove di falda** (o *test di acquifero*) e **prove di pozzo** (o *test di pozzo*).

Le prove di falda sono prove di pompaggio, eseguite generalmente in **regime transitorio** (quindi in un contesto in cui il coefficiente di immagazzinamento e la porosità efficace giocano un ruolo nel rilascio dell'acqua dal mezzo poroso), al fine di determinare i parametri idrodinamici dell'acquifero (trasmissività idraulica, coefficiente di immagazzinamento, fattore di fuga, anisotropia della conducibilità idraulica). Possono anche essere eseguite in **regime di equilibrio**, laddove idrogeologicamente possibile (assenza di limiti di permeabilità), anche se con maggior onere temporale e quindi economico.

Le prove di pozzo sono eseguite su pozzo singolo e permettono di stimare la trasmissività dell'acquifero nell'intorno del pozzo, le perdite di carico quadratiche e l'efficienza del pozzo. Da queste ultime 2 informazioni si può ottimizzare la valutazione della produttività sostenibile del pozzo (la cosiddetta portata di esercizio).

### REGIME DI POMPAGGIO

Le prove di emungimento possono essere eseguite (Fig.1) :

*a portata costante (A in Fig.1)*, misurando il conseguente declino o abbassamento (*drawdown*) di carico idraulico in funzione del tempo (prova "in discesa" o a carico idraulico decrescente);

*a portata nulla (B in Fig.1)*, ottenuta arrestando il pompaggio successivamente ad un periodo di erogazione a portata costante e misurando la conseguente risalita del carico idraulico in funzione del tempo (prova di risalita; *recovery test*);

*a portata variabile (C in Fig.1)*, ottenuta facendo avvenire una variazione istantanea di livello in pozzo e misurando in funzione del tempo il ripristino del livello indisturbato (*slug test*).

### PUNTI DI OSSERVAZIONE E MISURA

Le prove di falda in genere coinvolgono, oltre al pozzo in pompaggio (pozzo attivo o pozzo madre o pozzo pilota), uno o più punti di osservazione, altri pozzi o piezometri, diversi e distanti dal pozzo pilota. Si parla in tal caso di prova su stazione.

Le prove di pozzo coinvolgono in genere solo un pozzo (o piezometro); in tal caso la variazione di carico idraulico indotta dal pompaggio o dall'arresto dell'erogazione o dalla variazione istantanea di carico viene misurata nel pozzo stesso. Le prove a portata costante o nulla vengono di solito condotte su stazione di prova (prova multi-pozzo) per la maggiore significatività della prova e per una maggiore vicinanza alle assunzioni teoriche di base. Le prove di falda con variazione istantanea del carico idraulico (*slug test*) sono invece prove a pozzo (o piezometro) singolo.

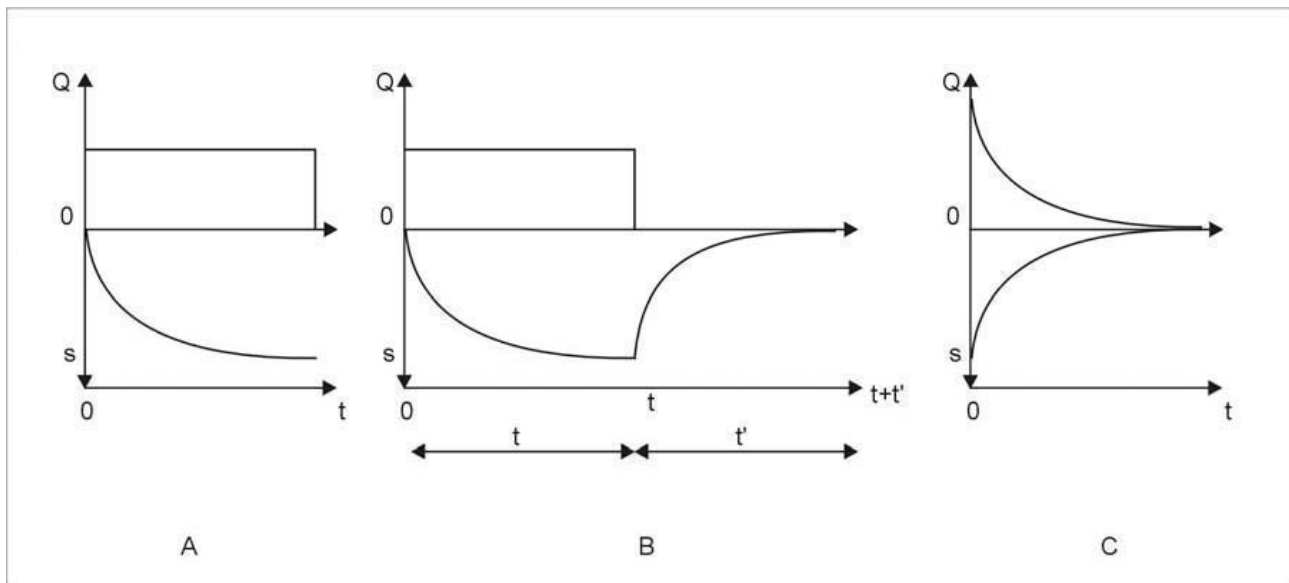


Figura 1 – Regime di pompaggio

## 2 – MODELLI TEORICI DI ACQUIFERO

Interpretare i risultati sperimentali di una prova di portata vuol dire identificare il modello concettuale teorico di acquifero che meglio approssima la condizione reale del sottosuolo. I modelli concettuali teorici di acquiferi sono semplici ed ideali per permettere la rappresentazione del flusso di falda verso un pozzo in pompaggio tramite algoritmi matematici non complessi.

Da un punto di vista matematico tutto si origina dalla *equazione di diffusività* (equazione di Laplace), equazione differenziale che descrive il flusso attraverso un mezzo poroso. Tale equazione viene risolta tramite metodi o soluzioni analitiche in relazione alle condizioni iniziali ed al contorno del sistema.

Infatti la relazione portata-abbassamento piezometrico-tempo non è univoca nei sistemi acquiferi in quanto l'equazione differenziale di diffusività che governa la distribuzione del campo di moto è diversa in relazione alla specificità delle condizioni idrauliche di contorno. Poiché, qualunque metodo di interpretazione si applichi, si utilizza necessariamente una soluzione analitica dell'equazione di diffusività pertinente, ne consegue che la scelta del metodo di interpretazione deve essere preceduta dall'individuazione della tipologia idraulica del sistema acquifero.

Pertanto, sulla base della curva diagnostica (relazione tempo-abbassamento) e delle conoscenze geologiche del sito, viene individuato il modello fisico concettuale dell'acquifero fra quelli possibili e, di conseguenza, viene scelta la soluzione analitica idonea per il modello fisico prescelto.

I passi fondamentali sono pertanto 3:

- 1) esecuzione della prova di falda ed ottenimento della curva diagnostica (sorta di elettrocardiogramma dell'acquifero), espressa dalla relazione fra abbassamenti e tempi (**ambidue in scala logaritmica**), che ci dice la tipologia idraulica dell'acquifero (confinato, semiconfinato, libero, limite di ricarica, limite di permeabilità);
- 2) scelta del modello fisico concettuale;
- 3) interpretazione tramite metodi analitici disponibili.

Un errore assai comune è quello di scegliere il modello fisico sulla base di una litostratigrafia puntuale non rappresentativa del modello idrogeologico su area più vasta. Al tempo stesso la restituzione della curva diagnostica può far comprendere che la litostratigrafia areale è diversa dal dato puntuale: spesso la idrogeologia aiuta e modifica l'interpretazione geologica del

sottosuolo dato che l'acqua si muove su ampi volumi di terreno e riesce a "vedere" quello che il geologo non può vedere dall'esterno.

### ASSUNZIONI TEORICHE DI BASE

Per una corretta interpretazione delle prove di portata, per acquiferi con assenza di limiti, le seguenti condizioni di base dovrebbero essere verificate:

- a) l'acquifero è limitato verso il basso da una unità impermeabile;
- b) tutti i contatti geologici sono orizzontali e le unità geologiche hanno estensione laterale illimitata;
- c) la superficie piezometrica è orizzontale prima dell'inizio del pompaggio;
- d) la superficie piezometrica non presenta escursioni od oscillazioni al momento dell'inizio del pompaggio;
- e) tutte le variazioni della superficie piezometrica durante il pompaggio sono dovute solo al pompaggio del pozzo pilota;
- f) l'acquifero è omogeneo e isotropo;
- g) il flusso ha simmetria radiale verso il pozzo;
- h) il flusso di falda verso il pozzo è orizzontale;
- i) è valida la legge di *Darcy*, con una proporzionalità lineare fra velocità di flusso e gradiente idraulico e con moto laminare e non turbolento;
- j) l'acqua di falda ha densità e viscosità costanti;
- k) il pozzo pilota ed i punti di osservazione sono completi (filtrano tutto l'acquifero)
- l) il pozzo pilota ha diametro infinitesimo (manca effetto capacitivo del pozzo) ed ha un'efficienza del 100% (non ha perdite di carico dovute a turbolenza).

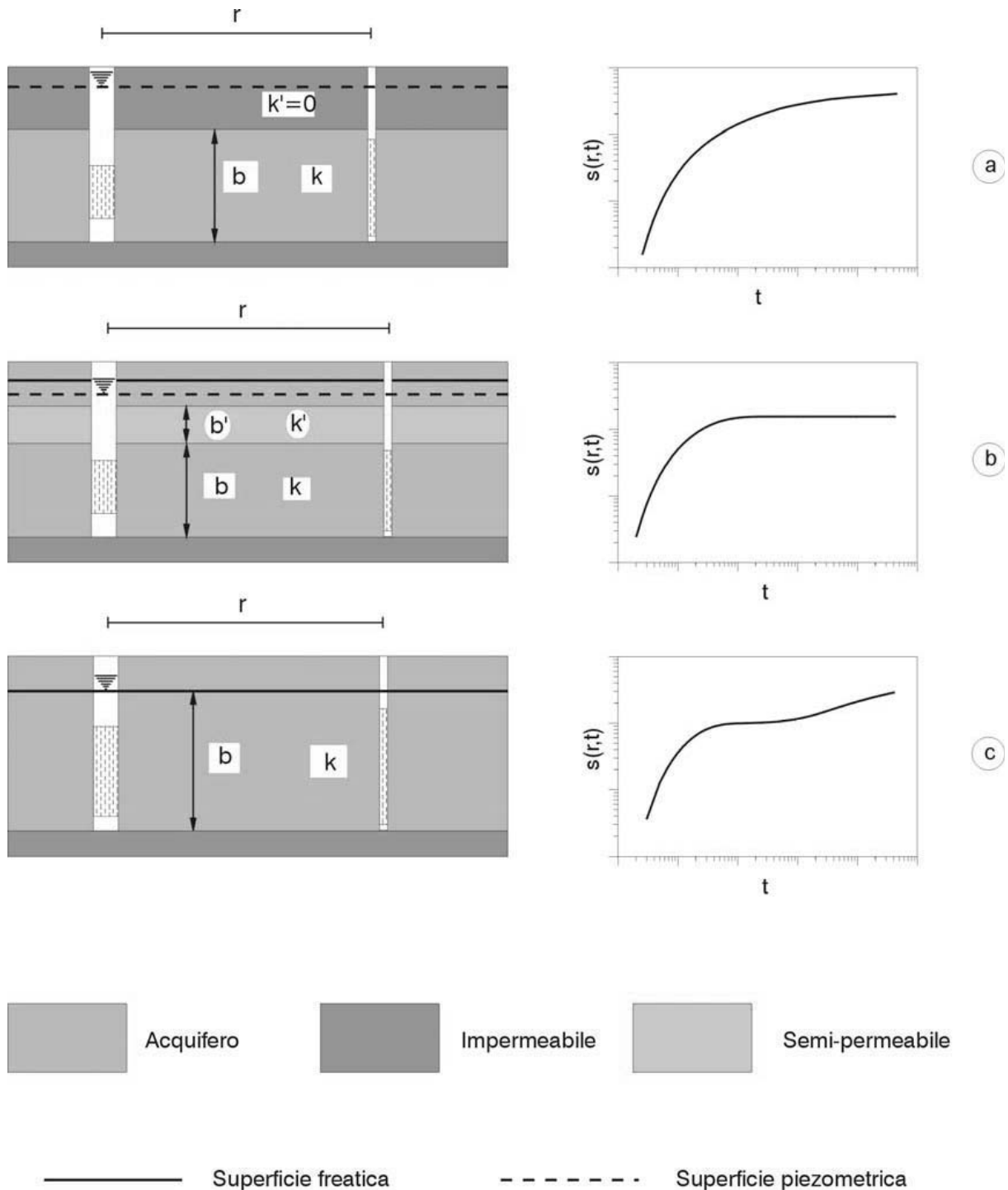
Ben si capisce come sia quasi impossibile ottemperare a tutte queste assunzioni nella pratica reale dell'attività dell'idrogeologo di campagna.

L'ipotesi di omogeneità ed isotropia del mezzo è particolarmente importante e può condurre a degli errori di valutazione se non compresa a fondo; infatti la naturale eterogeneità delle formazioni geologiche che si manifesta alle scale più grandi di quella di *Darcy* fa sì che la *K* (conducibilità idraulica) e *T* (trasmissività idraulica) varino in modo marcato nello spazio. Ora assumere costante la *K* all'interno del dominio interessato dalla prova di pompaggio (mezzo omogeneo ed isotropo) non significa determinare la conducibilità idraulica del mezzo, che come detto non è costante, ma piuttosto definire una conducibilità idraulica efficace definibile come la conducibilità idraulica di un mezzo ideale omogeneo che soggetto alle stesse forzanti esterne (il pompaggio nel nostro caso) ed alle stesse condizioni al contorno convoglia la stessa portata complessiva con lo stesso abbassamento in corrispondenza del punto di osservazione utilizzato per monitorare gli abbassamenti. Va da sé quindi che un'indicazione del grado di eterogeneità dell'acquifero è fornita dalla variabilità della conducibilità idraulica che si ottiene utilizzando gli abbassamenti misurati in più piezometri situati a differenti distanze dal pozzo e secondo diverse direzioni.

A queste considerazioni è poi necessario aggiungere il fatto che **tutte le unità geologiche sono eterogenee**, con una marcata variabilità spaziale delle proprietà idrauliche degli acquiferi con variazioni importanti che si osservano su distanze di qualche decina di centimetri in direzione verticale e di qualche metro in direzione orizzontale. In questa situazione la conducibilità idraulica ottenuta attraverso l'interpretazione di prove di pompaggio assume il significato di un parametro **medio efficace** definito sul volume di materiale corrispondente dall'estensione del cono di depressione. La conducibilità idraulica efficace è quindi quella conducibilità idraulica che in un acquifero ideale omogeneo ed eventualmente anisotropo sollecitato allo stesso modo dell'acquifero reale dà luogo allo stesso portata globale. Nel caso del pompaggio questa equivalenza si concretizza nel fatto che estraendo dall'acquifero ideale la stessa portata dell'acquifero reale si ottiene lo stesso abbassamento misurato nel piezometro spia. In un acquifero eterogeneo, quindi, l'interpretazione delle prove di pompaggio dà luogo a conducibilità idrauliche che dipendono dalla distanza del

piezometro di monitoraggio dal pozzo in emungimento e, se la prova è breve, dalla durata della prova stessa. Combinazioni diverse di questi fattori danno luogo ad altrettanti volumi di riferimento che, se non sufficientemente estesi, producono valori diversi di conducibilità idraulica equivalente. Questi ragionamenti giustificano l'elevata variabilità riscontrata nella conducibilità stimata attraverso l'interpretazione delle prove, in parte riconducibile alle incertezze dovute alle modalità d'esecuzione delle prove, essenzialmente prove di breve durata e variabile da pozzo a pozzo, ed in parte alla naturale variabilità spaziale della conducibilità idraulica.

I modelli-tipo di acquifero (acquifero ideale) sono pertanto i seguenti (Fig.2):



**Figura 2 – Modelli di acquiferi e curva diagnostica su grafico bi-log**

**CASO a: Acquifero confinato o artesiano** (*Non-leaky aquifer*): l'acqua è fornita al pompaggio solo dall'immagazzinamento elastico dell'acquifero (dovuto alla compressibilità dell'acqua ed alla compressibilità del mezzo poroso) espresso dall'immagazzinamento specifico ( $S_s$ ; *specific storage*), la cui unità di misura è il reciproco di una lunghezza ( $m^{-1}$ ), e dal coefficiente di immagazzinamento  $S$  (*storativity*; adimensionale, pari al prodotto di  $S_s$  per lo spessore dell'acquifero).

L'unità geologica confinante è impermeabile (acquicludo) con immagazzinamento specifico pari a 0. Di fatto il confinante è perfettamente impermeabile ed anelastico.

La relazione abbassamento-tempo ad un piezometro di osservazione è esponenziale e si ottiene una retta su scala semilogaritmica (scala logaritmica dei tempi e lineare degli abbassamenti).

**Vedasi la curva A in figura 3.**

**CASO b: Acquifero semi-confinato con assenza di immagazzinamento nell'acquitardo** (*Leaky aquifer*): l'acqua è fornita al pompaggio sia dall'immagazzinamento elastico dell'acquifero (dovuto alla compressibilità dell'acqua ed alla compressibilità del mezzo poroso), espresso dall'immagazzinamento specifico ( $S_s$ ; *specific storage*), sia dalla drenanza (*leakage*) di acqua dall'acquifero libero sovrastante, attraverso l'acquitardo. Si assume che il livello della falda libera non si abbassi durante la prova.

La relazione abbassamento-tempo ad un piezometro di osservazione segue il modello di *Theis* fino ad un certo punto e poi se ne discosta con un decremento del tasso di abbassamento (facendosi risentire la ricarica per drenanza dall'alto). L'unità geologica confinante è poco permeabile (acquitardo) con immagazzinamento specifico pari a 0 (il che vuol dire che non si libera acqua dall'acquitardo che, conseguentemente, nemmeno si consolida sotto l'effetto del pompaggio, non inducendo quindi nemmeno effetti superficiali di subsidenza). In presenza di un contributo significativo proveniente attraverso l'acquitardo la portata fornita dall'acquifero si riduce e con essa l'abbassamento che si osserva nei piezometri completati nell'acquifero. Il contributo relativo dell'acquitardo aumenta con il tempo a partire da un valore iniziale nullo fino ad un valore costante che si osserva dopo parecchie ore dall'inizio del pompaggio. **Vedasi la curva B in figura.**

Si noti che il **tempo di esecuzione della prova può non essere sufficiente a mostrare la eventuale drenanza**, per questo si consiglia, per prove su acquiferi semi-confinati in cui si debba quantificare il fenomeno di drenanza e addirittura stimare la conducibilità idraulica verticale dell'acquitardo ( $K'$ ), prove di pompaggio non inferiori alle 72 ore; inoltre maggiore è la portata di emungimento e maggiore la permeabilità del confinante e minore sarà il tempo necessario per stimare il fenomeno.

Molto importante è anche ricordare che, qualora ci si trovi in prossimità di un canale, un fiume, un lago o qualsiasi superficie a potenziale imposto che sia in connessione idraulica con l'acquifero, **dal punto di vista grafico l'estensione del cono di pompaggio a questo elemento è molto simile a quella provocata dalla drenanza**. In tal caso il grafico abbassamento-logaritmo del tempo può anche divenire praticamente orizzontale. Si deve quindi sempre discriminare la causa del fenomeno osservato sulla base delle conoscenze della geologia ed idrogeologia locali. **Vedasi la curva B in figura 3.**

**CASO b: Acquifero semi-confinato con immagazzinamento nell'acquitardo** (*Leaky aquifer with storage in confining layer*): l'acqua è fornita al pompaggio sia dall'immagazzinamento elastico dell'acquifero (dovuto alla compressibilità dell'acqua ed alla compressibilità del mezzo poroso), espresso dall'immagazzinamento specifico ( $S_s$ ; *specific storage*), sia dall'immagazzinamento nell'acquitardo (dovuto all'immagazzinamento specifico dell'acquitardo) sia dalla drenanza (*leakage*) di acqua dall'acquifero libero sovrastante attraverso l'acquitardo. Si assume che il livello della falda libera non si abbassi durante la prova.

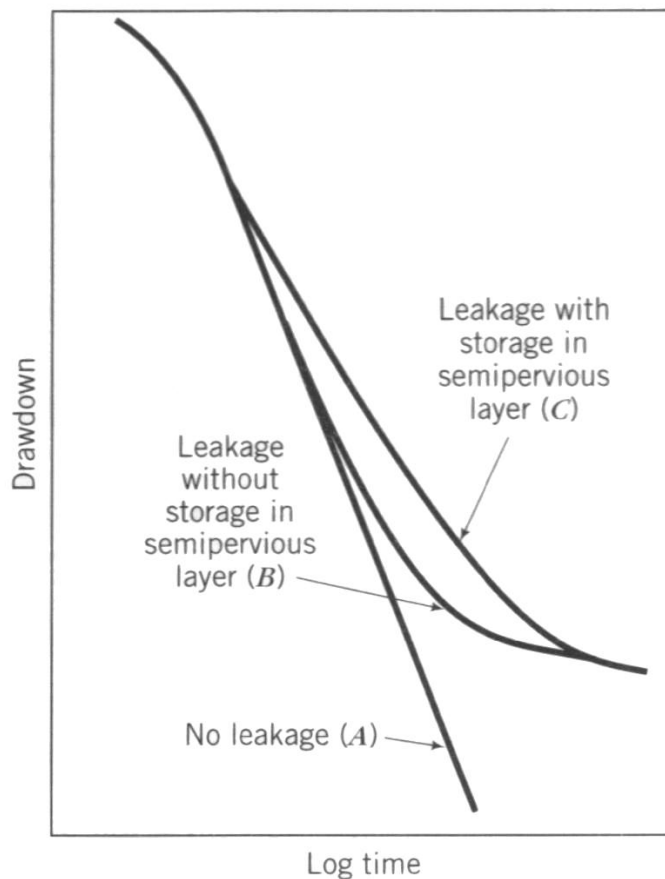
La relazione abbassamento-tempo ad un piezometro di osservazione segue il modello di *Theis* fino ad un certo punto e poi se ne discosta, prima del caso precedente, e poi subisce un netto decremento del tasso di abbassamento (facendosi risentire la ricarica per drenanza dall'alto).

L'unità geologica confinante è poco permeabile (acquitardo) con immagazzinamento specifico di valore finito. Vi è pertanto anche consolidazione dell'acquitardo e possibili effetti di subsidenza in superficie. **Vedasi la curva C in figura 3.**

**CASO c: Acquifero libero** (*Unconfined aquifer*): l'acqua è fornita al pompaggio sia dall'immagazzinamento elastico dell'acquifero (dovuto alla compressibilità dell'acqua ed alla compressibilità del mezzo poroso), espresso dall'immagazzinamento specifico ( $S_s$ ; *specific storage*), per tempi molto piccoli, subito dopo l'inizio del pompaggio; è fornita poi dall'immagazzinamento gravifico dell'acquifero (dovuto alla porosità efficace dell'acquifero o *Specific Yield*  $S_y$ ) per tempi lunghi. Si ha in pratica un effetto di drenaggio ritardato che si sviluppa tanto precocemente quanto maggiore è la conducibilità idraulica verticale dell'acquifero, quanto minore è lo spessore dell'acquifero e quanto minore è la sua conducibilità idraulica orizzontale.

La relazione abbassamento-tempo ad un piezometro di osservazione segue il modello di *Theis* controllato dall'immagazzinamento specifico, poi risente del drenaggio ritardato per gravità e poi segue il modello di *Theis* controllato dalla porosità efficace. La curva diagnostica su diagramma bi-log è una sorta di "S" allungata.

**CASO d: Acquifero con limiti** (*Bounded aquifer*): non viene specificamente trattato questo argomento, che sussiste quando l'acquifero è delimitato da un limite di alimentazione (mare, lago, fiume) o da una soglia di permeabilità (limite dell'acquifero). Il trattamento dei dati di osservazione si basa ancora sul metodo di *Theis*, approssimazione logaritmica di *Jacob*, tramite il principio di sovrapposizione degli effetti. Per una trattazione esauriente si rimanda a Domenico & Schwartz (1997); **la metodologia, pertanto, serve ad individuare limiti di permeabilità più che a parametrizzare l'acquifero. Per la parametrizzazione dell'acquifero la presenza di limiti è peraltro una complicazione.**



**Figura 3 – Abbassamento-logaritmo del tempo per differenti modelli di acquiferi**

### **3 – METODI ANALITICI DI RISOLUZIONE**

Fondamentalmente tutti i metodi di risoluzione hanno le loro radici originarie nella metodologia di *Theis* (**regime di non equilibrio**) che esprime la distribuzione dell'abbassamento, in funzione al tempo ed alla distanza dal pozzo pilota, in relazione alla trasmissività idraulica ed al coefficiente di immagazzinamento. soluzione analitica della equazione di diffusione con certe condizioni iniziali ed al contorno.

Theis, tramite il supporto fondamentale del matematico Lubin, effettuò un analogo idrologico fra flusso idrico in un mezzo poroso e flusso di calore in una piastra di spessore costante ed estensione infinita, originalmente a temperatura costante, in relazione alla infissione nella medesima, per tutto il suo spessore, di una barra di diametro infinitesimo di temperatura costante e più fredda di quella della piastra. Ad una certa distanza dalla barra la dinamica dell'abbassamento di temperatura è funzione del tasso di raffreddamento alla barra, delle proprietà fisiche del mezzo e del tempo. Per cui abbiamo le seguenti analogie (in neretto l'analogo elettrico):

**Temperatura** = Carico idraulico  
**Portata** = differenziale di temperatura fra barra e piastra  
**Flusso di calore** = flusso di acqua di falda  
**Conducibilità termica** = Conducibilità idraulica

$$(1) \quad s(r,t) = (Q/4\pi T) * s_D(u)$$

$$(2) \quad u = (r^2 * S)/(4Tt)$$

dove:

s=abbassamento in un punto di osservazione distante r dal pozzo attivo;

t=tempo da inizio pompaggio;  
 Q=portata di emungimento;  
 T=trasmissività idraulica;  
 s<sub>D</sub>(u)=funzione del pozzo;  
 u=argomento della funzione del pozzo

Nella tabella di seguito riportata sono indicati i principali metodi di risoluzione della equazione di diffusività nelle condizioni tipo di modello ideale di acquifero.

Tipologia Acquifero	Metodo	Procedimento d'interpretazione	Diagramma s vs t
CONFINATO	<u>Theis</u>	<u>curva campione</u>	<u>log-log</u>
	<i>Jacob</i>	<i>linearizzazione</i>	<i>semilog</i>
SEMICONFINATO	<u>Walton</u>	<u>curva campione</u>	<u>log-log</u>
	<i>Hantush</i>	<i>punto di flesso</i>	<i>semilog</i>
NON CONFINATO	<u>Neuman</u>	<u>curva campione</u>	<u>log-log</u>
	<i>Jacob</i>	<i>linearizzazione</i>	<i>semilog</i>

**TABELLA SUI RISOLUTORI ANALITICI E GRAFICI PRINCIPALI**

Per gli acquiferi confinati  $s_D = W(u)$ , per i semiconfinati  $s_D = W(u, r/B)$ , per i non confinati  $s_D = W(u_A, u_B, \eta)$ . Quindi per gli acquiferi confinati la funzione del pozzo dipende solo da 1 parametro (u), dipende da 2 parametri nel caso dei semiconfinati e dipende da 3 parametri nel caso degli acquiferi liberi. Se ne deduce che la trattazione matematica analitica del flusso aumenta di complessità passando da un acquifero rigorosamente confinato (caso più semplice) ed un acquifero libero.

Se, delle equazioni (1) e (2), si prendono i logaritmi di entrambi i membri, si ottiene:

$$(1bis) \quad \log s = \log (Q/4\pi T) + \log s_D$$

$$(2bis) \quad \log u = \log (r^2 * S)/(4T) + \log (1/t)$$

Poiché i due gruppi sottolineati sono delle costanti, funzione della trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento, le equazioni (1bis) e (2bis) indicano che, in un diagramma logaritmico avente lo stesso modulo (uguale ampiezza di un ciclo logaritmico), la curva sperimentale s vs t (abbassamenti/tempo), registrata durante la prova di falda, avrà la stessa configurazione della curva adimensionale  $s_D$  vs  $1/u$ , caratteristica della tipologia di acquifero che meglio riproduce il comportamento reale del sistema in esame.



Tale curva sperimentale è la curva diagnostica. **ATTENZIONE:** la curva diagnostica viene ottenuta sul grafico bi-logaritmico e non semi-logaritmico come quello impiegato nel metodo semplificato di *Cooper-Jacob* per acquifero confinato.

Vengono ora brevemente descritti i risolutori principali:

### **Acquifero confinato: Metodo non equilibrio di Theis (1935):**

La curva tipo di *Theis* ( $W(u) - 1/u$ ), su scala bilogaritmica, materializza la relazione fra tempo e abbassamento (o fra distanza ed abbassamento) per qualsiasi punto di un acquifero rigorosamente confinato soggetto a pompaggio (stimolato).

### **APPROSSIMAZIONE LOGARITMICA**

Vi sono 2 modifiche della equazione di non-equilibrio valide se  $u < 0,01-0,05$  (tempi lunghi di pompaggio oppure distanze piccole fra pozzo attivo e pozzo di osservazione): si tratta del metodo "Tempo-abbassamento" e del metodo "Distanza-abbassamento", ambedue ricadenti sotto il nome di "**metodo dell'approssimazione logaritmica di Cooper & Jacob (1946)**" o semplicemente di *Jacob*. Tale metodo è molto applicato, forse di più in assoluto, ma spesso lo è in maniera impropria e fuorviante. **Sarebbe meglio che  $u$  fosse inferiore a 0,01, ma si accetta anche, con maggiore approssimazione e non potendo fare durare il pompaggio oltre un certo limite, un valore di 0,05 come soglia.**

Viene operata, di fatto, una linearizzazione dei dati sperimentali in diagramma semilogaritmico (abbassamento in scala lineare e tempo in scala logaritmica), dato che:

$$s(r,t) = (0,183*Q/T)* \log(2,25* T*t)/(r^2*S)$$

$$\text{valida per } u < 0,01 \text{ quindi per } t > 12,5*(r^2*S)/T$$

Se la durata della prova è stata sufficientemente lunga da avere un numero di punti adeguato per individuare il tratto linearizzato su scala semi-log della curva di declino, l'interpretazione della prova consente di determinare la trasmissività attraverso la pendenza del tratto rettilineo ed il coefficiente di immagazzinamento attraverso la valutazione del tempo  $t_0$  ottenuto come intercetta, sull'asse delle ascisse, del tratto rettilineo.

Il limite inferiore di validità dell'approssimazione di *Jacob* è fortemente condizionato dalla distanza dei punti di osservazione. Pertanto l'estensione del metodo di *Jacob* agli acquiferi freatici richiede una durata della prova molto grande (maggiore di 12 h) per il ruolo giocato dalla porosità efficace (da 2 a 3 ordini di grandezza maggiore del coefficiente di immagazzinamento degli acquiferi confinati). Richiede anche che gli abbassamenti nel pozzo in pompaggio siano contenuti, non superiori al 15% dello spessore saturo di acquifero.

### **METODO DELLA RISALITA**

Anche questo metodo deriva dall'applicazione della teoria di *Theis* reinterpretata alla luce dell'approssimazione logaritmica di *Jacob* e dell'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti. **Pertanto è un metodo che, a rigore, vale solo per acquiferi confinati; può essere esteso agli acquiferi liberi se l'abbassamento è contenuto (inferiore a 0.15 volte spessore saturo dell'acquifero).**

Il vantaggio della effettuazione della misura in risalita del livello a pozzo attivo spento è che si tolgono effetti indesiderati dovuti alla variabilità non controllabile della portata di pompaggio ed al verificarsi di perdite quadratiche di carico nel pozzo in pompaggio (se la prova è fatta sul pozzo attivo).

Nel metodo della risalita si opera come nel metodo di *Cooper-Jacob*, solo che sull'asse logaritmico dei tempi si riporta il logaritmo decimale del rapporto fra  $t$  e  $t'$ , dove  $t$  è il tempo

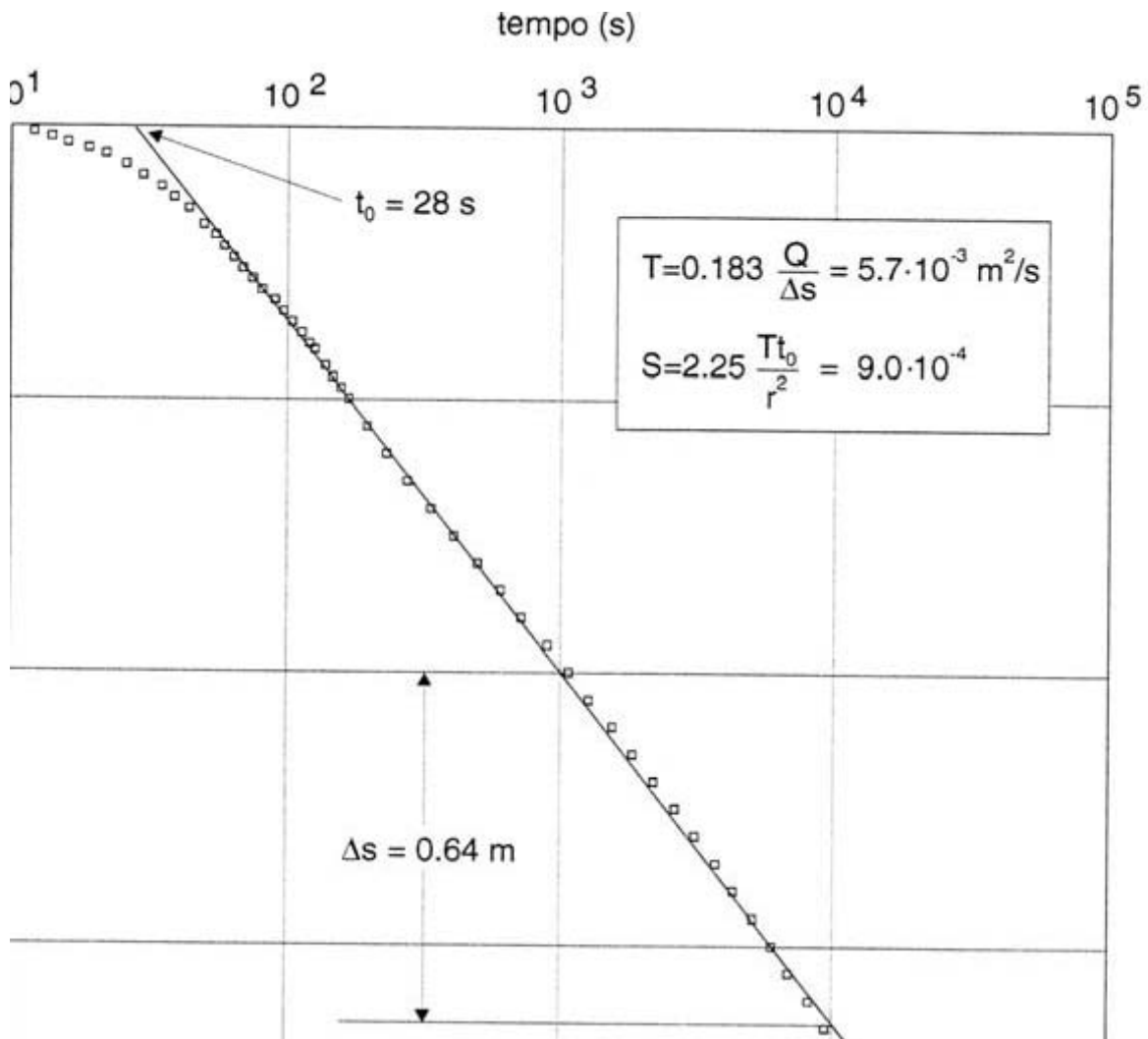
trascorso dall'inizio del pompaggio e  $t'$  è il tempo trascorso dallo spegnimento della pompa. Sull'asse degli abbassamenti si riporta l'abbassamento residuo, cioè l'abbassamento misurato durante la risalita che nel tempo tende a ridursi via via che il livello torna al livello statico iniziale.

Essendo una derivazione del metodo di approssimazione logaritmica di Jacob va messo in evidenza che  $u$  deve essere inferiore a 0.01 sia per la fase di pompaggio ma anche per la fase di risalita. Tale seconda assunzione è spesso disattesa (la risalita dovrebbe durare un tempo sufficiente) ed è molto penalizzante, restringendo di molto l'applicabilità del metodo per prove di non eccessiva durata.

Un metodo alternativo, proposto recentemente, permette di tollerare, nella fase di risalita, un valore di  $u$  inferiore a 0,2 (Zheng *et al.*, 2005).

Il metodo della risalita, se applicato su punti di osservazione e non sul pozzo in pompaggio, permette di risalire anche alla valutazione del coefficiente di immagazzinamento (Chenaf & Chapuis, 2002).

In Fig.4 viene mostrata la linearizzazione dei dati di abbassamento secondo il metodo di *Cooper-Jacob* con la identificazione dei parametri idrodinamici (T,S).



**Figura 4 – Metodo grafico di risoluzione per linearizzazione di *Cooper-Jacob*.**

**Acquifero semi-confinato con acquitrando senza immagazzinamento: Metodo di *Hantush-Jacob*** (1954), con risoluzione grafica tramite metodo di *Walton* (1962).

Secondo tale modello abbiamo che:

$$T = \frac{Q}{4\pi(h_0 - h)} W(u, r/B)$$

$$S = \frac{4Tut}{r^2}$$

e dove:

$$B = (T*b/K')^{0.5}$$

con:

B = fattore di fuga o fattore di drenanza (*leakage factor*);

b' = spessore dell'acquifero;

K' = conducibilità idraulica verticale dell'acquitardo.

In pratica il fattore di fuga B quantifica il rapporto fra l'effetto trasmissivo dell'acquifero rispetto all'effetto di drenanza dell'acquitardo. Tanto maggiore è B e tanto più vicino al pozzo in pompaggio è il punto di osservazione (basso valore di r/B), tanto più il comportamento dell'acquifero è simile ad un confinato. W(u,r/B) è la funzione caratteristica del pozzo, t è il tempo di pompaggio e Q è la portata emunta. Nel complesso i parametri che compaiono nella equazione di *Hantush-Jacob* sono (Fig.5):

r = distanza pozzo-piezometro

$h_0 - h$  = abbassamento nel piezometro

b = spessore acquifero confinato

b' = spessore livello a bassa permeabilità

K = Conducibilità idraulica dell'acquifero

K' = Conducibilità idraulica verticale dell'acquitardo

S = Coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero

S' = Coefficiente di immagazzinamento dell'acquitardo

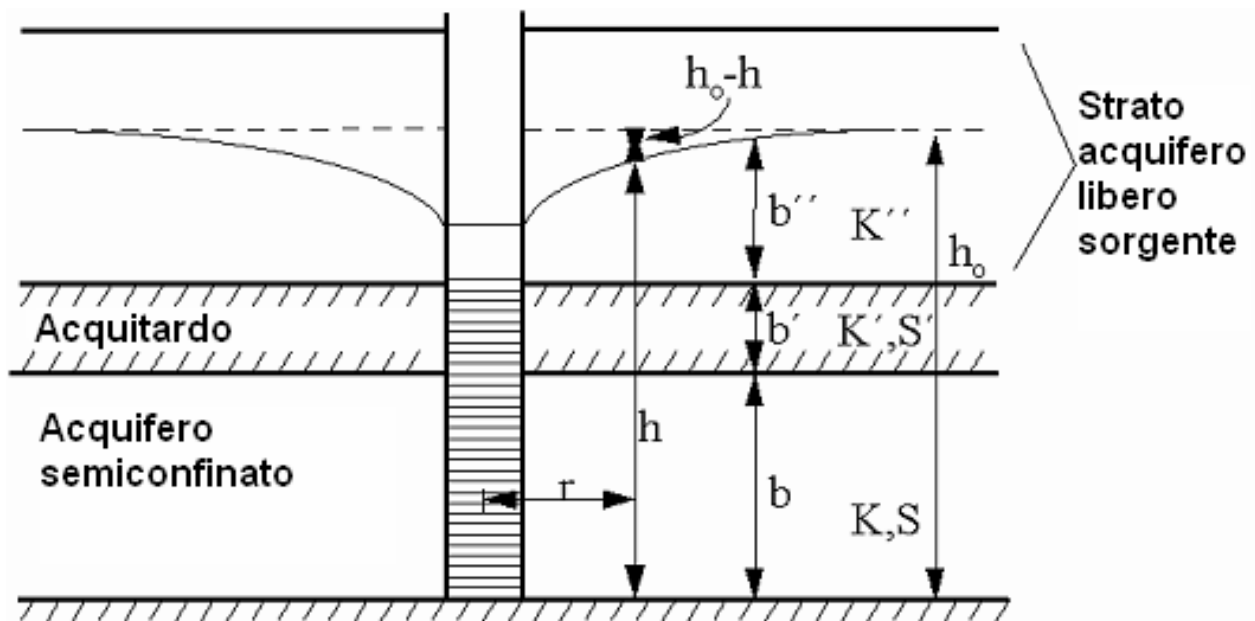


Figura 5 – Schema di acquifero semi-confinato.

#### APPROSSIMAZIONE LOGARITMICA

Il metodo dell'approssimazione logaritmica di *Jacob*, con la ricostruzione del grafico abbassamento-logaritmo del tempo, può anche essere fatto per acquiferi semi-confinati. Nell'ambito del campo di validità del metodo ( $u < 0.01$ ), avremo una parte iniziale del grafico lineare e poi un punto di flesso oltre il quale la pendenza diminuisce e si fa risentire l'effetto drenanza. Per calcolare la trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento basta operare sulla parte iniziale linearizzata del grafico. Va identificato od estrapolato l'abbassamento massimo che si ha quando si risente delle drenanza: l'abbassamento al punto di flesso è pari alla metà dell'abbassamento massimo. **Il metodo, che permette di analizzare una prova su acquifero semi-confinato con solo un foglio elettronico Excel (senza ricorrere agli abachi cartacei o a software dedicati) è spiegato molto chiaramente in Fetter (1994).**

#### Acquifero semi-confinato con acquitardo con immagazzinamento: Metodo di Hantush.

Qui viene sostituita la funzione del pozzo del metodo di Hantush-Jacob  $W(u, r/B)$  con quella del metodo di Hantush  $H(u, \beta)$ .

Dove:

$$\beta = (r/4B)(S'/S)^{0.5}$$

mentre  $B$  ed  $u$  hanno lo stesso significato del punto precedente. Per tempi brevi di pompaggio l'acqua proviene contemporaneamente dall'immagazzinamento elastico dell'acquifero e dell'acquitardo mentre per tempi lunghi viene solo dalla drenanza dall'acquifero libero sovrastante.

#### Acquifero libero: Metodo di Neuman (1975)

Secondo Neuman (1975) la risoluzione del problema di flusso è una modifica della notazione di Theis, espressa nel modo seguente:

$$s(r,t) = (Q/4\pi T) * W(u_A, u_B, \eta)$$

dove la funzione del pozzo W, funzione di 1 solo termine (u) per acquiferi confinati, di 2 termini (u, r/B) per acquiferi semi-confinati, ora è funzione di 3 termini:

$$u_A = (r^2 * S) / (4Tt) \text{ (per parte iniziale della curva diagnostica)}$$

$$u_B = (r^2 * S_y) / (4Tt) \text{ (per parte finale della curva diagnostica)}$$

$$\eta = r^2 * K' / m^2 * K$$

dove m è lo spessore saturo iniziale di acquifero, K è la conducibilità idraulica orizzontale, K' quella verticale.

Di fatto si opera un *curve-matching* sulla parte iniziale della prova (acqua fornita dalla deformazione elastica dell'acquifero) e si trova T ed S; si identifica il valore di  $\eta$  e quindi l'anisotropia di permeabilità. Tanto maggiore è il valore della K' rispetto alla K tanto maggiori sono le componenti verticali di flusso nell'acquifero e gli effetti di drenaggio ritardato. Infine si identifica la porzione finale della curva diagnostica e si determina la porosità efficace  $S_y$

### APPROSSIMAZIONE LOGARITMICA

Il metodo dell'approssimazione logaritmica di *Jacob*, con la ricostruzione del grafico abbassamento-logaritmo del tempo, può anche essere fatto per acquiferi liberi. Nell'ambito del campo di validità del metodo ( $u < 0.01$ ), avremo una parte iniziale del grafico lineare e poi un punto di flesso oltre il quale la pendenza diminuisce e si fa risentire l'effetto drenaggio ritardato; oltre infine può riprendere, se il tempo di pompaggio è sufficiente, una terza parte linearizzata. Per calcolare la trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento elastico basta operare sulla parte iniziale linearizzata del grafico. Dopodiché si prende una coppia di valori abbassamento/tempo per la parte finale e tramite la seguente:

$$s = (2.3 * Q / 4\pi T) \log(2.25 T t / r^2 S_y)$$

si calcola  $S_y$ .

Se il pompaggio non è durato in maniera sufficiente avremo solo 2 parti e non 3 della curva e si determinerà un valore di  $S_y$  intermedio fra quello reale e quello elastico. **Questo spiega perché, se l'acquifero è libero ed i dati vengono interpretati con il metodo dell'approssimazione logaritmica ed il pompaggio è durato poco, si ottengono valori di porosità efficace molto bassi (1-2%), irrealistici..**

I vari risolutori sono contenuti in pacchetti numerici ad interazione come, ad esempio, il software commerciale *AquiferTest (Waterloo Hydrogeologic)*. Altrimenti la sovrapposizione fra curve sperimentali e curve teoriche veniva fatta a mano tramite abachi.

In Figura 6 viene mostrata la procedura di interpretazione grafica tramite metodo grafico di *Hantush-Jacob*, per un acquifero semi-confinato, con le varie fasi di sovrapposizione della curva sperimentale su abachi.

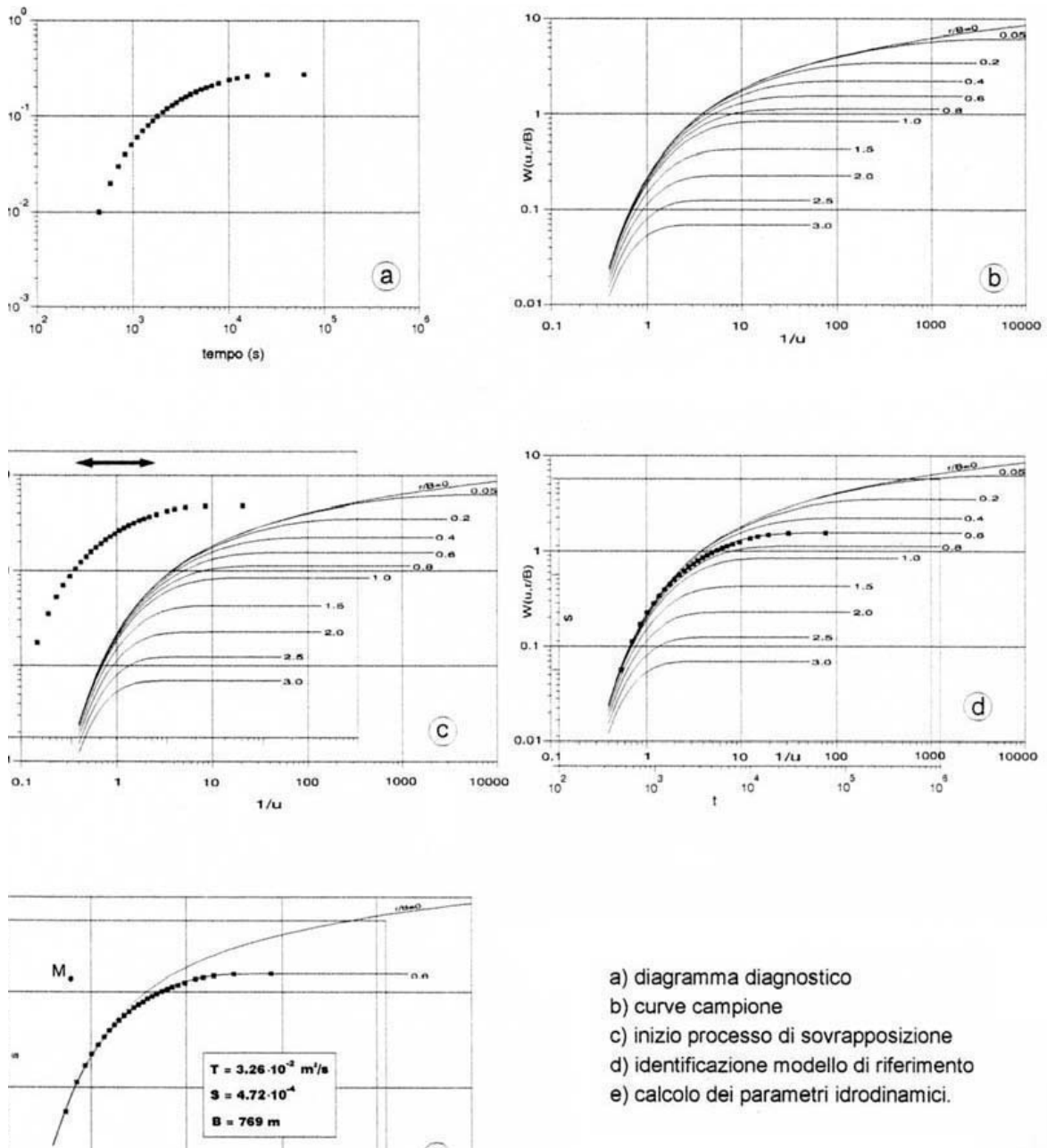


Figura 6 – Analisi di una prova di falda per acquifero semi-confinato

### REGIME DI EQUILIBRIO

È una via analitica alternativa al regime di non equilibrio che ci può tornare utile per l'interpretazione di prove su pozzo singolo. Ci si pone in una condizione di stato stazionario dove non si tiene conto del coefficiente di immagazzinamento e dove, quindi, la relazione fra portata di emungimento ed abbassamento è mediata solo dalla distribuzione della trasmissività idraulica dell'acquifero. La trattazione analitica è basata sulla teoria di *Thiem*.

Per acquifero libero si ha che:

$$s_2^2 - s_1^2 = [(2,3 \cdot Q) / (\pi K)] \cdot \log r_2 / r_1$$

dove:  $s_1$ ,  $s_2$  sono livelli piezometrici rispetto ad un livello di riferimento a distanze  $r_1$ ,  $r_2$  dal pozzo attivo,  $K$  è la conducibilità idraulica.

Per acquifero confinato si ha che:

$$s_2 - s_1 = [2,3 * Q / (2\pi T)] * \log r_2 / r_1$$

Pertanto se si hanno 2 punti di osservazione ad una certa distanza dal pozzo attivo e si aspetta un tempo sufficiente per avere una pseudo-stabilizzazione del sistema, dalle formule di cui sopra si ricava la trasmissività e la conducibilità idraulica dell'acquifero.

## 4 – ASPETTI PRATICI NELLA ESECUZIONE DELLE PROVE DI EMUNGIMENTO

Finora abbiamo parlato di teoria ma gli aspetti pratici, soprattutto nella pratica idrogeologica professionale, sono altrettanto importanti. In pratica possiamo dire che, se volessimo essere pedanti osservatori della teoria, non saremmo mai in grado di effettuare ed interpretare correttamente una prova di emungimento.

Qui di seguito vedremo una serie di raccomandazioni di buona pratica che saranno illustrate nell'ordine logico dei vari *step* di effettuazione di una prova di portata, Capitoli specifici saranno dedicati alle situazioni peculiari che ogni geologo si trova quasi sempre ad affrontare. Ogni sottocapitolo o capitolo viene preceduto da una domanda a cui si cerca di dare una risposta, nei limiti della teoria e della fattibilità.

### QUALE È IL SITO IDONEO PER EFFETTUARE UNA PROVA DI PORTATA?

Il sito ideale è un sito facilmente accessibile, significativo, in termini idrogeologici, dell'area che si vuole studiare, lontano da disturbi che possano mascherare o alterare i segnali registrati durante la prova come presenza di altri pozzi in esercizio o vicinanza di fonti di vibrazione quali ferrovie o strade di grande comunicazione (quest'ultimo aspetto è importante soprattutto per prove su acquiferi confinati in sedimenti sciolti e quando il pozzo è situato in posizione limitrofa all'asse di trasporto).

Eventuali pozzi vicini dovrebbero essere situati oltre il raggio di influenza del pompaggio. Una definizione corretta di raggio d'influenza è la distanza alla quale si ha, dopo 10000 secondi (circa 30 ore) dall'inizio del pompaggio, un abbassamento inferiore a 2 cm; se entro tale distanza ci sono pozzi in esercizio è una situazione sfavorevole alla corretta interpretazione della prova. **Come regola generica sarebbe bene che entro 500 m, in media, non ci fossero pozzi in pompaggio** dal giorno precedente l'effettuazione della prova e per tutto il periodo di effettuazione della prova (risalita compresa). Se l'acquifero è libero tale distanza si può ridurre anche a 300 m, anche se questo va valutato in relazione alla portata dei pozzi ed alla ipotizzata trasmissività dell'acquifero.

Il pozzo deve essere, inoltre, distante da limiti idrogeologici (impermeabili, drenanti o alimentanti), a meno che la loro caratterizzazione non costituisca uno degli obiettivi della prova. Prove di portata effettuate presso corsi d'acqua sono spesso inutili perché la presenza del carico idraulico costante inficia l'affidabilità della prova per tempi lunghi. Anche la vicinanza al mare, se vi siano oscillazioni di marea significative, può perturbare la prova (anche se tale aspetto è poco rilevante nella maggior parte delle situazioni italiane). Durante la prova comunque andrebbe misurato il livello del fiume o il livello del mare o comunque andrebbe acquisito il dato da enti preposti a monitorarlo; un livello in abbassamento o in risalita può essere dovuto al contemporaneo abbassamento o risalita del livello del fiume e non al comportamento intrinseco dell'acquifero stimolato dal pompaggio.

### QUALE È IL MOMENTO IDEALE PER EFFETTUARE UNA PROVA DI PORTATA?

Vanno evitati periodi in cui sono previste forti variazioni barometriche (per acquiferi confinati) o forti precipitazioni (per acquiferi liberi) e, se vicino a corsi d'acqua alimentanti, forti variazioni del livello del fiume.

### COSA VA CONOSCIUTO DEL POZZO, SE ESISTENTE?

È indispensabile che si conosca la stratigrafia dei terreni attraversati e la geometria del completamento (diametro della colonna di rivestimento; profondità del perforo; numero, tipologia e posizione dei tratti filtrati). **La profondità del foro e la posizione del tratto filtrato sono, in ordine di importanza, le informazioni fondamentali che vanno conosciute.**

Se possibile si consiglia un diametro compreso nel campo 300-500 mm, filtrando tutto lo spessore saturo dell'acquifero (pozzo completo), onde realizzare una delle condizioni teoriche che facilitano l'interpretazione della prova.

Idealmente, nel pozzo dovrebbe essere installato un tubo piezometrico nell'intercapedine fra tubo di rivestimento e gruppo pompa sommersa entro il quale effettuare le misure di carico piezometrico; in tal modo si evitano disturbi alla lettura per caduta dell'acqua dai livelli acquiferi o per incaglio della sonda nelle flange del gruppo-pompa.

### NEL CASO DI PROVA SU STAZIONE A CHE DISTANZA VANNO PRESI I PUNTI DI OSSERVAZIONE?

Come punti di osservazione potranno essere utilizzati piezometri o pozzi già esistenti, purché completati nello stesso acquifero del pozzo attivo, con caratteristiche geometriche note, e ubicati ad una distanza dal pozzo attivo tale da consentire la misura di abbassamenti significativi. Tale distanza dipende, oltre che dalla portata erogata e dalla durata della prova, dalla tipologia dell'acquifero (libero, confinato) e dalla sua trasmissività.

**Come raccomandazione di base si consiglia di porre i punti di osservazione a distanze dal pozzo madre non superiori a 100 m per gli acquiferi non confinati o di 400 m per gli acquiferi confinati.** Il cono di depressione, infatti, si estende per una distanza che è inversamente proporzionale al valore del coefficiente di immagazzinamento. **In genere si consiglia di ubicare i punti di osservazione a distanza dell'ordine di 10-20 m per gli acquiferi con superficie libera e di 50-70 m per gli acquiferi confinati; valori intermedi potranno essere adottati per gli acquiferi semiconfinati.**

Come distanza minima **non si deve comunque scendere oltre 5-6 m**; sotto questa distanza, infatti, ed al di sotto di un certo valore limite di tempo, le equazioni del metodo del non equilibrio non possono essere più applicate (**distanza inferiore a  $20 r_w$  dal pozzo attivo**).

**Nel caso che il pozzo attivo sia incompleto**, quindi non filtrante tutto lo spessore dell'acquifero, e l'acquifero sia confinato (o libero con abbassamenti contenuti entro 0,1 volte lo spessore totale di colonna d'acqua del pozzo), **se il piezometro è distante più di 1 volta e mezzo lo spessore dell'acquifero** (assumendo un fattore di anisotropia pari a 1, quindi K verticale uguale a K orizzontale) **non ci si accorge dell'effetto incompletezza.**

Se si possono perforare diversi piezometri, o si possono impiegare diversi pozzi di osservazione, è consigliabile ubicarli a distanze simili dal pozzo-madre lungo 3 direzioni diverse (per quantificare l'anisotropia della trasmissività) oppure lungo la stessa direzione a distanze progressive tali che quello relativamente più lontano è 3 volte più lontano del precedente (es. 3 piezometri a distanze di 5, 15, 45 m dal pozzo madre, per un acquifero libero).

### CHE TIPO DI COMPLETAMENTO DARE AI PIEZOMETRI DI OSSERVAZIONE?

È consigliabile realizzare piezometri del tipo "a tubo aperto" per la loro maggiore affidabilità; il diametro non deve essere troppo grande perché aumenta il ritardo della risposta né



troppo piccolo per lasciare spazio sufficiente di manovra al freatometro o al sensore piezometrico. **Valori consigliabili sono compresi fra 5 e 10 cm di diametro.**

### CHE CARATTERISTICHE DEVE AVERE LA POMPA?

Ad eccezione dello *slug test*, il pozzo dovrà essere attrezzato con una pompa ed un eventuale gruppo elettrogeno (se non esiste l'allacciamento alla rete elettrica), in grado di mantenere costante la portata erogata durante tutto l'intervallo temporale prefissato.

Se si usa una pompa centrifuga (ad esempio una elettropompa sommersa), si ricorda che la potenza idraulica è uguale al prodotto della portata per la prevalenza:

$$P = Q \cdot H / r$$

dove:

P = potenza, espressa in kg/s;

Q = portata, espressa in l/s;

H = prevalenza in m (altezza di rilancio dell'acqua dalla pompa centrifuga);

r = rendimento della pompa, funzione della portata (dimensionale); in genere cresce fino ad un massimo e poi diminuisce.

Questo fatto è molto importante per le prove di portata su pozzi a medio-bassa trasmissività dell'acquifero in cui, in genere, vi sono forti abbassamenti durante l'emungimento. **Quando il livello si abbassa, aumenta la prevalenza e quindi la portata decresce anche se non si è operato nessuna regolazione alla saracinesca di uscita del tubo di mandata della pompa. Pertanto non si sta facendo una prova a portata costante; ne potrebbe risultare una pseudo-stabilizzazione fittizia che non corrisponde ad un fenomeno reale del flusso di falda nell'acquifero.** È pertanto importante fare delle prove prima dell'effettuazione della prova di portata vera e propria per effettuare la prova in condizioni di portata costante (con uno scarto massimo del 10% di variazione).

Per quanto detto prima sulla variazione di prevalenza è importante che, durante la prova, il tubo di mandata della pompa rimanga ad altezza costante rispetto al piano-campagna; può succedere infatti che variandone la quota, anche di poco, per abbozzarlo al serbatoio tarato per la misura di portata, la portata vari per variazione della prevalenza.

Deve essere nota la profondità del filtro di aspirazione della pompa rispetto al piano-campagna ("pescatore"). Tale informazione è importante per evitare di spingere l'abbassamento fino al livello-pompa con rischi di danni alla medesima.

Se preliminarmente è stato fatto lo spurgo annotare la portata che ha fatto prosciugare il pozzo, è ovvio che tale portata non è sostenibile dal pozzo medesimo ed è un limite superiore per il dimensionamento della pompa.

Si ricorda, infine, che, durante la prova, si deve consentire l'allontanamento dell'acqua emunta a distanza superiore al raggio di influenza del pozzo attivo, per evitare che la stessa, infiltrandosi nel sottosuolo, alimenti la falda influenzando il cono di drenaggio indotto dal pompaggio; tale aspetto è evidente soprattutto laddove la prova viene condotta su acquifero libero (o su acquifero libero sovrastante un semi-confinato con drenanza importante).

### CHE DISPOSITIVI E MODALITÀ USARE PER LA MISURA DEI CARICHI IDRAULICI?

Nel pozzo attivo e nei punti di osservazione si misurano abbassamenti o risalite del carico idraulico ad intervalli di tempo prefissati. Per la misura o si opera in manuale (freatometro) o con un sistema di acquisizione automatica con compensazione della pressione atmosferica (sensore di pressione + *data logger*). Nel caso di realizzazione di uno *slug test* è spesso indispensabile ricorrere all'acquisizione automatica tramite sensore in quanto le variazioni di livello negli acquiferi dotati di elevata permeabilità sono troppo rapide per consentire una adeguata misurazione manuale; in genere in tali prove, infatti, la frequenza di acquisizione è pari a 1-3 secondi.

Bisogna ricordare che, fatta eccezione per la fase iniziale della prova e per quella finale corrispondente alla comparsa dell'effetto di eventuali limiti (sia interni che esterni), gli abbassamenti evolvono nel tempo con una legge di tipo logaritmico; conseguentemente non ha senso misurare gli abbassamenti ad intervalli di tempo costanti. Poiché, però, la durata della fase iniziale di scostamento dalla legge logaritmica e la comparsa di eventuali limiti non possono essere noti a priori, si consigliano modalità di misura che adottano un criterio empirico tendente, ovviamente, a ridurre la frequenza di lettura con il procedere del tempo di prova. Qui ne riportiamo un esempio basato sull'esperienza dello scrivente:

<b>Tempo di prova</b>	<b><u>Intervallo di misura</u></b>
<b>min</b>	<b><u>min</u></b>
0-5	<u>0,5</u>
5-10	<u>1</u>
10-20	<u>5</u>
20-60	<u>10</u>
60-120	<u>20</u>
120-240	<u>30</u>
240-480	<u>60</u>
>480	<u>120</u>

Nella procedura di lettura manuale si può ottenere una migliore precisione nei punti di osservazione adottando il criterio di leggere i tempi in corrispondenza dei quali si raggiungono dei valori di abbassamento predeterminati. In pratica si lascia il frenometro fisso a bocca-foro ed appena si avverte la cessazione del segnale acustico si rileva il tempo. In questo caso, infatti, si evitano le imprecisioni di lettura dovute alla valutazione delle frazioni di centimetro, essendo le sonde piezometriche manuali quotate con scansione centimetrica; inoltre, si evita il rischio di perdere tratti significativi della curva abbassamenti-tempo solo perché non previsti nella frequenza temporale di misura.

In un acquifero libero non si dovrebbero registrare abbassamenti superiori a 0,3 volte lo spessore saturo dell'acquifero (meglio ancora non superiori a 0,15 volte). Se il pozzo non è completo non si deve superare 0,3 (0,15) volte lo spessore totale della colonna d'acqua nel pozzo (sempre per acquifero libero).

Prima della prova andrebbe registrato l'andamento del livello per un tempo sufficiente, in relazione al sito, per apprezzare le variazioni di livello a cui la falda è soggetta, sia naturalmente sia artificialmente. In genere effettuare le misure per 1-2 giorni prima è consigliabile; nei 2 giorni dovrebbero essere compresi anche giorni lavorativi per verificare l'eventuale influenza di pozzi ad uso produttivo.

### COME EFFETTUARE LA MISURA DELLA PORTATA?

I sistemi più usati per la misura della portata sono:

- serbatoio tarato, mediante il quale si misura il tempo impiegato dal pozzo a riempire un volume noto (da 20 o 500 L in funzione della portata); è il sistema più semplice ed è adatto a piccole portate, in quanto è necessario un tempo di riempimento dell'ordine di almeno 30-60 s per limitare l'errore di misura (errore relativo pari a 1-2%);
- il contatore volumetrico, usualmente di tipo *Woltman*, con il quale si legge direttamente il valore del volume d'acqua erogato; il suo diametro va scelto in funzione del *range* di portata erogato e va montato su un tratto di tubazione orizzontale, rettilineo a monte e a valle del contatore stesso per una lunghezza pari ad almeno 20 volte il diametro della tubazione, al fine di evitare l'innescio di fenomeni di turbolenza. A monte del contatore il tubo deve presentare un raccordo ad "U" per garantire l'assenza di aria nel tubo; si ricorda che la saracinesca di manovra va posizionata a valle del contatore, per avere comunque un flusso a sezione piena (errore relativo pari a 2%);

c) la vasca a stramazzo, a parete sottile, con la quale il valore di portata viene ottenuto correlando l'altezza della lama d'acqua sullo sfioratore con le caratteristiche costruttive della vasca (errore relativo pari a 2,5%) ;

d) il tubo con diaframma (tubo di *Pitot*), mediante il quale la portata viene valutata, sulla base del teorema di *Bernoulli*, una volta letto il valore del carico idraulico a monte del diaframma; il diaframma deve essere montato all'estremità di un tratto di tubazione liscia, orizzontale e rettilinea per una lunghezza pari a circa 20 volte il diametro della stessa (errore relativo pari a 5%).

#### QUANTO DEVE DURARE UNA PROVA DI EMUNGIMENTO?

La durata ottimale di una prova di falda è compresa fra 6 e 72 ore, a seconda del tipo di prova. La durata di uno *slug test*, invece, è nettamente inferiore e varia usualmente da 1 a 100 min. Il pozzo deve essere spento da 24 ore almeno prima.

**In genere, per molte applicazioni pratiche, con una durata complessiva di 4-6 ore (compresa la risalita) è possibile ottenere informazioni significative sul pozzo e sull'acquifero nell'intorno dell'areale di influenza del pozzo.**

**Si ricordi che la durata della prova deve essere anche commisurata allo schema previsto di esercizio del pozzo medesimo: mentre per un ente di acquedotto ha senso commissionare una prova di portata di 72 ore o più, non ha senso effettuare la stessa operazione per un privato, con uso domestico od irriguo del pozzo, che non terrà il pozzo mai acceso per un tempo superiore a 2-3 ore. I volumi di acquifero stimolati dal pompaggio sono molto diversi.**

Nei successivi paragrafi esamineremo alcuni aspetti specifici che meritano maggiore rilevanza per la loro importanza relativa e frequenza di applicazione nella pratica dell'idrogeologo.

### 5 – PROVE SU POZZO SINGOLO

Quando si parla di prove di portata, sulla base di quanto riportato nei manuali di idrogeologia, si evidenzia sempre la configurazione su stazione di prova, quindi con pozzo attivo e piezometri di osservazione. Del resto questa è la configurazione che permette di interpretare meglio le prove, in quanto le misure fatte ad una certa distanza dal pozzo attivo soddisfano le formulazione analitiche di base. Il pozzo attivo, infatti, presenta vari problemi: grande diametro con conseguente effetto capacitivo, parziale penetrazione dell'acquifero (pozzo non completo), perdite di carico quadratiche con non corrispondenza fra carico piezometrico misurato nel pozzo e carico piezometrico nell'acquifero, flussi turbolenti e “cascate” interne di acqua dai tratti finestrati che rendono difficile la misura con freatimetro.

**Peraltro spesso l'idrogeologo ha a che fare solo con un pozzo e solo su un pozzo deve fare affidamento per effettuare la prova.** In tal caso si parla di prove su pozzo singolo (*SINGLE-BOREHOLE TESTS*) che, seppur trascurate dai manuali convenzionali di idrogeologia, sono le più preziose perché le più praticate. **Inoltre possono essere prove assai utili perché, quando effettuate su pozzi esistenti, possono dare informazioni sulla reale produttività del pozzo e quindi possono svolgere un ruolo di controllo-monitoraggio anche a scopi fiscali o giuridico-peritali.**

La prova su pozzo singolo è certamente più economica di una prova su stazione e, di conseguenza, fornisce meno informazioni rispetto ad una prova *standard*. Si deve anche considerare un fatto importante: **che la prova su pozzo singolo è volumetricamente meno significativa della prova su stazione, fornendo informazioni idrogeologiche di rilievo solamente in relazione all'intorno del pozzo medesimo. Se il pozzo è stato spurgato in modo non corretto o, all'opposto, se una corretta operazione di spurgo ha “ripulito” di matrice fine la zona anulare di acquifero circondante l'opera di captazione, i dati acquisiti sono inficiati da tali eventi artificiali.** Si ricordi, infatti, che, spesso, presso il pozzo, l'acquifero risulta “danneggiato” dal

pompaggio, con una diminuzione locale della permeabilità dovuta al fango di perforazione e ad uno sviluppo non corretto. Ad una certa distanza tale effetto non c'è, in corrispondenza degli eventuali punti di osservazione.

In realtà i manuali di idrogeologia riportano la possibilità che, anche facendo riferimento alle teorie consolidate, si possa interpretare una prova condotta su pozzo singolo. Nel caso di acquiferi confinati o, per acquiferi liberi, se l'abbassamento è contenuto ( $< 0,15$  spessore tratto filtrato), si consiglia il metodo dell'approssimazione logaritmica di *Cooper-Jacob* (1946) per l'interpretazione. Ma bisognerebbe ovviamente che fossero soddisfatte tutte le ipotesi che sottendono alla teoria del non equilibrio di *Theis*. E poiché la non completezza del pozzo, l'eventuale effetto di drenaggio ritardato se l'acquifero è libero e l'effetto capacitivo se il pozzo è di grande diametro, oltre soprattutto alla presenza di perdite di carico quadratiche entro il pozzo, inficiano le condizioni teoriche di base, si capisce come sia difficile ottenere dati significativi di prova di pozzo singolo e come spesso quello che viene ottenuto è del tutto fuorviante rispetto alla realtà.

L'ideale sarebbe fare durare la prova un tempo molto lungo per svincolarsi il più possibile dalle limitazioni di cui sopra (ad esempio se l'acquifero è libero si devono aspettare anche più di 2 giorni per avere informazioni utili ed un valore significativo della trasmissività) ma questo spesso è operativamente impossibile.

In genere, comunque, se l'acquifero è confinato, la stima di  $T$  è buona se si cerca di rispettare i dettami della teoria (**si ricorda che con prova su pozzo singolo non è possibile stimare  $S$  perché ci manca la conoscenza del volume del cono di depressione e di come esso varia nel tempo in risposta al pompaggio**). Per acquifero libero, invece, la stima di  $T$  è ancora buona se l'acquifero è molto trasmissivo (ghiaie, ciottoli, sabbie pulite) e, in particolare, se i valori di  $T$  sono compresi fra  $1,2 \times 10^{-1}$  e  $1,2 \times 10^{-2}$   $m^2/s$  le stime sono più che accettabili (Halford *et al.*, 2006). Si possono fare invece grossi errori, dato che aumentano le componenti verticali di flusso nell'acquifero, se  $T$  varia fra  $1,2 \times 10^{-4}$  e  $2,9 \times 10^{-3}$   $m^2/s$ .

**Comunque, per prove su pozzo singolo interpretate alla luce dell'approssimazione logaritmica di *Jacob*, il modo migliore è sfruttare la prova di risalita dato che in pompaggio le perdite quadratiche di carico possono portare ad una sottostima della trasmissività.**

#### PERDITE DI CARICO DEL POZZO (WELL LOSS) ED EFFICIENZA DEL POZZO

Le perdite di carico nel pozzo, quindi in sostanza l'abbassamento di livello che si registra realmente in un pozzo in pompaggio ( $s_R$ ), sono la somma di **perdite di carico lineari** (*formation loss*,  $s$ ), dovute al flusso laminare *Darcyano* di acqua attraverso l'acquifero, e **perdite di carico quadratiche o del pozzo** (*well loss*,  $s_w$ ), dovute al flusso di acqua turbolento attraverso il filtro ed il dreno. Mentre  $s$  è ottenibile matematicamente dalla formula di *Theis*, si ha che:

$$s_w = C * Q^n$$

dove  $C$  è detta costante delle perdite del pozzo ed  $n$  è un esponente in prima approssimazione pari a 2 (da cui si chiamano perdite quadratiche, varianti secondo il quadrato della portata di emungimento). Dicesi **efficienza del pozzo** il rapporto fra  $s$  previsto (secondo *Theis*) e l'abbassamento reale misurato, espressa in percentuale. L'abbassamento reale misurato è la somma di  $s$  e  $s_w$ .

**L'efficienza del pozzo, comunque, non è il parametro più importante per quantificare la produttività del pozzo medesimo: il parametro più importante è la portata specifica** (Kawecki, 1995).

**Sulla base di quanto affermato sembrerebbe che le perdite di pozzo fossero costanti ed indipendenti dal tempo e funzione solo della portata; invece aumentano con il tempo, nel caso di acquiferi liberi** (Helweg, 1994).

L'abbassamento reale in funzione del tempo  $s_R(t)$  entro in un pozzo che filtra un acquifero confinato, omogeneo ed isotropo, di estensione infinita e che pompa a portata costante  $Q$  (Jacob, 1947; Rorabaugh, 1953) è pertanto dato dalla seguente:

$$s_R(t) = s(t) + s_w$$

scritto anche

$$s_R(t) = B(t) \cdot Q + C \cdot Q^n$$

dove:

$B(t) = [1/(4\pi T)] \cdot \ln(2,25Tt)/S r_w^2$  (dalla teoria di *Theis* con approssimazione logaritmica).

$B(t) \cdot Q$  = perdite di carico di acquifero (lineari)

$C \cdot Q^n$  = perdite di carico di pozzo (quadratiche)

$P$  = variabile fra 2.43 e 2.82 ma, per portate molto basse, può essere considerata pari ad 1.  $C$  è considerato costante e  $B$  diventa praticamente costante dopo un tempo lungo di pompaggio a portata  $Q$ .

$B$  e  $C$  possono essere determinati con metodo grafico tramite l'effettuazione di una prova di portata a gradini.

#### PORTATA SPECIFICA E STIMA DELLA TRASMISSIVITÀ

Dicesi **capacità specifica** o **portata specifica** ( $Q_s$ ) il rapporto fra portata di emungimento ed abbassamento nel pozzo in assenza di perdite quadratiche, quindi in relazione solamente alle caratteristiche dell'acquifero. Dalla teoria di *Theis* si ha che:

$$Q_s = Q/s = 4\pi T / [(\ln(4Tt/r_w^2 S) - 0,5772)]$$

Pertanto la portata specifica è funzione della trasmissività, del raggio del pozzo, del coefficiente di immagazzinamento e del tempo dall'inizio del pompaggio. **La capacità specifica, che è quindi la portata normalizzata sull'abbassamento, è una valida misura della produttività del pozzo (*well yield*),** in mancanza di informazioni affidabili sulla trasmissività dell'acquifero (Halford *et al.*, 2006).

**Dato che all'aumento della portata del pozzo aumentano le perdite quadratiche di carico, si ha che la portata specifica diminuisce all'aumentare della portata di emungimento. Quindi se si devono confrontare le portate specifiche di pozzi diversi dovrebbero essere impiegati valori relativi a portate che, per quei pozzi, minimizzano le perdite di carico quadratiche.**

Come si vede dalla formula la  $T$  non compare al logaritmo, mentre  $t$ ,  $S$  ed  $r_w$  compaiono al logaritmo. Pertanto grosse variazioni di  $T$  determinano grosse variazioni di portata specifica mentre se il pozzo è più o meno largo, se varia più o meno il coefficiente di immagazzinamento o se si considerano tempi brevi o lunghi di pompaggio il valore della portata specifica cambia poco.

**Questo quindi ci dice che, se pompiamo da un pozzo a portata sufficientemente bassa da ottenere una pseudo-stabilizzazione in tempo breve (e quindi ci rendiamo indipendenti dal tempo e dall'immagazzinamento ponendoci in condizioni di equilibrio), possiamo stimare la trasmissività dell'acquifero** sulla base dell'equazione di *Thiem* (assumendo un valore stimato di raggio d'azione).

Questa possibilità è veramente molto importante ed è una notevole opportunità, spesso poco considerata anche perché applicata sovente in maniera impropria, per determinare la trasmissività dell'acquifero anche senza fare ricorso a prove di portata di lunga durata.

**Stima della trasmissività per acquifero confinato:** di seguito si riporta la formula dell'equilibrio di *Thiem* per un acquifero confinato (già vista in precedenza)

$$s_2 - s_1 = [2,3 * Q / (2\pi T)] * \log r_2 / r_1$$

Ipotizziamo di fare pompare un pozzo fino al raggiungimento dello stato stazionario ed in assenza di perdite quadratiche di carico; sappiamo, dalla teoria dell'equilibrio, che al raggiungimento dello stato stazionario a distanza  $R_0$  dal pozzo, detto raggio d'azione, l'abbassamento è pari a 0 mentre l'abbassamento è pari a  $\Delta h$  all'interno del pozzo (solo perdite di carico lineari). Avremo pertanto che:

$$\Delta h = [Q / (2\pi T)] * \ln R_0 / r_w$$

da cui, ipotizzando un raggio d'azione pari a 400 m per un acquifero confinato, abbiamo che:

$$\begin{aligned} T &= Q / \Delta h (1/2\pi) * \ln R_0 / r_w = Q / \Delta h 0,159 * \ln R_0 / r_w = \\ &= Q / \Delta h 0,159 * (\ln R_0 - \ln r_w) = Q / \Delta h 0,159 * (5,99 - \ln r_w) = \end{aligned}$$

$$T = Q / \Delta h [0,95 - (\ln r_w / 2\pi)]$$

**Stima della trasmissività per acquifero libero:** di seguito si riporta la formula dell'equilibrio di *Thiem* per un acquifero libero (già vista in precedenza)

$$s_2^2 - s_1^2 = [(2,3 * Q) / (\pi K)] * \log r_2 / r_1$$

Ipotizziamo di fare pompare un pozzo fino al raggiungimento dello stato stazionario ed in assenza di perdite quadratiche di carico; sappiamo, dalla teoria dell'equilibrio, che al raggiungimento dello stato stazionario a distanza  $R_0$  dal pozzo, detto raggio d'azione, l'abbassamento è pari a 0 mentre l'abbassamento è pari a  $\Delta h$  all'interno del pozzo (solo perdite di carico lineari). Avremo pertanto che:

$$h_0^2 - h_w^2 = [Q / (\pi K)] * \ln R_0 / r_w$$

dove  $h_0$  è lo spessore saturo dell'acquifero e  $h_w$  è lo spessore di acqua nel pozzo in pompaggio a stabilizzazione. Si può anche scrivere:

$$(h_0 + h_w) * (h_0 - h_w) = [Q / (\pi K)] * \ln R_0 / r_w$$

Ponendo  $(h_0 + h_w) = 2 h_0 - \Delta h$

e ponendo questo circa uguale a  $2 h_0$  dato che l'abbassamento si presuppone piccolo rispetto allo spessore saturo dell'acquifero ( $< 0,15$  volte), si ha che

$$K * (2h_0) = Q / (h_0 - h_w) (1/\pi) * \ln R_0 / r_w$$

da cui, ipotizzando un raggio d'azione pari a 200 m per un acquifero confinato, abbiamo che:

$$T = Q / \Delta h (1/2\pi) * \ln R_0 / r_w = Q / \Delta h 0,159 * \ln R_0 / r_w =$$

$$=Q/\Delta h 0,159*(\ln R_0 - \ln r_w) = Q/\Delta h 0,159*(5,30 - \ln r_w) =$$

$$T = Q/\Delta h [0,84 - (\ln r_w/ 2\pi)]$$

### INCOMPLETEZZA DEL POZZO

**Se il pozzo non è completo, e quindi non filtra completamente l'acquifero, e se l'acquifero è libero soprattutto, si ha una componente verticale non trascurabile di flusso di acqua presso il pozzo con un aumento delle perdite di carico;** in pratica le linee di flusso convergono verso il filtro ed il pozzo è come se facesse "più fatica" a richiamare l'acqua da tutto l'acquifero per cui ci sono perdite di carico maggiori di quanto atteso se il pozzo fosse completo. Inoltre comincia a giocare un ruolo importante l'anisotropia di K dell'acquifero fra la direzione verticale ed orizzontale.

Se l'acquifero è confinato e se la trasmissività dell'acquifero è elevata ( $> 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) non ci sono problemi nell'effettuazione della prova anche se il pozzo è incompleto.

**Nel caso che l'acquifero sia libero e manifesti un drenaggio ritardato a tempi lunghi di pompaggio, invece, si ha un effetto di inflessione verso l'alto nella relazione tempo-abbassamento,** con un comportamento apparente di acquifero semi-confinato o di limite di alimentazione. In questo caso si dovrebbe fare durare una prova di pompaggio un tempo ancora più lungo per superare la fase di drenaggio ritardato. La durata del pompaggio dovrebbe essere superiore ad un tempo critico detto  $t_c$ :

$$t_c = S b/2 K_v$$

con S coefficiente di immagazzinamento, b spessore saturo dell'acquifero (m),  $K_v$  conducibilità idraulica verticale dell'acquifero (m/s). Ad esempio, se abbiamo un acquifero libero ( $S = 0,15$ ) e la  $K_v$  dell'acquifero è  $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  e lo spessore è 5 m il valore del tempo di pompaggio deve essere superiore a 5,2 ore almeno per superare il tempo necessario ad eliminare gli effetti della incompletezza del pozzo. Come regola generale si può stimare che la K verticale sia 1 ordine di grandezza (10 volte) inferiore a quella stimata orizzontale.

Se sfruttiamo dei punti di osservazione e se il pozzo attivo non è completo dovremo piazzare i punti ad una distanza r dal pozzo attivo superiore ad un valore soglia:

$$r > 1.5 \text{ m } (K/K')^{0.5}$$

con m spessore saturo acquifero, K conducibilità idraulica orizzontale e K' conducibilità idraulica verticale. Se il fattore di anisotropia è 1 (K orizzontale uguale a K verticale) basta che il punto di osservazione sia a distanza superiore ad 1 volta e mezzo lo spessore dell'acquifero. Se il piezometro è a distanza inferiore può succedere che, per effetto della non completezza del pozzo attivo, punti più vicini abbiamo un abbassamento inferiore (per il drenaggio ritardato) di punti più lontani.

**Se comunque il punto di osservazione è completo gli effetti della non penetrazione completa del pozzo attivo sono trascurabili** (Fetter, 1994).

Se l'acquifero è libero ed il pozzo non completo eventuali punti di osservazione più vicini della distanza critica possono essere impiegati per l'analisi della prima parte della curva tempo-abbassamento, al fine di determinare il coefficiente di immagazzinamento elastico dell'acquifero, mentre solo quelli più lontani della distanza critica servono per determinare la porosità efficace per tempi lunghi di pompaggio (III parte della curva diagnostica).

### METODO DELLA RISALITA

Per togliersi dall'impiccio delle perdite di carico quadratiche, nelle prove su pozzo singolo, **ai fini della determinazione della sola trasmissività dell'acquifero, conviene fare affidamento**

**sulla prova di risalita.** Una prova di risalita dovrebbe sempre fare parte essenziale delle prove di pozzo (Kawecki, 1995)

### POZZI IN ACQUIFERI FRATTURATI

Se il pozzo è in un acquifero fratturato si può ipotizzare che il mezzo fratturato eterogeneo sia analogo ad un mezzo poroso omogeneo idraulicamente equivalente. Ciò implica che la trasmissività ottenuta dalla prova è quella che si sarebbe determinato da un mezzo poroso che avesse indotto gli stessi effetti di abbassamento sul pozzo.

## 6 – PROVE DI PORTATA A GRADINI

La prova di portata a gradini (*stepped-drawdown test*) è la prova sovente più eseguita su pozzi singoli.

Obiettivo fondamentale della prova a gradini è l'ottenimento di: a) comportamento del pozzo; b) perdite di carico del pozzo; c) efficienza del pozzo (Genetier, 1993).

Sono raccomandati fra i 3 ed i 5 gradini di portata, ognuno con portata circa doppia del precedente ed ognuno caratterizzato dalla stessa durata di tempo.

**La durata complessiva della prova, e la durata di ogni gradino, dovrebbe essere comparabile con la durata di esercizio prevista giornalmente per il pozzo in situazione a regime. Se un pozzo sta acceso 1 ora al giorno è assurdo fare gradini di 3 ore di lunghezza; su un pozzo di acquedotto che sta acceso giorni interi devono essere condotti gradini lunghi più giorni.** Infatti le perdite quadratiche di carico, che si determinano con la prova a gradini, sono anche funzione del tempo e non solo della portata, quindi vanno stimate sulla base del tempo effettivo previsto di funzionamento del pozzo (Helweg, 1994).

Una volta determinato l'abbassamento nel pozzo per ogni gradino di portata (è utile che ogni gradino duri la stessa quantità di tempo per confrontare fra loro i diversi *step*) si costruisce la cosiddetta **curva caratteristica del pozzo** (grafico in scala lineare portate-abbassamenti).

Se vi è relazione lineare fra portata ed abbassamento vi sono solo perdite di carico lineari, il flusso nel pozzo e nelle sue vicinanze è di tipo laminare

Se la curva ha una forma convessa di tipo parabolico le perdite quadratiche aumentano di importanza e non sono trascurabili

**Se la curva caratteristica si mantiene sub-lineare e ad un certo punto crolla allora significa che il livello è sceso sotto uno strato produttivo. Pertanto tale strato non dovrà mai rimanere scoperto in esercizio e la portata di esercizio dovrà essere inferiore.**

Se la curva caratteristica è concava verso l'alto allora la prova va ripetuta e non è venuta correttamente. Potrebbe anche essere successo che si sono "stasati" dei filtri insabbiati o che è aumentata per spurgo indotto la permeabilità della zona anulare attorno al pozzo. Il che significa che il pozzo non era stato completato o sviluppato a regola d'arte.

**Dalla prova a gradini è possibile ottenere il valore della costante delle perdite quadratiche. Pertanto sarà possibile poi conoscere il reale abbassamento di livello nel pozzo data una certa portata e questo è importante per il posizionamento della pompa sommersa.**

**Dalla prova di portata a gradini fondamentale è la ricostruzione del grafico: abbassamento specifico vs portata. Il primo è il rapporto fra abbassamento (al termine di ogni gradino) e portata.** Sappiamo infatti che

$$s_R(t) = B(t) \cdot Q + C \cdot Q^n$$

espressione degli abbassamenti entro il pozzo. Dividendo tutto per Q si ottiene:

$$s_R(t)/Q = B(t) + C \cdot Q$$



se ipotizziamo  $n=2$ . Questa è l'equazione di 1 retta che ha B per termine noto e C per coefficiente angolare.

Noti B e C è possibile stimare gli abbassamenti del pozzo per ogni portata e valutare la sua efficienza. **IMPORTANTE: IL TUTTO VALE SEMPRE E SOLO RELATIVAMENTE ALLA DURATA DELLA PROVA A GRADINI, CHE DEVE ESSERE CONFRONTABILE CON LA DURATA PREVISTA DI ESERCIZIO DEL POZZO**

## 7 - POZZI DI GRANDE DIAMETRO

Tutte le volte che si mette in pompaggio un pozzo partendo da condizioni indisturbate viene dapprima utilizzato il volume di acqua immagazzinato all'interno della colonna di produzione e poi, solo quando il livello idrico all'interno del pozzo è diminuito, inizia il flusso dalla formazione acquifera. La presenza dell'effetto di immagazzinamento del pozzo fa sì che vi sia uno scostamento fra il tempo 0 di inizio della prova e il tempo a cui effettivamente la portata  $Q_a$  fornita dall'acquifero uguaglia la portata  $Q$  erogata dalla pompa; questo scostamento è tanto maggiore, quanto maggiori sono le dimensioni dell'opera di captazione.

Il valore dell'effetto di immagazzinamento, tanto più protratto nel tempo tanto più il pozzo è di grande diametro e tanto meno trasmissivo è l'acquifero, è misurato dal **coefficiente di immagazzinamento del pozzo  $C_w$** :

$$C_w = dV_w/dS_w = \pi(r_w^2 - r_p^2)$$

dove  $dV_w$  è la variazione di volume di acqua immagazzinato nel pozzo per variazione di livello misurato nel pozzo pari a  $dS_w$ ,  $r_w$  è il raggio del pozzo,  $r_p$  è il raggio della tubazione di mandata della pompa.

**Se il pozzo è di grande diametro la relazione abbassamento-logaritmo del tempo prevede una fase lineare iniziale, un aumento successivo della pendenza e poi una pseudo-stabilizzazione; questa ultima è la fase significativa da interpretare mentre la fase lineare iniziale e la fase successiva di aumento della pendenza sono conseguenze dell'effetto capacitivo.**

Come raccomandazione generale si può dire che la durata del pompaggio dovrebbe essere superiore ad un tempo critico detto  $t_c$ :

$$t_c = 25 r_w^2/T$$

con  $r_w$  raggio del pozzo (m) e T trasmissività ( $m^2/s$ ). Ad esempio se abbiamo un pozzo alla romana (raggio = 0,5 m) e la T dell'acquifero è  $2 \times 10^{-4} m^2/s$ , il valore del tempo di pompaggio deve essere superiore a 5,8 ore (quasi 6 ore) almeno per eliminare l'effetto capacitivo (**N.B.; sono buoni i dati rilevati per tempi successivi al tempo critico, quindi la prova deve durare almeno 1 ora più del tempo critico**).

## 8 – SLUG TEST

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

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

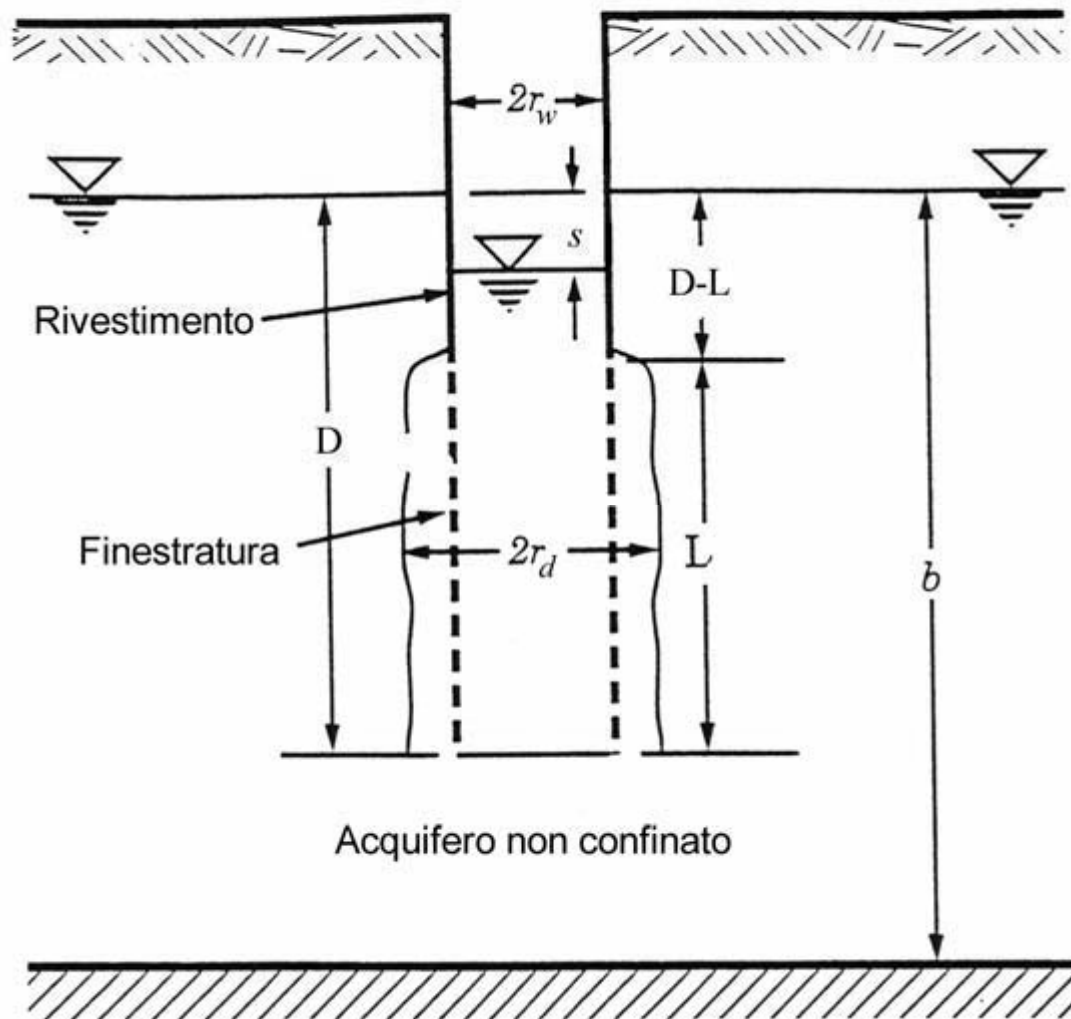
Vantaggi: uno *slug test* presenta dei vantaggi innegabili rispetto alla classica prova di falda che sono da ricondursi, innanzitutto, alla semplicità e rapidità di esecuzione e che si traducono in un conseguente minor costo: in particolare, l'esecuzione di uno *slug test* non richiede la disponibilità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

Svantaggi: per contro, il flusso indotto da uno *slug test* è molto limitato. Ne consegue che la risposta alla brusca variazione di livello indotto, e il conseguente valore di conducibilità idraulica ottenuto, sono fortemente condizionati dalle condizioni idrauliche esistenti nell'intorno del pozzo (modalità di perforazione, geometria di completamento, eventuale danneggiamento di permeabilità). In altri termini, l'affidabilità di uno *slug test* non è paragonabile minimamente a quella di una classica prova di falda multipozzo, che resta la modalità fondamentale per caratterizzare un acquifero e, in ogni caso, l'unica in grado di definire la tipologia idraulica del sistema acquifero. Inoltre, in mezzi porosi permeabili, le misure di variazione del livello non possono essere fatte manualmente ma richiedono l'impiego di trasduttori di pressione con registrazione automatica del dato ogni secondo per l'estrema rapidità del fenomeno di dissipazione del carico indotto.

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

Recentemente è stato presentato, da un gruppo di ricercatori del *Kansas Geological Survey*, un modello semianalitico tridimensionale per l'interpretazione degli *slug test* eseguiti su pozzi a parziale penetrazione e/o completamento in acquiferi non confinati e confinati. Tale modello, che incorpora anche il concetto dell'immagazzinamento dell'acquifero, è noto sinteticamente come modello *KGS* e rappresenta la metodologia di interpretazione più avanzata oggi disponibile. Un'ottima e chiara trattazione degli *slug test* è riportata in Fetter (1994).

Tenuto conto che il metodo di *Bouwer e Rice* è a tutt'oggi ancora il procedimento di interpretazione più utilizzato, è opportuno partire da questo, in maniera da conoscerne l'impostazione teorica, per comprenderne meglio le limitazioni.



**Figura 7 – Configurazione di uno *slug-test***

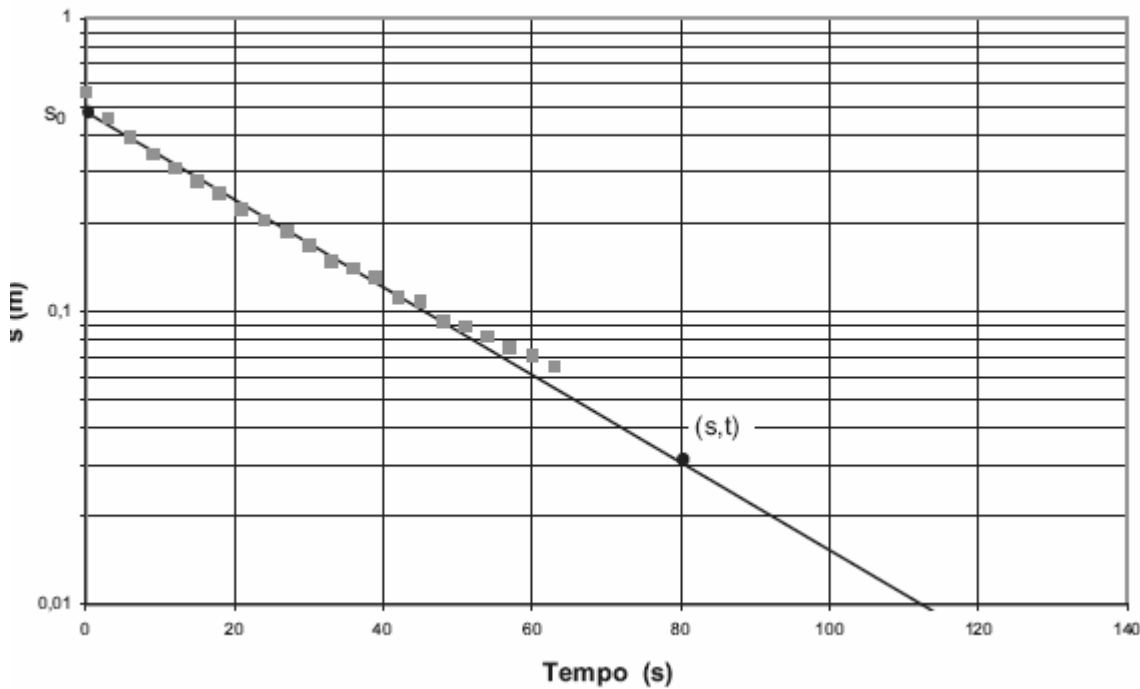
#### METODO DI BOUWER E RICE

Si consideri un pozzo o un piezometro completato in un acquifero non confinato, secondo la geometria rappresentata in Figura 7. La teoria di *Bouwer e Rice* poggia sulle seguenti assunzioni:

- l'acquifero è omogeneo e isotropo e pertanto non esiste danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo;
- è valida la legge di *Darcy*;
- acquifero è illimitatamente esteso in tutte le direzioni;
- l'immagazzinamento della formazione acquifera è trascurabile e, pertanto, gioca solo la conducibilità idraulica e la capacità trasmissiva del sistema;
- le perdite di carico per il flusso attraverso le finestre sono trascurabili;
- la posizione della tavola d'acqua non cambia con il tempo;
- il flusso creato dalla variazione di carico idraulico è esclusivamente orizzontale (i piani orizzontali virtuali passanti per il *top* ed il *bottom* del tratto finestrato si comportano da limiti impermeabili).

La soluzione di *Bouwer e Rice* indica che la variazione di livello in pozzo,  $s$ , varia rispetto al tempo con una legge di tipo semilogaritmico; pertanto, in un caso ideale, i punti  $\ln(s)$  vs  $t$

dovrebbero allinearsi lungo una retta il cui coefficiente angolare  $m$  è proporzionale alla conducibilità idraulica della formazione (Fig.8).



**Figura 8 – Grafico ripristino livello-tempo per uno slug-test**

Per la determinazione di  $m$  è sufficiente scegliere un punto su tale retta e poi calcolare:

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

e quindi:

$$K_r = m * [r_w^2 * \ln(R_e/r_d)] / (2L)$$

in cui:

$S_0$ : innalzamento o abbassamento iniziale;

$S$ : innalzamento o abbassamento al tempo  $t$ ;

$r_w$ : raggio del piezometro;

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

$r_d$ : raggio fino a cui l'acquifero è stato stimolato o spurgato dalla perforazione.

$L$ : lunghezza tratto fenestrato

L'unico problema che sorge nell'applicazione è quello legato alla determinazione del raggio effettivo  $R_e$ , che è funzione dei parametri geometrici del foro. *Bouwer e Rice* risolsero il problema lavorando con un modello analogico di tipo elettrico, che consentì loro di trovare le espressioni di  $R_e$  in funzione di tali parametri. Si rimanda alla pubblicazione originale.

#### DURATA DELLO SLUG-TEST

Nelle formazioni dotate di buona permeabilità il tempo impiegato dalla risalita o dal declino di livello per ritornare al valore indisturbato può essere molto breve e tale da richiedere l'impiego di apparecchiature automatiche di misura e registrazione del livello in pozzo.

Poiché nella realtà tutti gli acquiferi sono caratterizzati da un certo valore di immagazzinamento (condizione esclusa dalle ipotesi di validità della teoria di *Bouwer e Rice*, così come da quella di *Hvorslev*), anche in uno *slug test* perfettamente eseguito i valori sperimentali  $\ln(s)$

vs  $t$  non sono perfettamente allineati lungo una retta, ma mostrano una curvatura che denota l'effetto dell'immagazzinamento esercitato dall'acquifero. Nasce pertanto il problema di individuare la retta che meglio approssima il modello teorico semilogaritmico. Butler (Butler, 1998) raccomanda che il comportamento rettilineo venga individuato, in particolare, nel campo  $s/s_0 = 0.15 - 0.25$ .

### INFLUENZA DEL DRENO

Indipendentemente dalla curvatura legata all'effetto dell'immagazzinamento, spesso nella rappresentazione dei dati sperimentali è possibile riconoscere due distinti andamenti rettilinei di cui il primo AB a pendenza molto maggiore del secondo BC. Ciò può essere dovuto all'effetto del dreno e/o dello sviluppo nell'intorno del pozzo che, avendo creato una zona ad elevata permeabilità, determina una risposta molto più veloce ed immediata al disturbo creato dalla variazione istantanea di livello (tratto AB). Successivamente, quando il transiente si estende alla zona di acquifero indisturbato, si ottiene una seconda linearizzazione (tratto BC) che è quella significativa ai fini della determinazione della conducibilità idraulica. L'effetto della doppia linearizzazione si verifica, in particolare, quando il livello statico e la variazione di livello in pozzo ricadono all'interno del tratto finestrato, mentre non dovrebbe prodursi nei casi in cui la variazione di livello ricade nel tratto non finestrato del pozzo o piezometro.

## 9 - SUGGERIMENTI PER ESECUZIONE DI PROVE SU POZZO SINGOLO

Vengono qui elencate alcune norme e raccomandazioni di buona pratica, basate sull'esperienza idrogeologica di campo dello scrivente, per l'effettuazione di prove di pozzo su pozzo singolo. Tali raccomandazioni sono valide per pozzi già esistenti, in assenza di punti di osservazione per effettuare prove su stazione e quando lo scopo della prova sia verificare la produttività del pozzo per opere già esistenti. Si ritiene che tali raccomandazioni siano utili per indagini territoriali di valutazione della risorsa ad opera di enti pubblici, per parametrizzare pozzi da denunciare e di cui non si conoscono i parametri idrodinamici, per effettuare indagini di monitoraggio o indagini peritali ai fini della valutazione di effetti sulla risorsa idrica di opere di ingegneria sotterranea (gallerie, pozzi, drenaggi in genere).

- Identificare il pozzo ed ottenere dal proprietario alcune **informazioni di base** di cui le principali sono: **profondità del perforo** (necessaria), profondità dell'elettro-pompa sommersa, posizione e tipologia dei tratti filtrati. Misurare direttamente il **diametro del tubo di rivestimento**. In una eventuale scheda segnaletica le informazioni essenziali da annotare sono: profondità del pozzo e diametro del tubo di rivestimento. Informazioni importanti, anche se non sempre ottenibili, sono profondità e lunghezza dei tratti filtrati, diametro del perforo all'atto della perforazione.
- Se vi è la possibilità della **presenza di pozzi nelle vicinanze** tenere sotto controllo il livello statico da almeno 1 settimana prima della prova per verificare l'influenza di pompaggi vicini.
- **Identificare un caposaldo fisso di riferimento** sulla testa pozzo rispetto al quale effettuare tutte le misure di abbassamento ed annotarne la tipologia e la descrizione. Corredare la documentazione di foto mostranti la struttura della testa-pozzo
- Verificare, anche con delle prove preliminari, che il **pozzo, una volta acceso, rimanga in tale situazione per il tempo idoneo alla prova**. Spesso tale situazione non si verifica per le seguenti condizioni: o esistono delle sonde di protezione della pompa che staccano e riattaccano la medesima se il livello va sotto un certo valore (in quel caso le sonde vanno

disarmate); o il pozzo riversa l'acqua in un serbatoio che, al riempimento, comanda lo stacco-pompa (in quel caso vanno tolte o disarmate le sonde di livello dal serbatoio ed il medesimo va messo in scarico); o il pozzo è collegato ad un sistema pneumatico (polmone, autoclave) che stacca il pozzo al raggiungimento di una certa pressione (in tal caso l'autoclave va disinserita). Spesso sono necessarie complesse operazioni meccaniche ed idrauliche per fare sì che il pozzo funzioni per un tempo sufficiente all'effettuazione della prova di portata. Si raccomanda di fare tutto questo per evitare di trovarsi di fronte all'inconveniente che il pozzo si spegne durante l'effettuazione della prova.

- Verificare che **l'acqua del pompaggio sia evacuata in maniera opportuna** senza creare allagamenti che potrebbero inficiare la prova (acquifero libero, bassa soggiacenza, suolo permeabile) o comunque creare difficoltà al proprietario
- Verificare che vi sia **una saracinesca di regolazione della portata** e regolare la portata, con prove preliminari, sulla base della posizione della manovella o dei giri della medesima. In pratica definire prima a che portate corrispondono i diversi giri della manovella o della manichetta. Spesso ci si trova a brutte sorprese: già una minima apertura della saracinesca fa fuoriuscire la portata massima mentre, all'opposto, saracinesche troppo chiuse non fanno uscire acqua rischiando di surriscaldare e danneggiare la pompa.
- Durante la prova vi sono rischi assai elevati che il **freatimetro rimanga incagliato nelle flange del tubo di mandata della pompa o rimanga attorcigliato lungo i cavi della corrente elettrica**. Il freatimetro ideale è centimetrato, inestensibile, con buoni contrappesi in fondo che lo appesantiscono e lo fanno essere in tensione sempre (questo è anche utile per superare gli orifizi disponibili dentro il pozzo durante la discesa del freatimetro).
- Quando si inizia una prova di portata **si inizi a fare scattare il cronometro** non da quando si accende la pompa ma da quando il livello inizia ad abbassarsi in risposta all'accensione.
- Durante l'effettuazione di una prova a portata costante, o di un gradino a portata costante, **verificare che la portata rimanga effettivamente costante**. Spesso, soprattutto se il pozzo è poco efficiente, al diminuire del livello e, quindi, all'aumentare della prevalenza, la portata diminuisce. In tal caso si assiste ad una apparente stabilizzazione dell'abbassamento che però è dovuta ad una diminuzione di portata. La saracinesca va quindi regolata per mantenere la portata costante (con una tolleranza del 10%).
- Al momento dello spegnimento della pompa per effettuare la prova di risalita, se non vi è valvola di non ritorno, **fare in modo di impedire che tutta l'acqua presente nel tubo di mandata ritorni nel pozzo** con un effetto di ricarica artificiale e di risalita fittizia del livello, significativo per acquiferi poco trasmissivi.
- Durante l'effettuazione della prova di portata **verificare di non pervenire al livello del filtro aspirante della pompa**. Infatti, se non nota tale posizione, si assiste ad una apparente stabilizzazione del livello (il livello non scende sotto il filtro di aspirazione della pompa).
- Se si misura la portata con metodo volumetrico riempiendo un recipiente di volume noto, non operare, al momento della misura, spostamenti significativi in alto o in basso del tubo di mandata della pompa **per evitare variazioni di portata dovute a variazioni di prevalenza**.

## **10 - POSSIBILE PROTOCOLLO DI PROVA DI POZZO**

### **IPOTESI 1 - PROVA A GRADINI SU POZZO DI DIAMETRO NORMALE + RISALITA**

La prova, della durata complessiva stimabile fra 6 e 10 ore (di cui la metà a pozzo spento in risalita) permette, tramite un compromesso ragionevole fra applicazione del metodo di equilibrio (trasmissività da portata specifica, prova a gradini) e del non equilibrio (metodo della risalita) di stimare parametri significativi del pozzo (trasmissività, costanti di perdite di carico, efficienza, portata di esercizio)

Effettuazione di una prova a gradini di portata con numero dei gradini compreso fra 3 e 5. La durata di ogni gradino deve essere uguale e, comunque, la durata di ogni gradino deve essere confrontabile con il tempo con cui, operativamente, il pozzo sta acceso durante il normale esercizio (si raccomandano comunque durate minime di almeno 60 minuti).

Assai importante è la effettuazione del primo, ed eventualmente anche del secondo gradino. Essi sono condotti a portate relativamente basse, pari a 1/10-1/5 della portata massima estraibile dal pozzo. Se la portata è piccola nel tempo di 30 minuti-1 ora ci dovrebbe essere, almeno per il primo gradino, una stabilizzazione o comunque una pseudo-stabilizzazione del livello.

Sfruttando l'abbassamento stabilizzato (se effettivamente si è raggiunta una stabilizzazione) o estrapolando per tempi di 3-5 ore l'abbassamento, se non si è raggiunta la stabilizzazione, si ottiene la portata specifica e da questa, tramite le formule dell'equilibrio di *Thiem*, si ottiene una stima assai accettabile della trasmissività. L'adozione di portate molto basse rende nulle (nel caso di acquiferi confinati) o trascurabili (nel caso di acquiferi liberi) le perdite quadratiche di carico e quindi minimizza la conseguente sottostima della trasmissività.

Al termine dell'ultimo gradino viene spenta la pompa e viene misurata la risalita del livello. La risalita del livello deve essere misurata per tempi non inferiori alla durata complessiva del pompaggio, per cui se il pompaggio è durato 3 ore (3 gradini di 1 ora) la risalita deve durare almeno 3 ore. Questo perché il principio dell'approssimazione logaritmica è valido per tempi lunghi nel caso della risalita (come anche nel caso del pompaggio).

Dall'elaborazione della curva di risalita, e considerando una portata  $Q$  pari alla media, pesata sui tempi di pompaggio, delle portate emunte con i vari gradini, si ottiene un'ulteriore stima della trasmissività. Tale seconda stima sarà diversa, presumibilmente, da quella ottenuta dalla capacità specifica. Infatti quella ottenuta dalla risalita, per i tempi di pompaggio più lunghi, sarà relativa ad un volume maggiore di acquifero. Se l'acquifero è omogeneo ed illimitato allora i 2 valori saranno coincidenti.

A partire dalla prova a gradini si ottiene la curva caratteristica del pozzo (ricostruita con la portata in ascissa e l'abbassamento di ogni gradino dopo lo stesso tempo di pompaggio in ordinata). L'elaborazione dei dati della prova a gradini permetterà di stimare le costanti delle perdite di carico lineari e quadratiche e l'efficienza del pozzo.

### **IPOTESI 2 - PROVA A PORTATA COSTANTE + RISALITA**

La prova, della durata complessiva stimabile di 6 ore (di cui la metà a pozzo spento in risalita) permette, tramite applicazione del metodo di non equilibrio (trasmissività in pompaggio, trasmissività da risalita), di determinare la trasmissività dell'acquifero e, se presente un punto di osservazione (pozzo, piezometro) anche del coefficiente di immagazzinamento.

La durata della prova non è lunga quindi è possibile che non sia verificata la condizione necessaria per il metodo dell'approssimazione logaritmica di *Cooper-Jacob*. In tal caso la risoluzione dovrebbe essere fatta tramite abachi con *software* dedicato (es. *Aquifer Test*). Ad ogni modo se la durata della prova è confrontabile con la durata media di esercizio del pozzo, i parametri ottenuti possono essere considerati ancora significativi alla scala di volume di acquifero in genere "coinvolto" dal pozzo medesimo.

La portata di emungimento dovrà essere sufficientemente bassa da evitare grosse perdite di carico, soprattutto se il pozzo capta un acquifero libero; in quest'ultimo caso è consigliabile che l'abbassamento non sia superiore a 0,15 volte lo spessore saturo di acquifero.

Se il pozzo è di grande diametro la prova deve svolgersi per un tempo sufficiente a superare l'effetto capacitivo (vedi paragrafo specifico).

## **BIBLIOGRAFIA**

Bouwer H., Rice C. (1976). *A slug test for determining hydraulic conductivity for unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells*, Water Resources Research, vol. 12, n. 3, pagg. 423-438.

Bouwer H. (1989), *The Bouwer and Rice slug test. An update*, Groundwater, vol. 27, n. 3, pagg. 304-309.

Butler Jr. JJ. (1998). *The design, performance and analysis of slug tests*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Chenaf D. & Chapuis R.P. (2002). *Methods to determine storativity of infinite confined aquifers from a recovery test*. Groundwater, 40, 4, 385-389.

Di Molfetta A. (1995). *Determinazione delle caratteristiche idrodinamiche degli acquiferi e produttive dei pozzi mediante prove di pompaggio*, IGEA, n. 4, pagg. 13-30.

Domenico P.A. & Schwartz F.W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology*. II edition, John Wiley & Sons.

Fetter C. W. (1994). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall.

Genetier B. (1993). *La pratica delle prove di pompaggio in idrogeologia*, Dario Flaccovio Ed., Palermo.

Halford K.J., Weight W.D., Schreiber R.P. (2006). *Interpretation of transmissivity estimates from single-well pumping aquifer tests.*, Groundwater, 44, 3, 467-471.

Helweg O. J. (1994). *A general solution to the step-drawdown test*. Groundwater, 32, 3, 363-366.

Kawecki M. W. (1995). *Meaningful interpretation of step-drawdown tests*. Groundwater, 33, 1, 23-32.

Kruseman G.P., De Ridder N.A. (1989). *Analysis and evaluation of pumping test data*, IV ed., ILRI, Wageningen, The Netherlands.

Zheng L., Guo J.Q. & Lei Y. (2005). *An improved straight-line fitting method for analyzing pumping test recovery data*. Groundwater, technical note, 43, 6, 939-942.